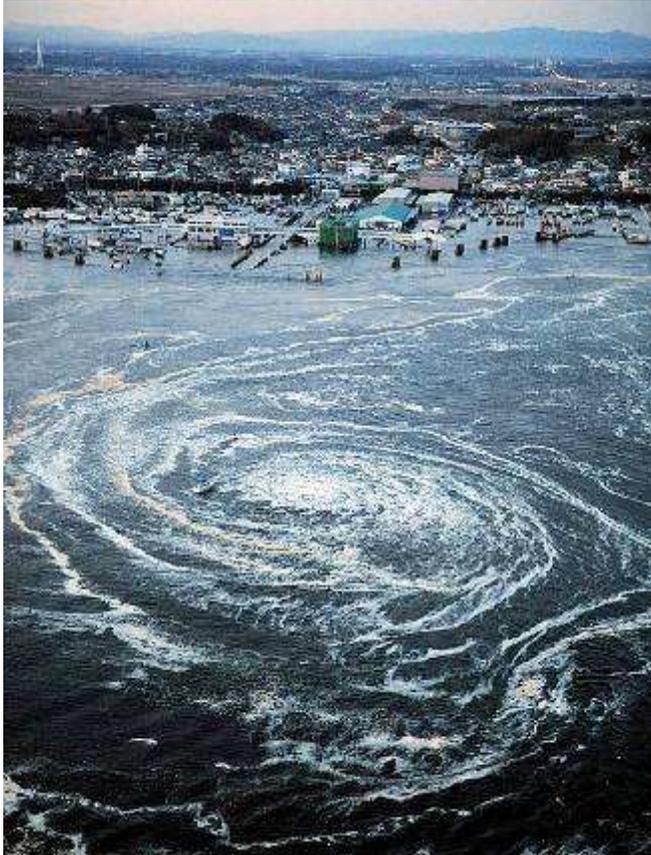


Le tsunami du 11 mars 2011

Au Japon et dans le Pacifique

Les faits et les questions soulevées

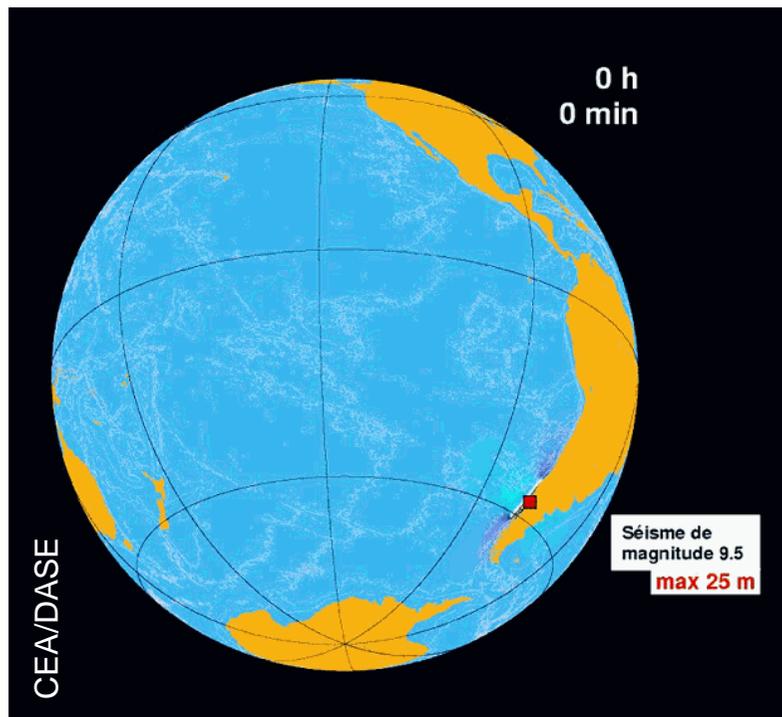
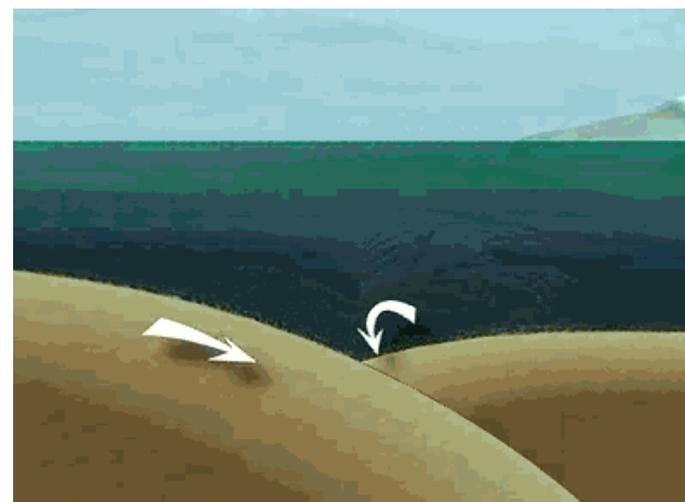
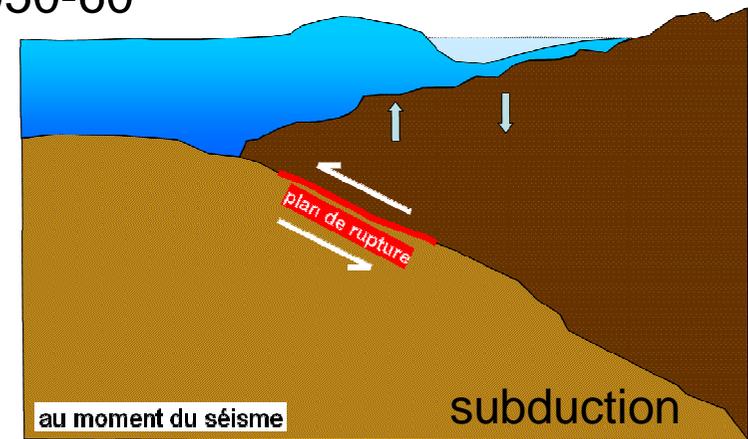


Hélène Hébert
CEA DAM DIF DASE/LDG – Bruyères le Châtel (91)
Bureau des Longitudes - 5 octobre 2011

helene.hebert@cea.fr

Pourquoi un tsunami ?

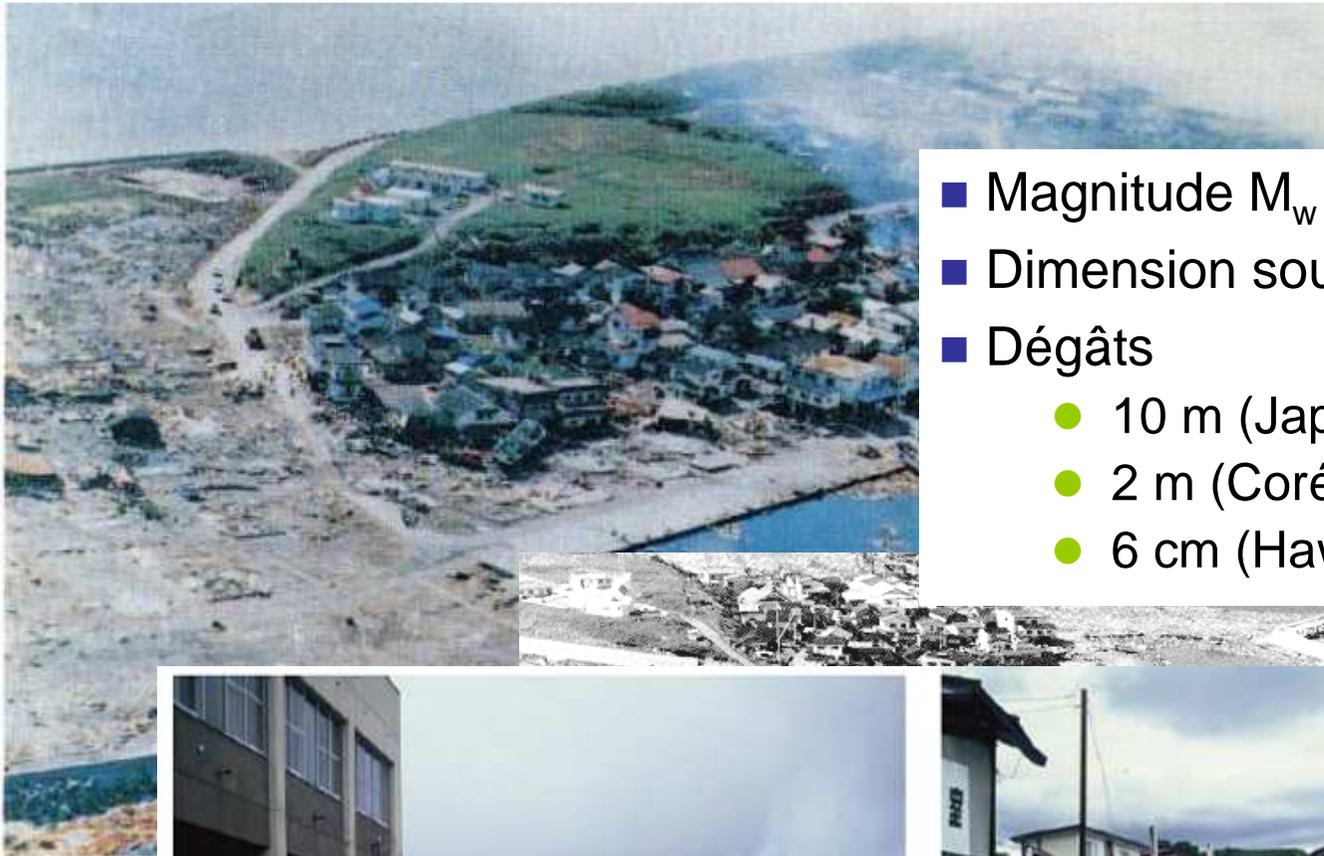
- Les grands séismes de subduction génèrent des tsunamis transocéaniques :
 - propagation d' « ondes longues »
 - dégâts sur des rivages très éloignés (Chili 1960, Sumatra 2004)
 - plusieurs cas similaires dans les années 1950-60
- Pas de scénario similaire pour le Japon
 - mais des paléo-dépôts spectaculaires



A quoi ressemble un tsunami



Japon 1993



- Magnitude M_w 7.7
- Dimension source ~ 150 km
- Dégâts
 - 10 m (Japon)
 - 2 m (Corée, Russie)
 - 6 cm (Hawaï)

Figure 1 View 1993. Note the destroyed and next-day photo



Aonae fishing port



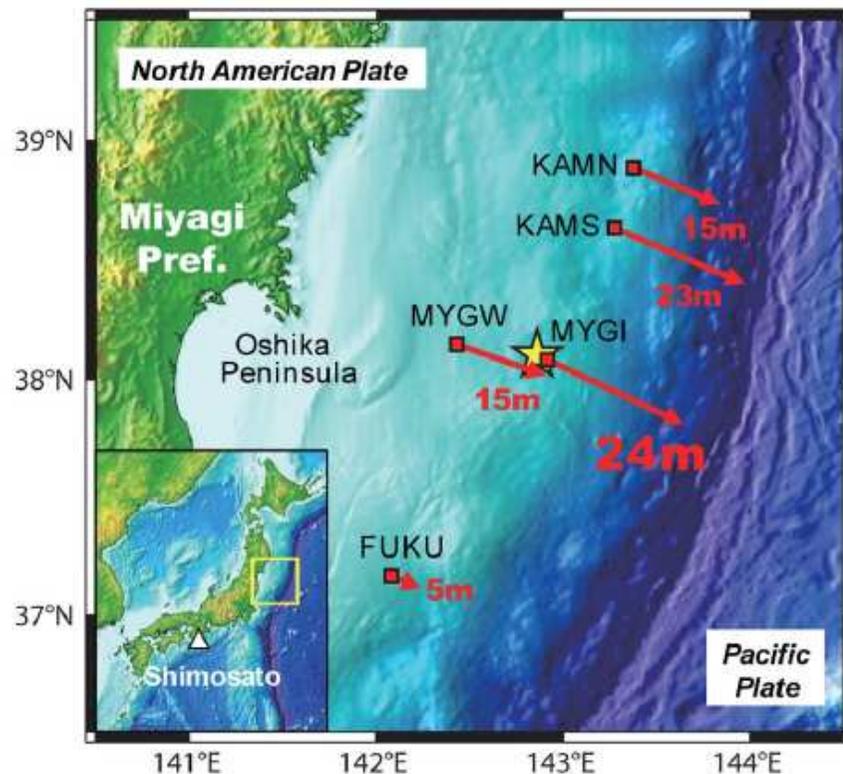
Kamiura fishing port



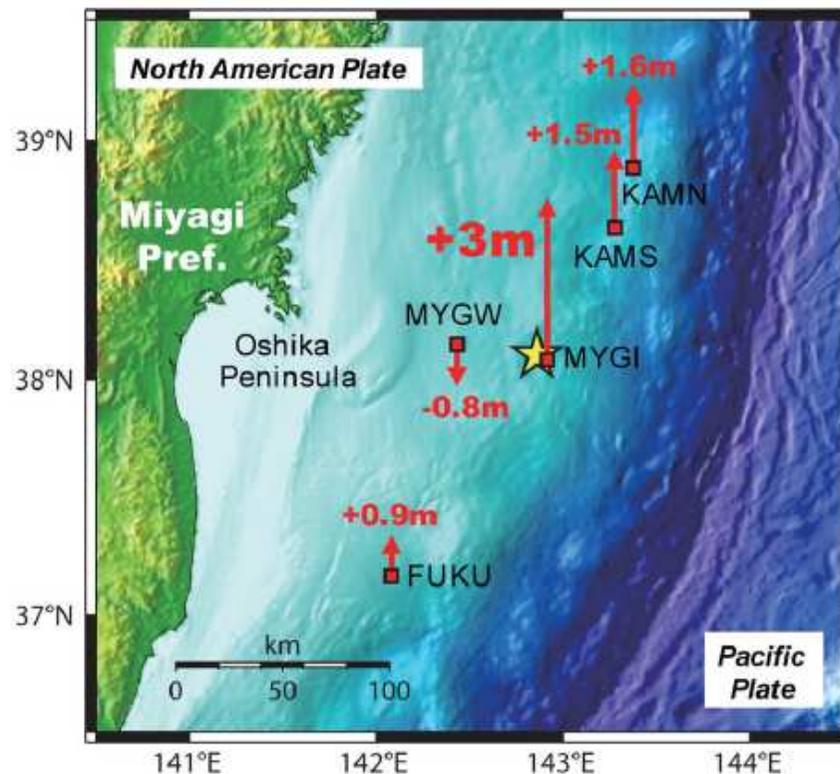
Que se passe-t-il au moment du séisme ?

- Relâchement brusque de contraintes accumulées lors des mouvements tectoniques lents
 - centaines à milliers d'années, à des taux de 1 à 10 cm/an
 - les déformations accumulées sont de plusieurs mètres

(A) Horizontal displacements



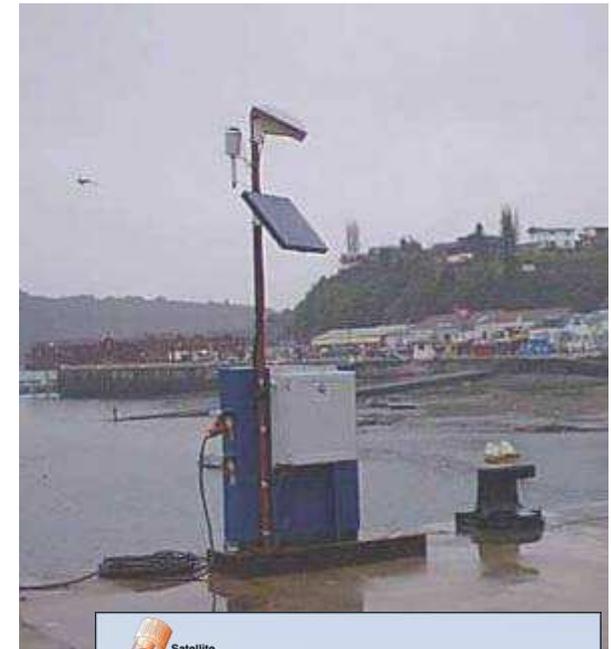
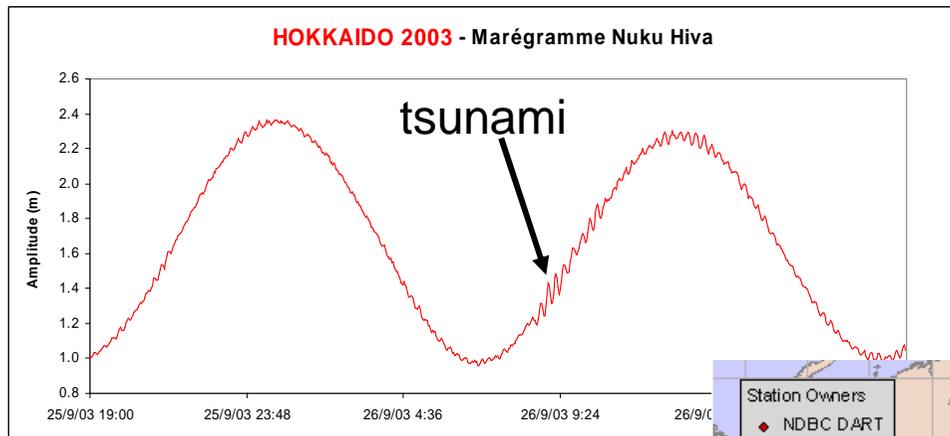
(B) Vertical displacements



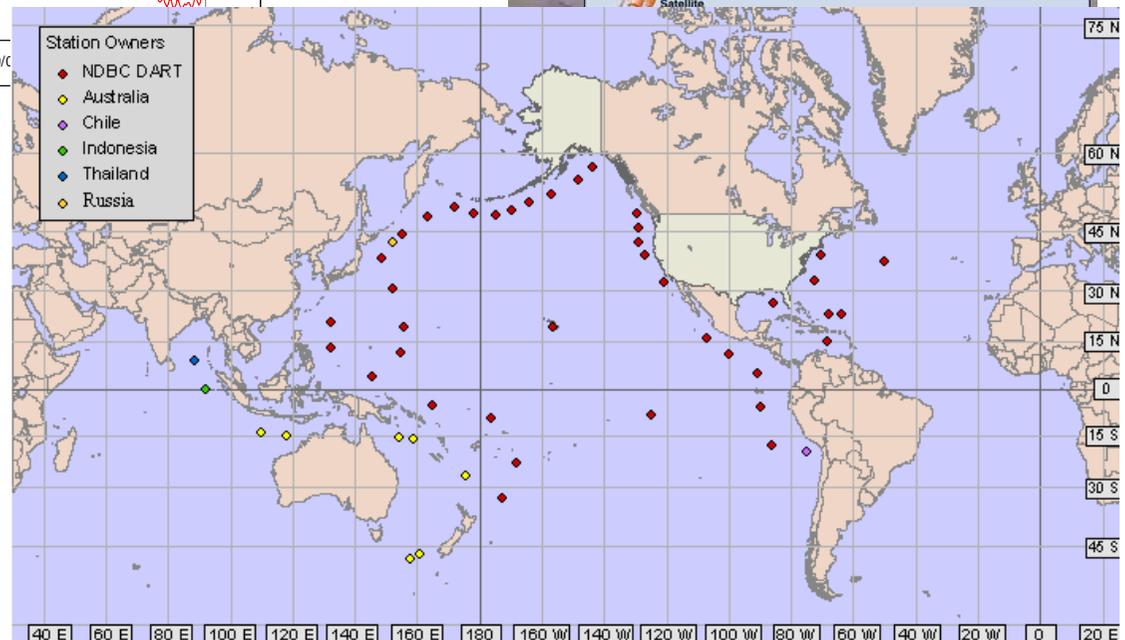
(Sato *et al.*, Science, mai 2011)

Un tsunami est observé à la côte

- Données temporelles : marégrammes
 - dédiés en premier lieu à l'étude des marées
 - reflètent les phénomènes portuaires
 - échantillonnage souvent insuffisant

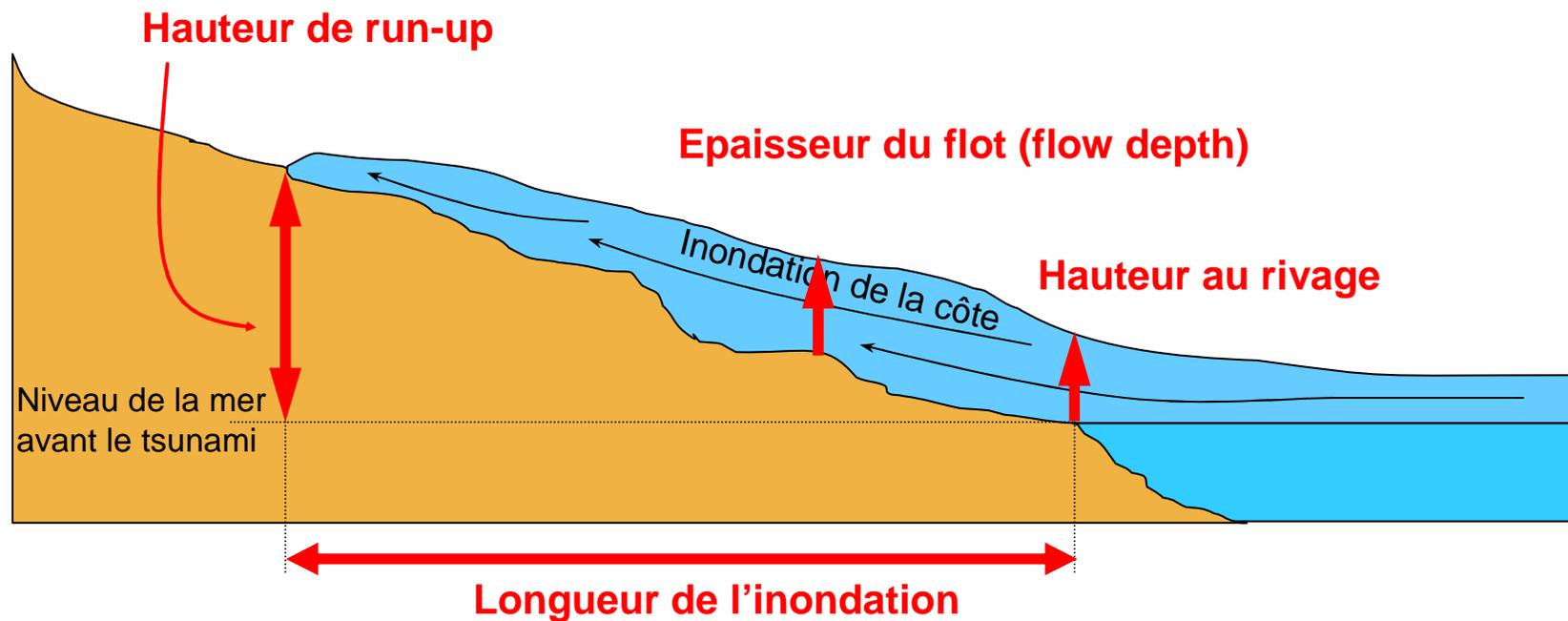


- Capteurs de pression au fond de la mer
- Bouées GPS



Run-up

- Données d'amplitude ponctuelles :
 - longueur (pénétration) de l'inondation
 - épaisseur du flot (flow depth)
 - hauteur au rivage
 - run-up
- Surtout qualitatif
- Peu de contraintes temporelles



Mesures japonaises dans les premières minutes

- Capteurs de pression sur la zone cosismique
- Bouées GPS près des côtes

釜石沖海底ケーブル式地震計システムで観測された海面変動
東京大学地震研究所

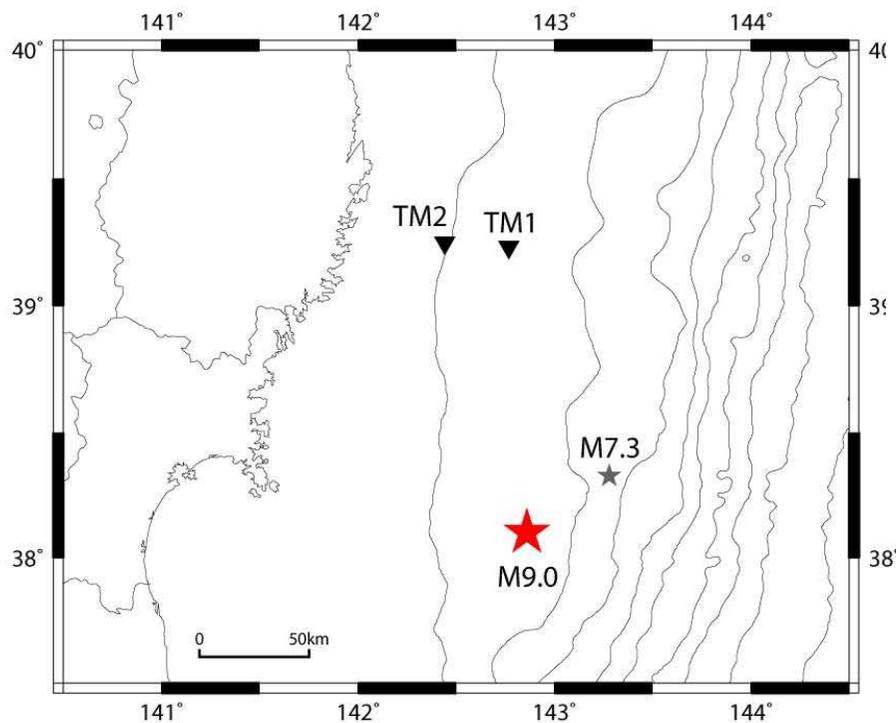


図1 釜石沖ケーブル式海底水圧計の位置

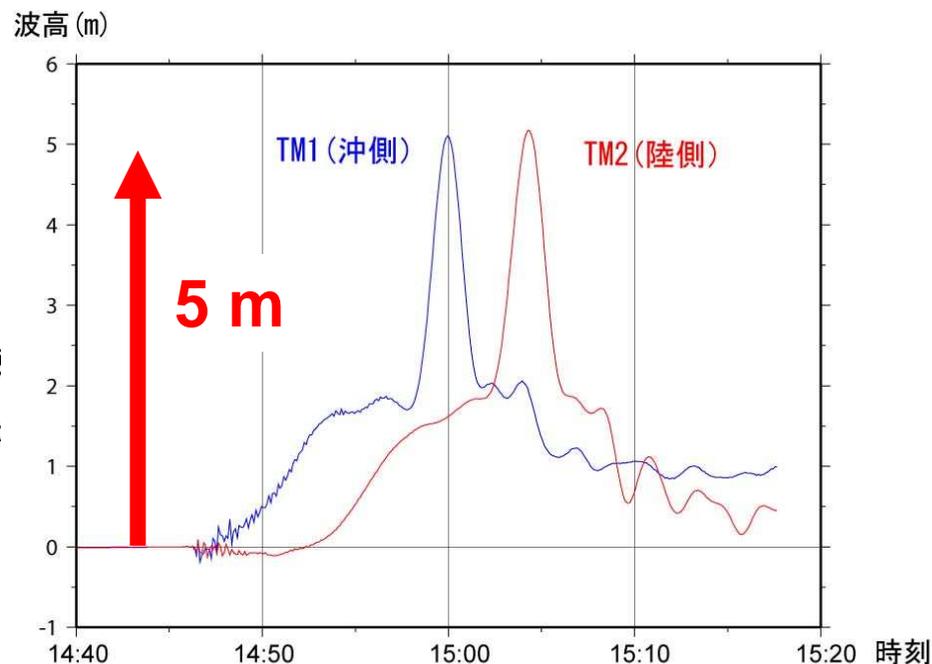
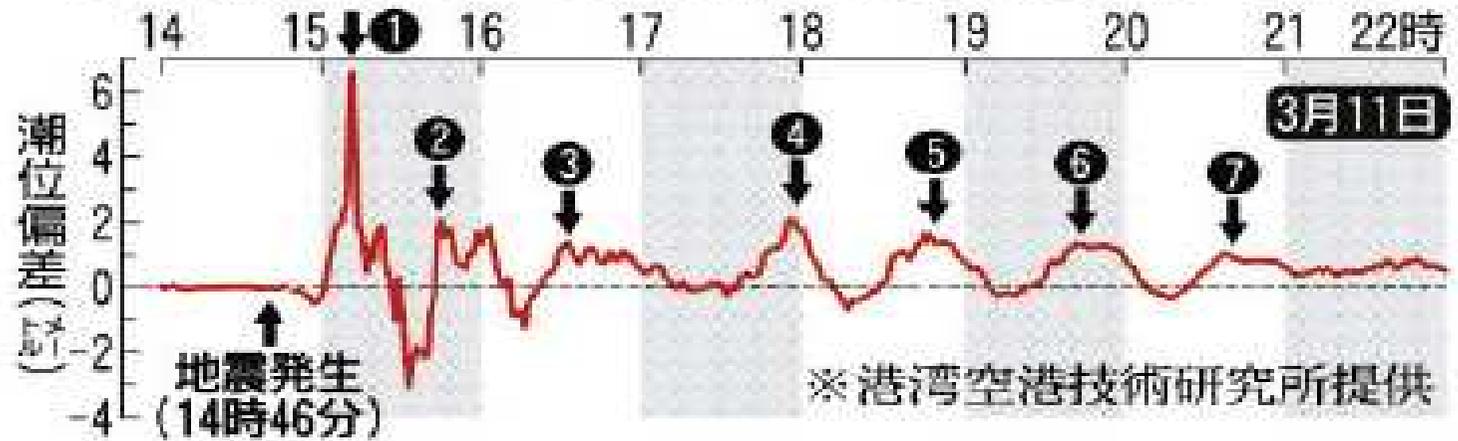


図2 海底水圧計の観測記録。14時46分頃、本震(M9.0)の振動が水圧計に伝わり、TM1(海寄り)では、その時から徐々に海面が上昇している。約2m上昇し、約11分後にはさらに約3m急激に上昇し、合計約5m海面が上昇した。約30km陸寄りに設置されているTM2では、TM1から約4分遅れて同様の海面上昇を記録した。



岩手県南部沖GPS波浪計でとらえた津波の波形



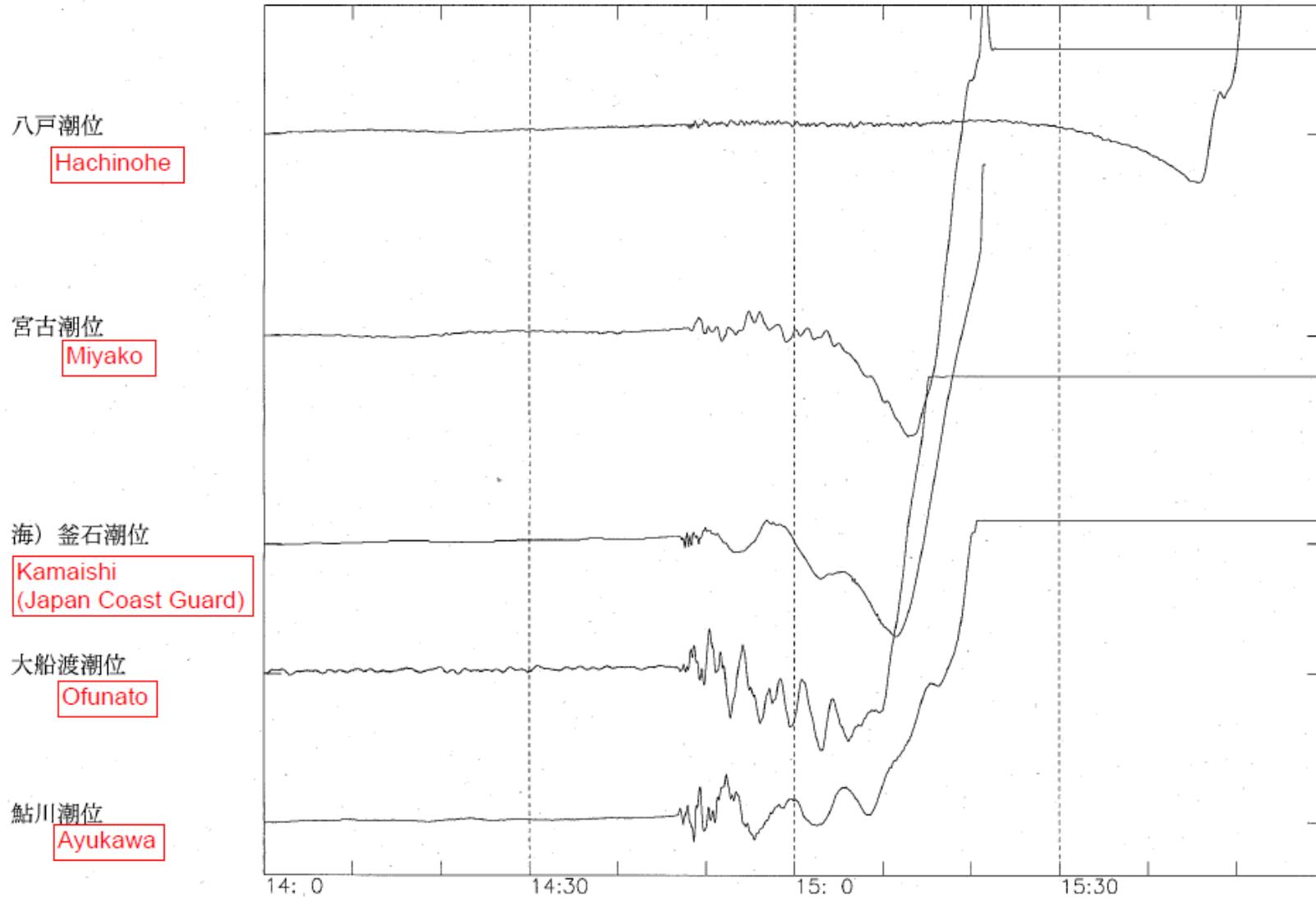
GPS Buoy off Kamaishi (PARI)
(About 20 km off, sea depth: 300 m, 3 M\$)

Marégrammes

気象庁潮位1 (直送・潮位計・秒値) (検潮所名)

< 2011/ 3/11 14: 0 -- 2011/ 3/11 16: 0 >

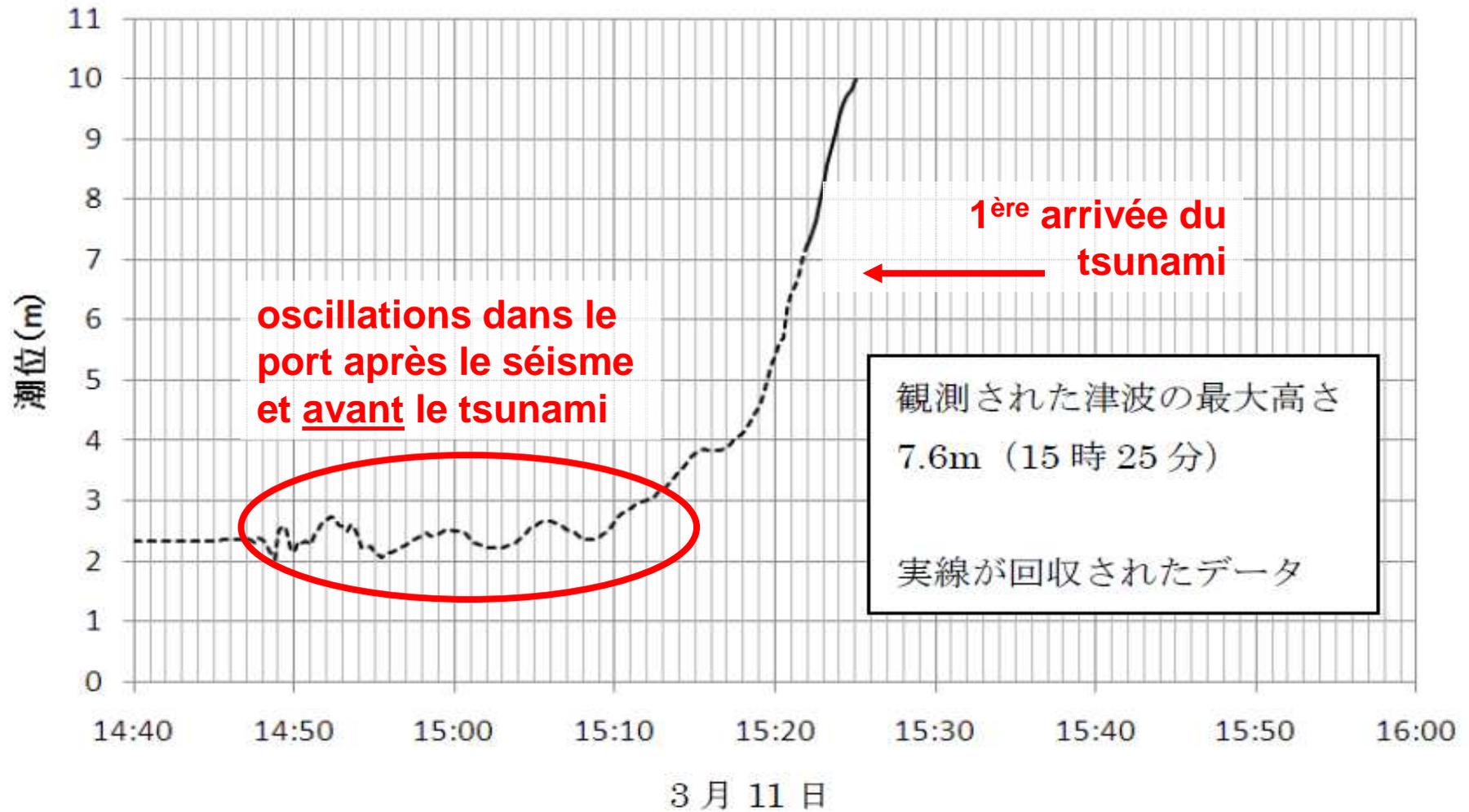
1000 mm
scale: 1 meter



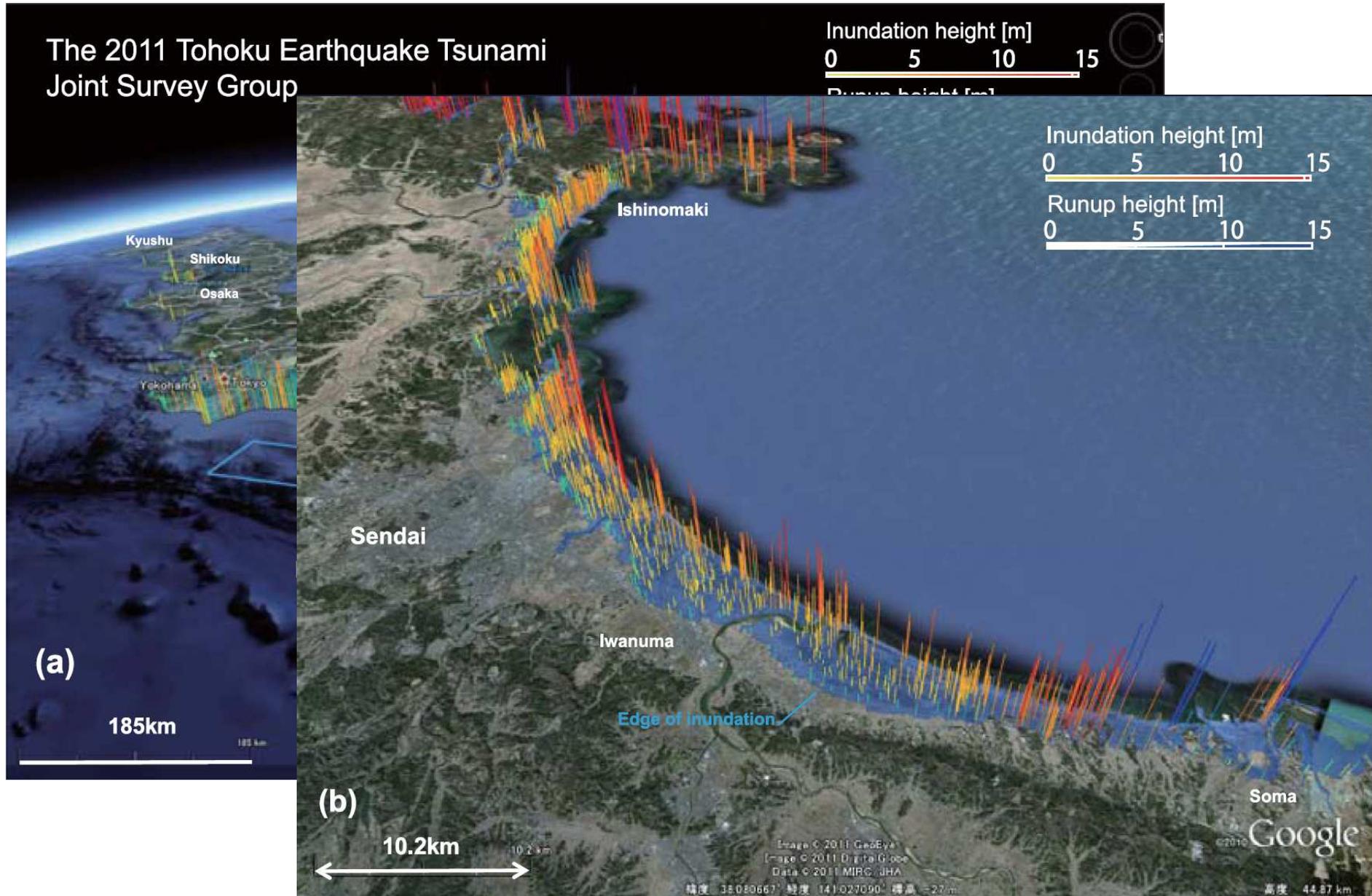
14:00 - 16:00 (JST), 11 March 2011 (sampling interval: 1 second)

Une réponse spectaculaire dans les ports

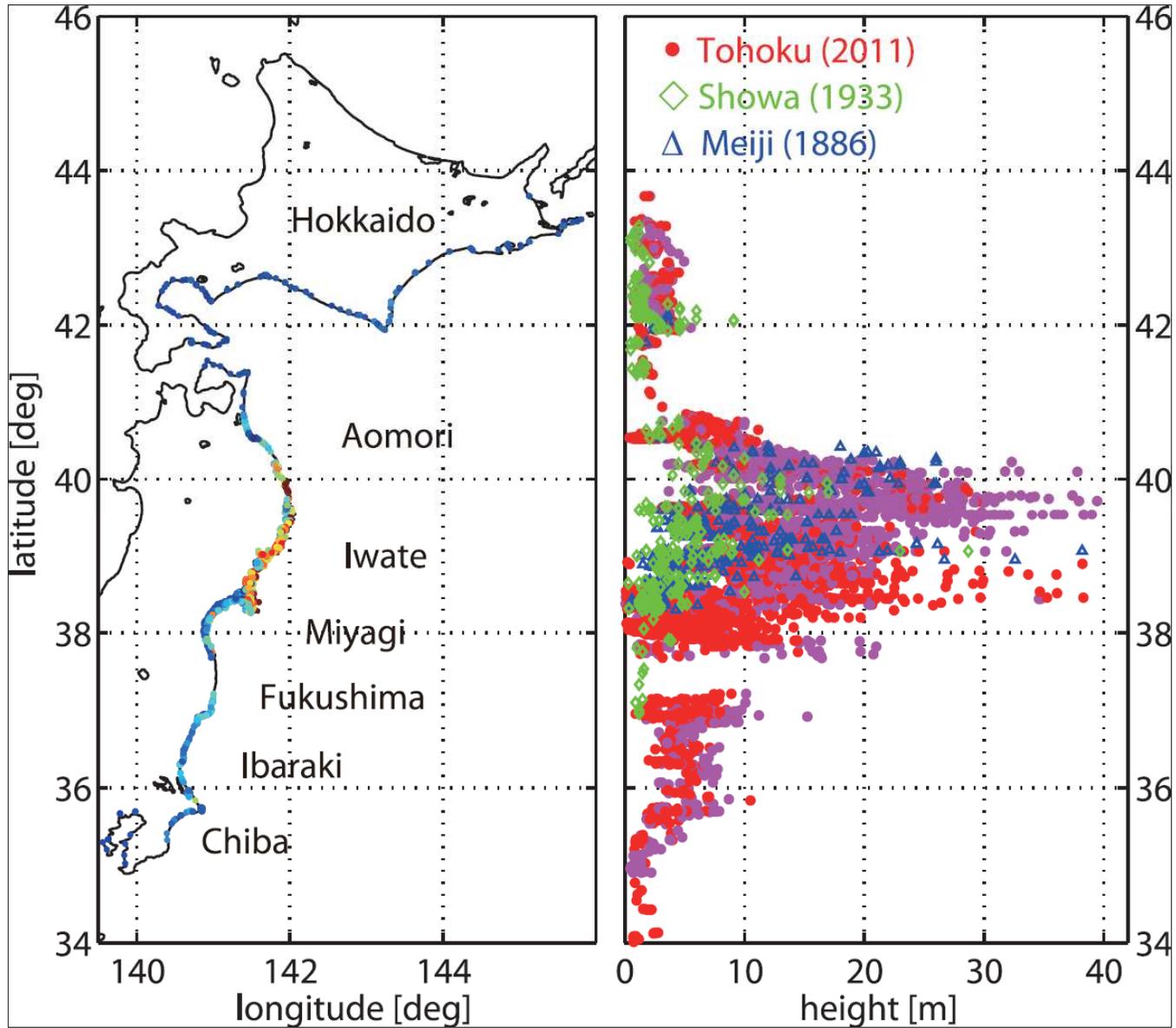
Ishinomaki (NE de Sendai)



Sur les côtes japonaises

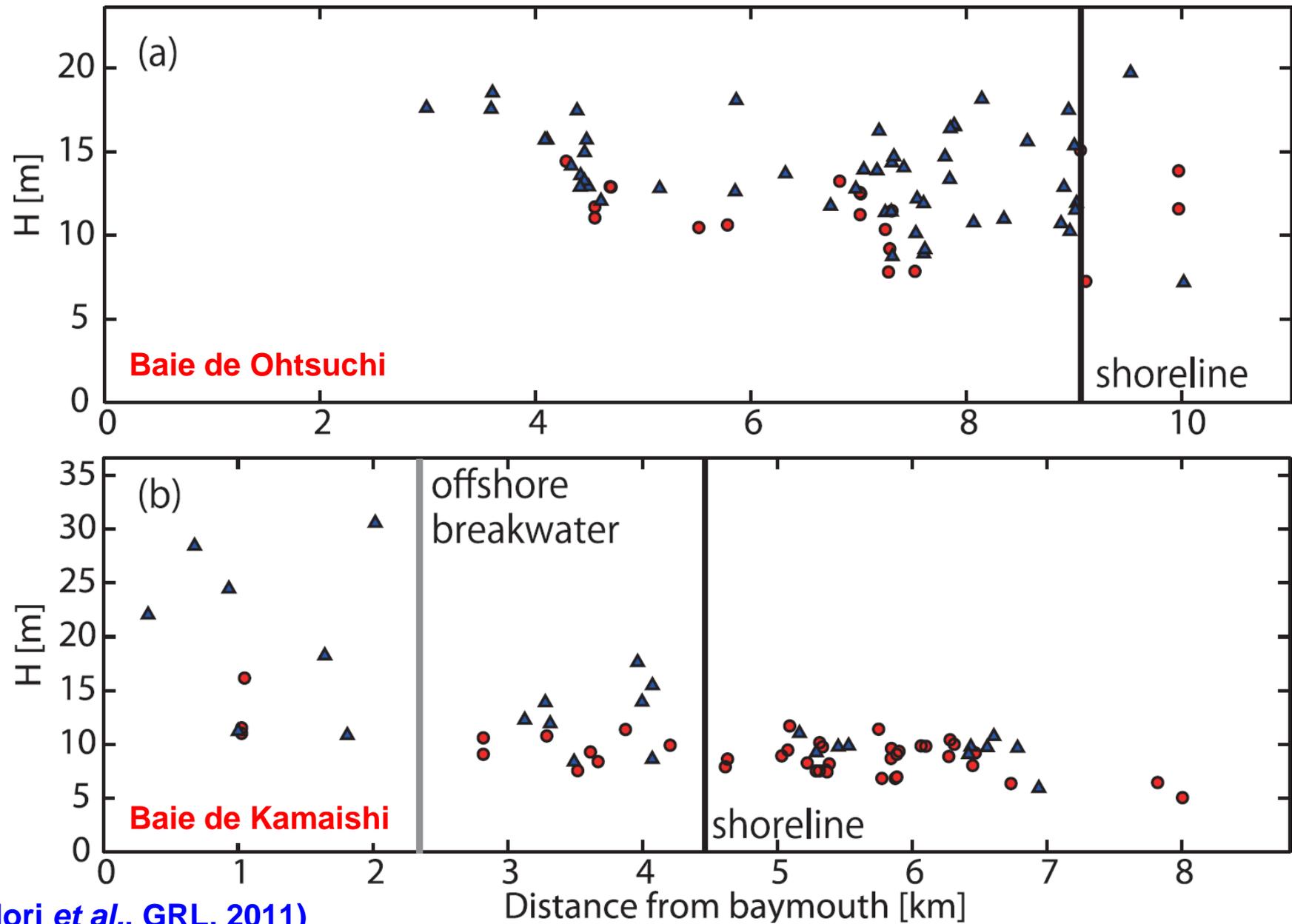


(Mori *et al.*, GRL,2011)



(Mori *et al.*, GRL, 2011)

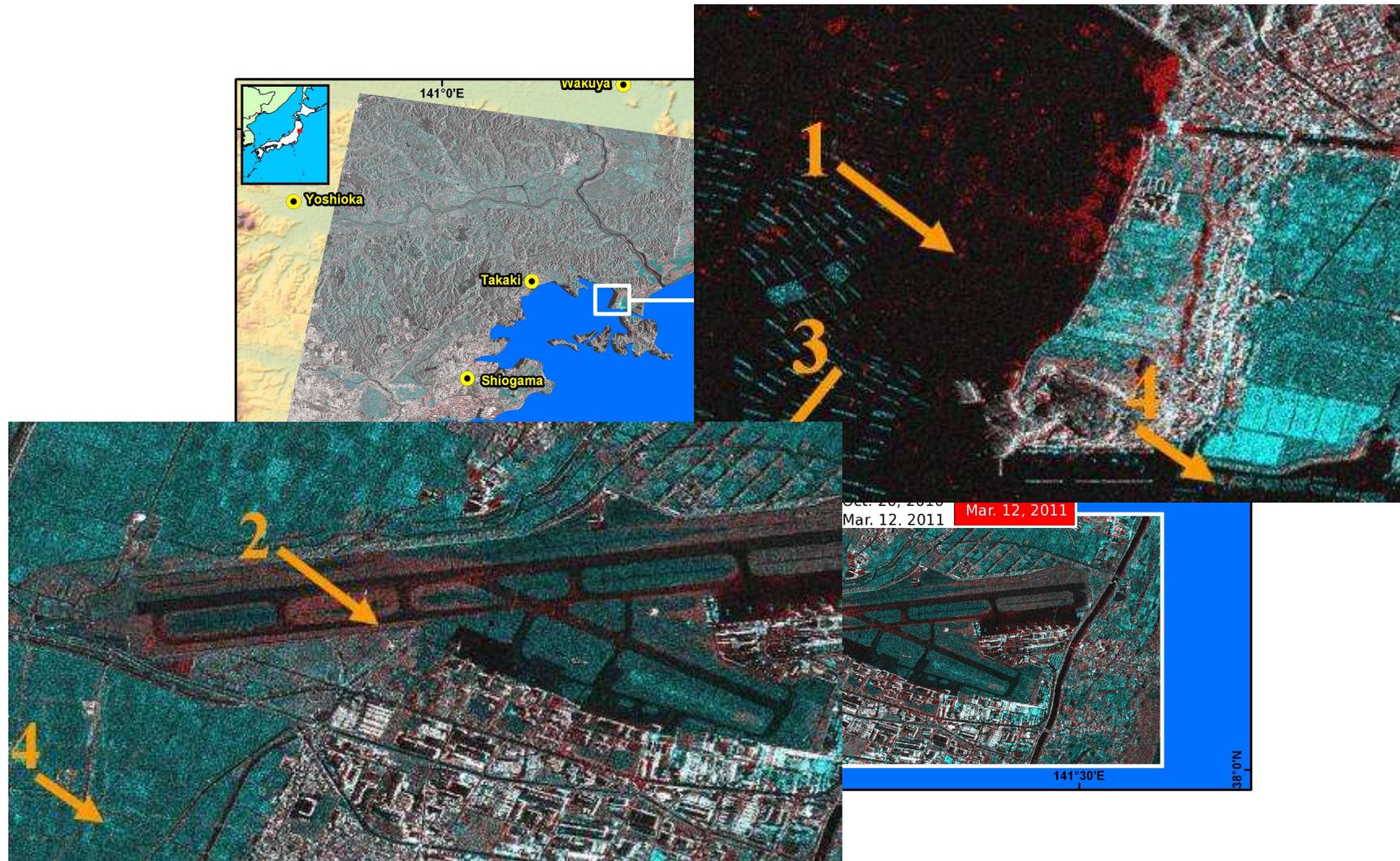
Effets des digues de protection



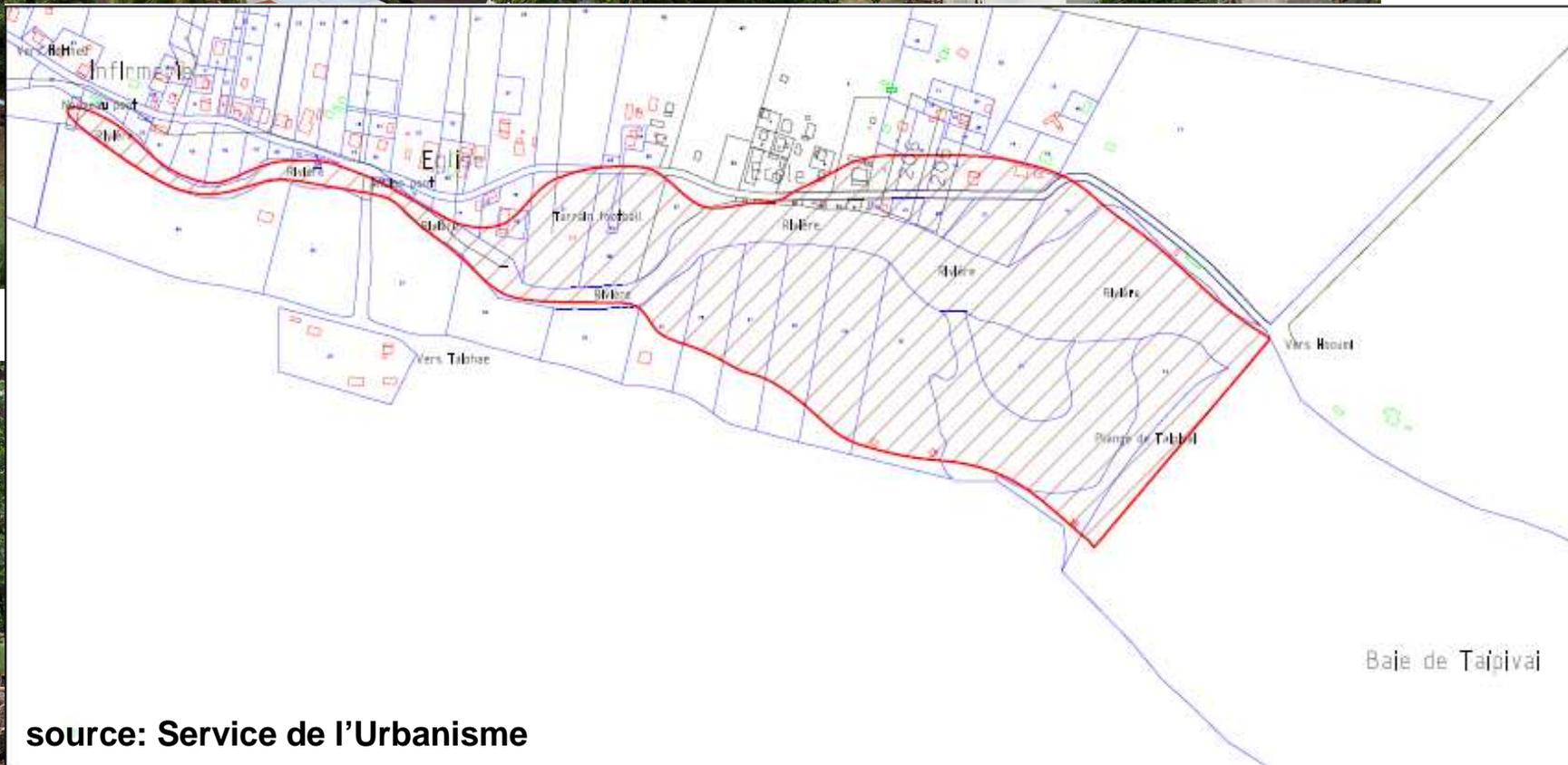
(Mori *et al.*, GRL, 2011)

Le tsunami sur les côtes japonaises

- Inondations à plusieurs kilomètres des côtes
- Détection de dégâts par l'imagerie satellitaire



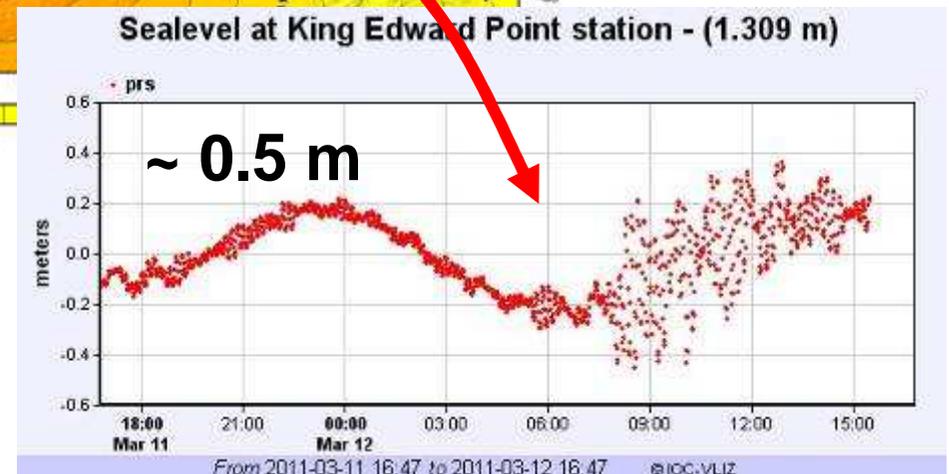
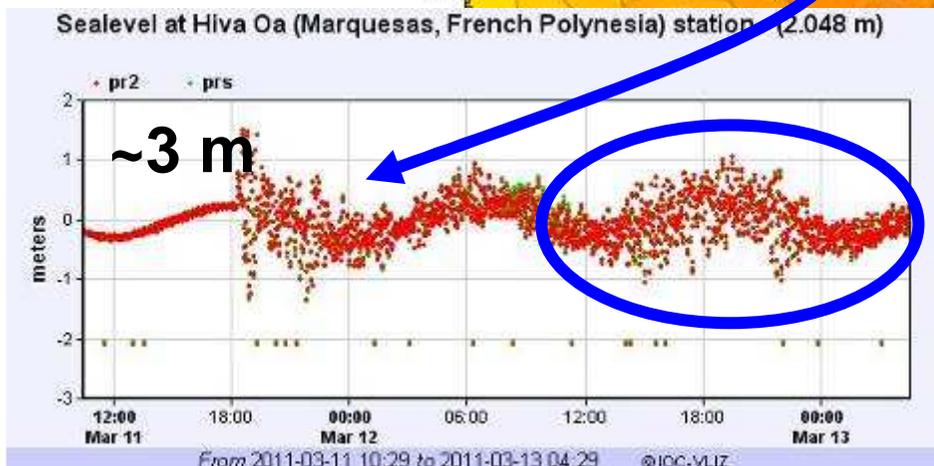
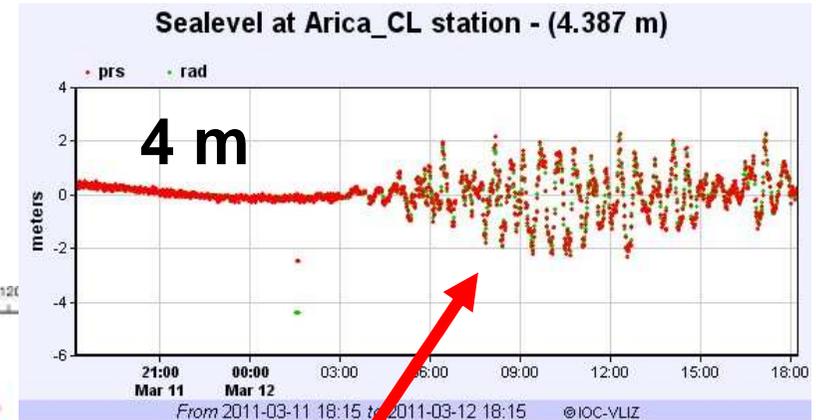
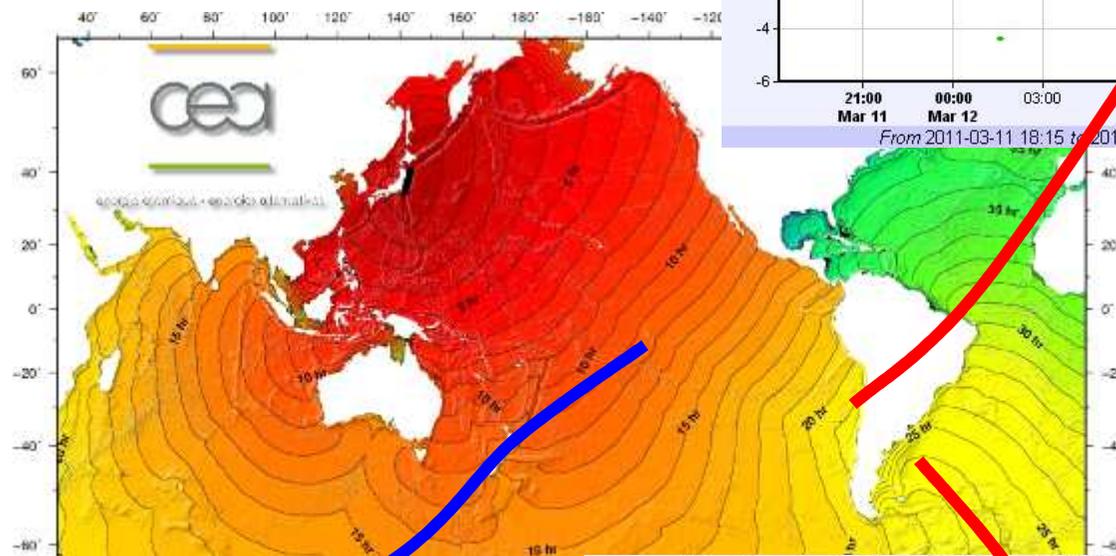
Effets aux Marquises



source: Service de l'Urbanisme

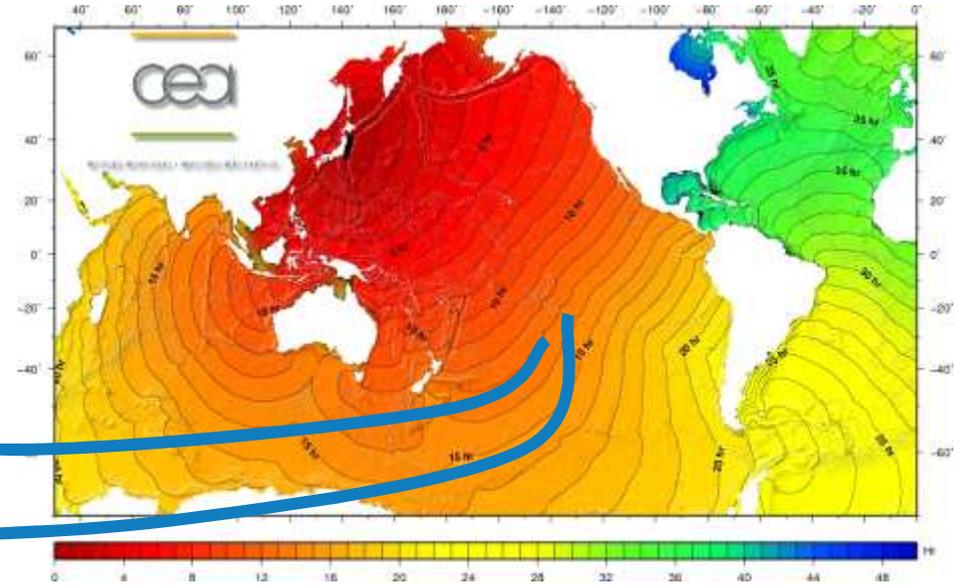
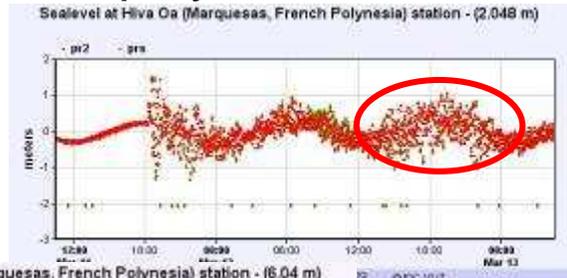


Tsunami trans-Pacifique



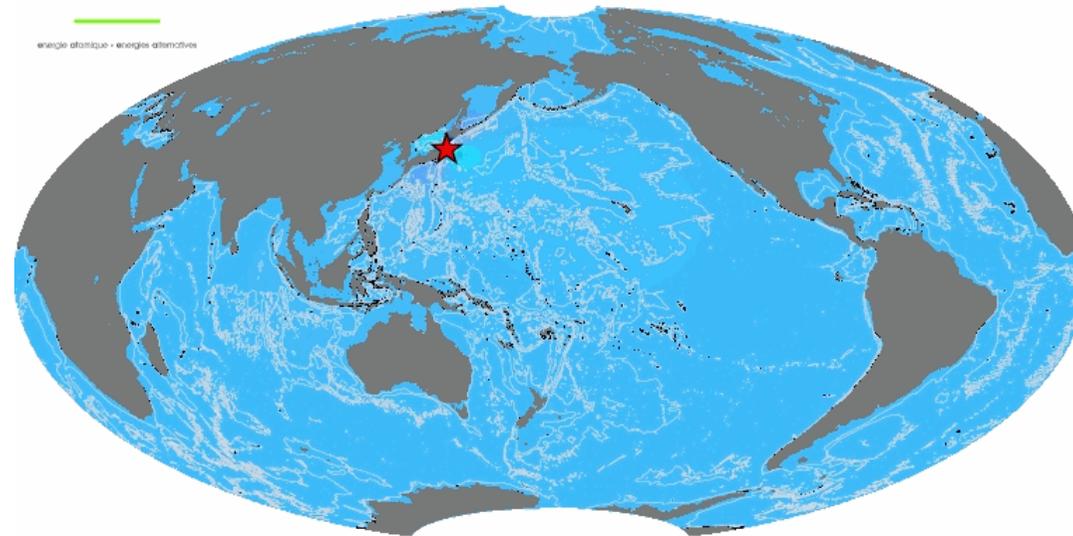
Exemples de réflexion

■ Marégrammes polynésiens



Honshu 2011

00 h 00 min



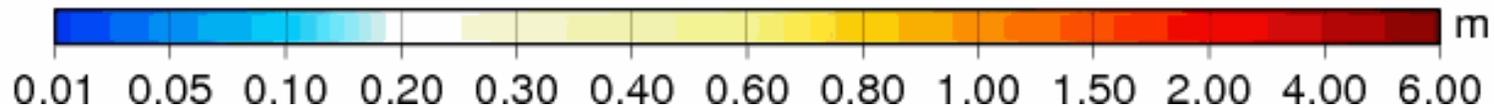
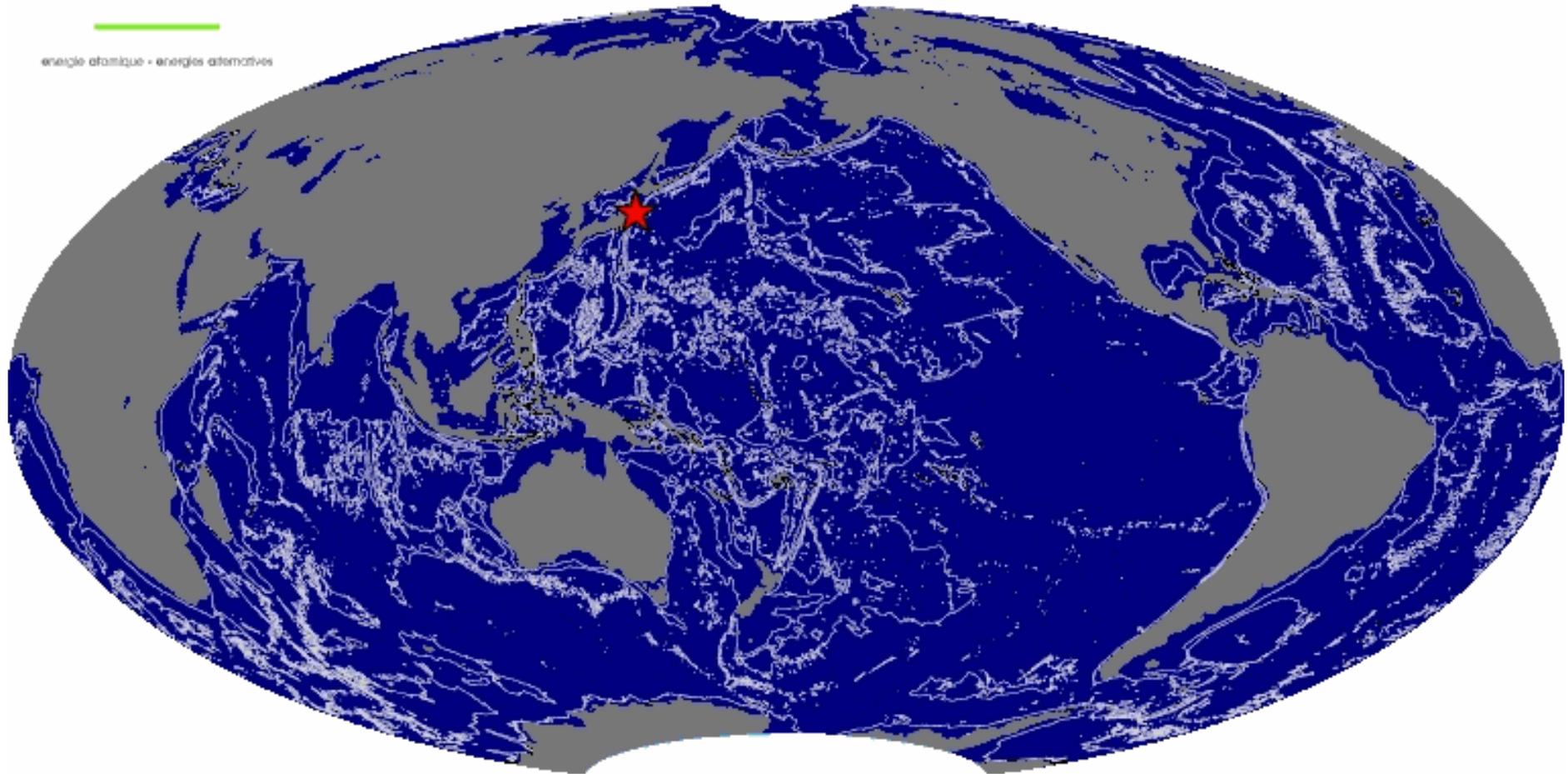
Une énergie maximale vers le sud-est Pacifique

Tohoku-oki 2011

00 h 00 min



énergie atomique - énergies alternatives



Modélisation des tsunamis

- Initiation par un séisme : dislocation élastique décrivant la rupture
 - déformation transmise *intégralement* et *instantanément* à la surface de l'eau
- Résolution des équations de Navier Stokes
 - approximation ondes longues $\lambda \gg h$
 - non dispersif $\omega^2 = gk \tanh(kh)$

✓ $c = \omega/k \sim \sqrt{gh}$



$$M_0 = \mu ULW$$

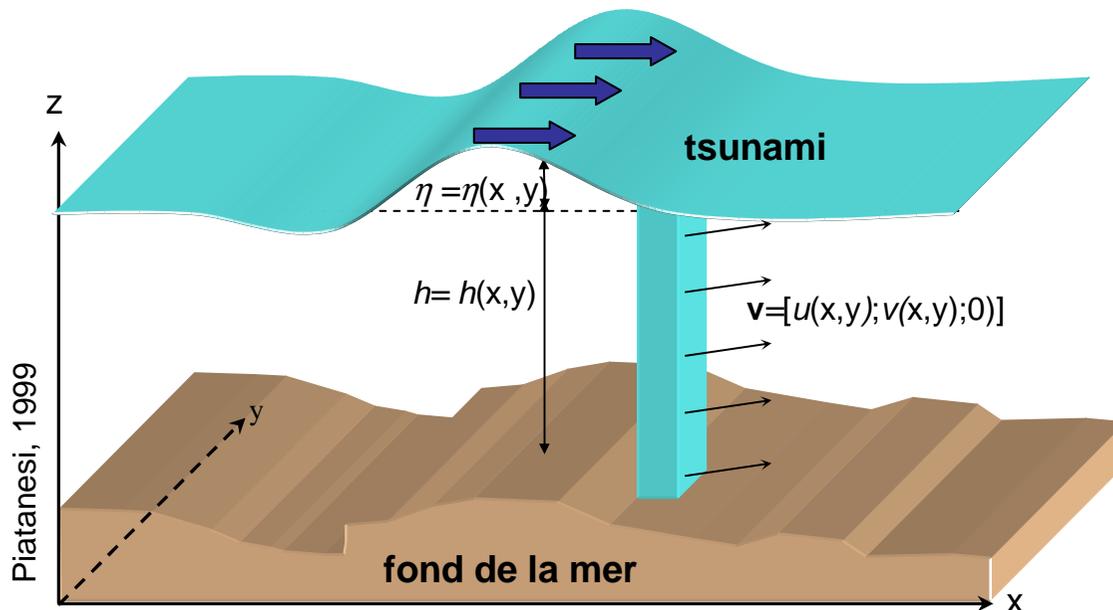
$$M_w = 2/3 \log(M_0) - 10.73$$

M_0 moment sismique

U déplacement

μ rigidité

L (W) longueur (largeur) de la faille



$$\frac{\partial(\eta + h)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\eta + h)] = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\mathbf{g} \cdot \nabla \eta + \Sigma \mathbf{f}$$

\mathbf{g} gravité

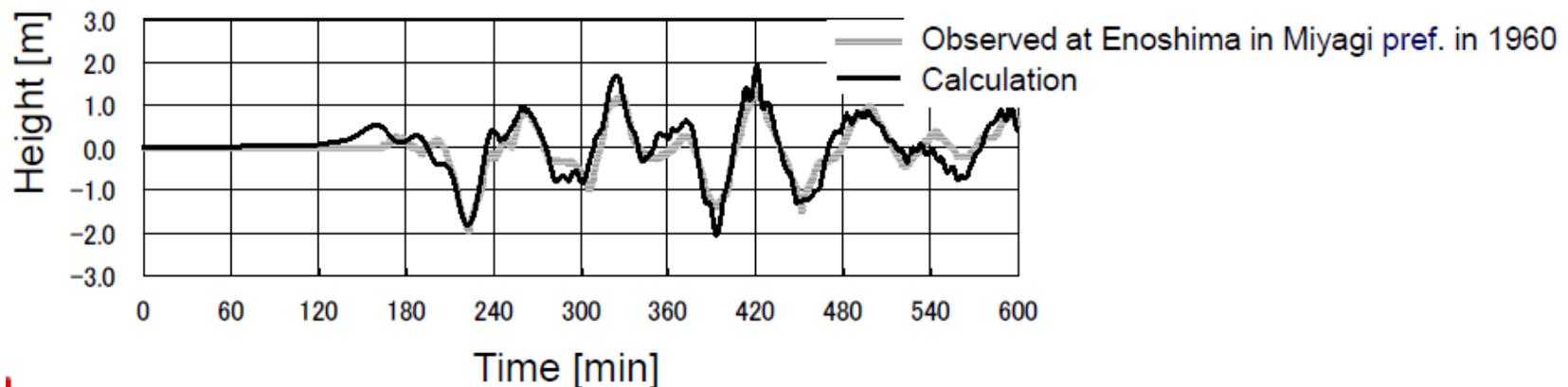
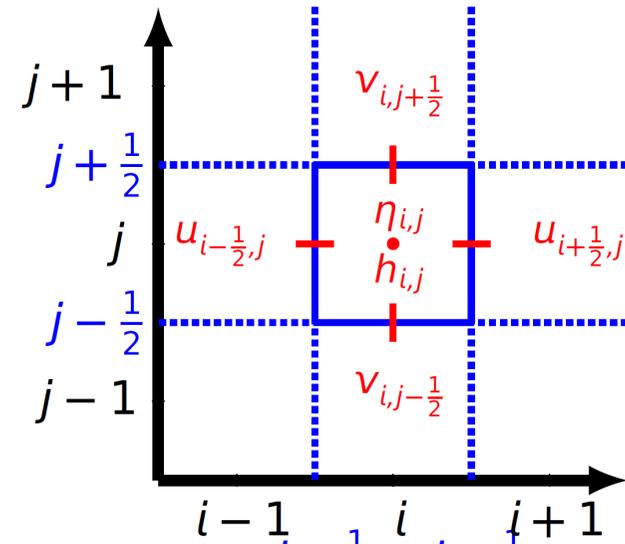
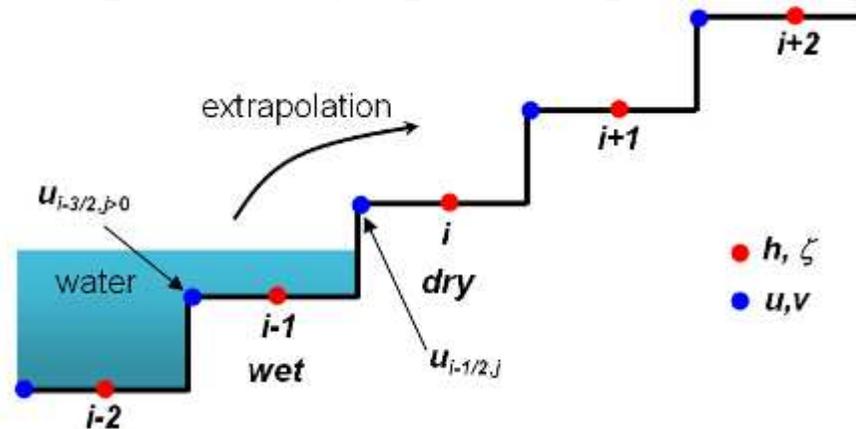
\mathbf{v} vitesse horizontale

η surface de l'eau

Méthode de résolution

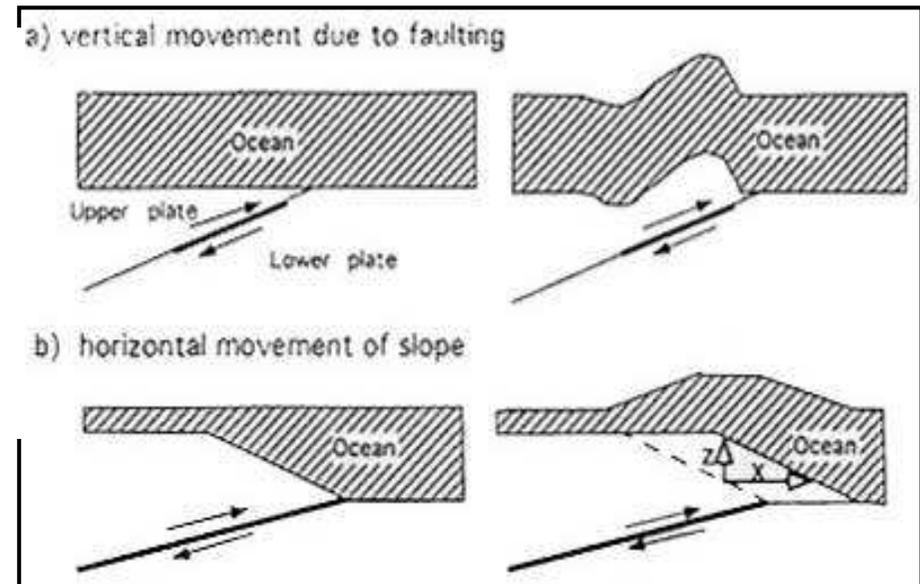
■ Résolution par différences finies

- adaptée des travaux de Mader (1988 : explicite, monogrid)
- introduction d'un schéma de Crank Nicolson + calcul des inondations à terre (run-up)
- multigrille : couplage entre grilles bathymétriques de résolution croissante



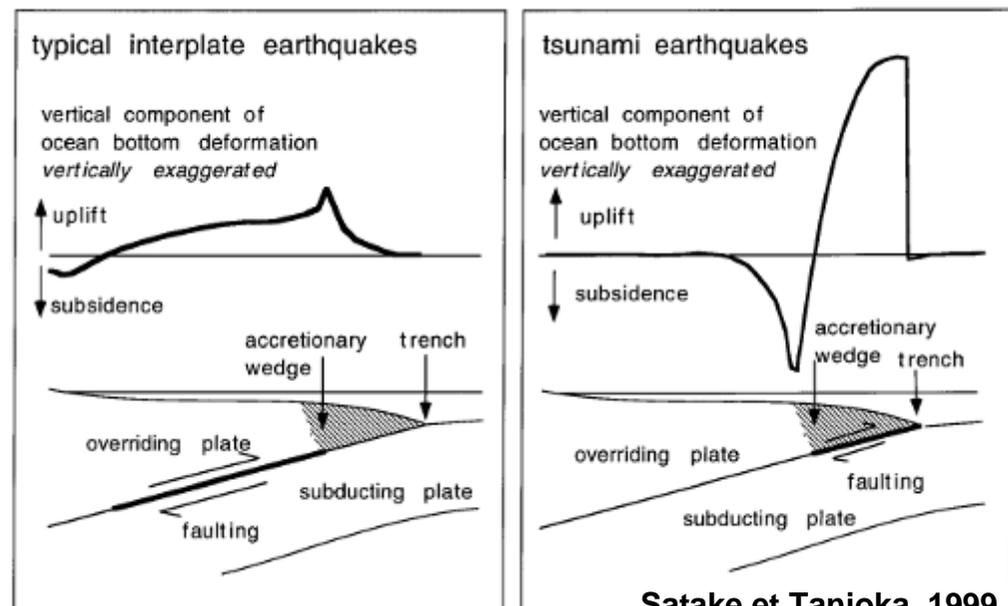
Rôle des mécanismes

- Un décrochement pur ne génère pas de forts tsunamis
 - la déformation cosismique est surtout confinée aux extrémités de la faille
 - prise en compte du mouvement horizontal des reliefs



Tanioka et Satake, 1996

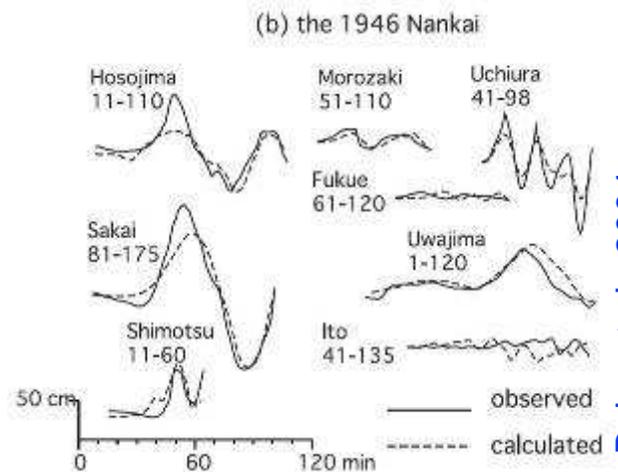
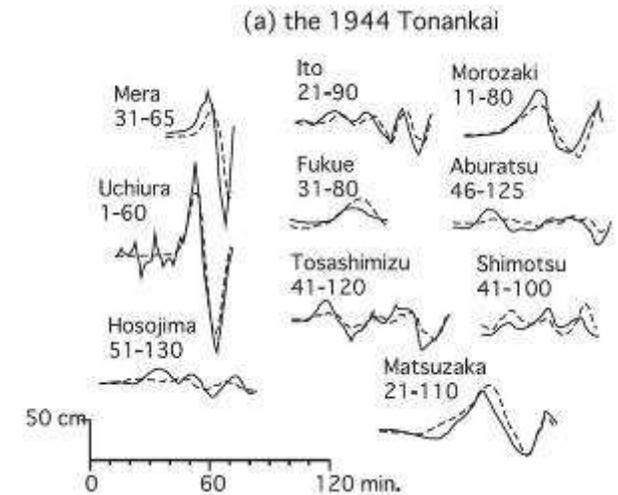
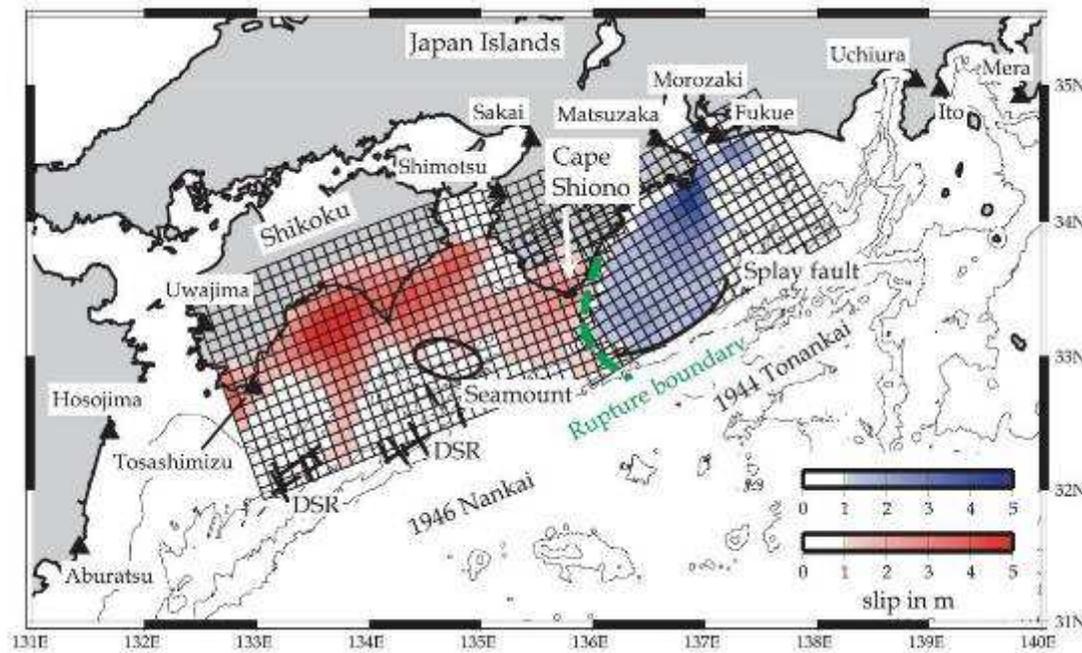
- La rigidité des matériaux en jeu peut influencer
 - déformation dans le prisme ?
 - *tsunami earthquake* : tsunami très supérieur à ce qui peut être attendu pour le niveau de magnitude



Satake et Tanioka, 1999

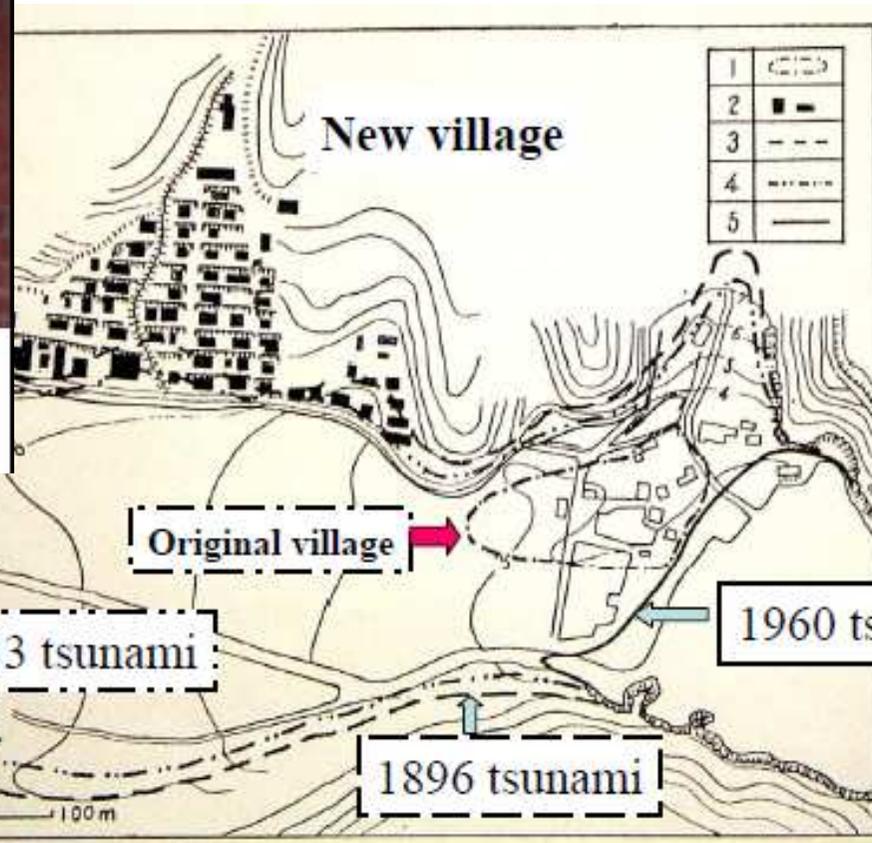
Inversion des données tsunami

- Japon : marégrammes historiques
 - distribution de glissements
 - connaissances des processus de subduction



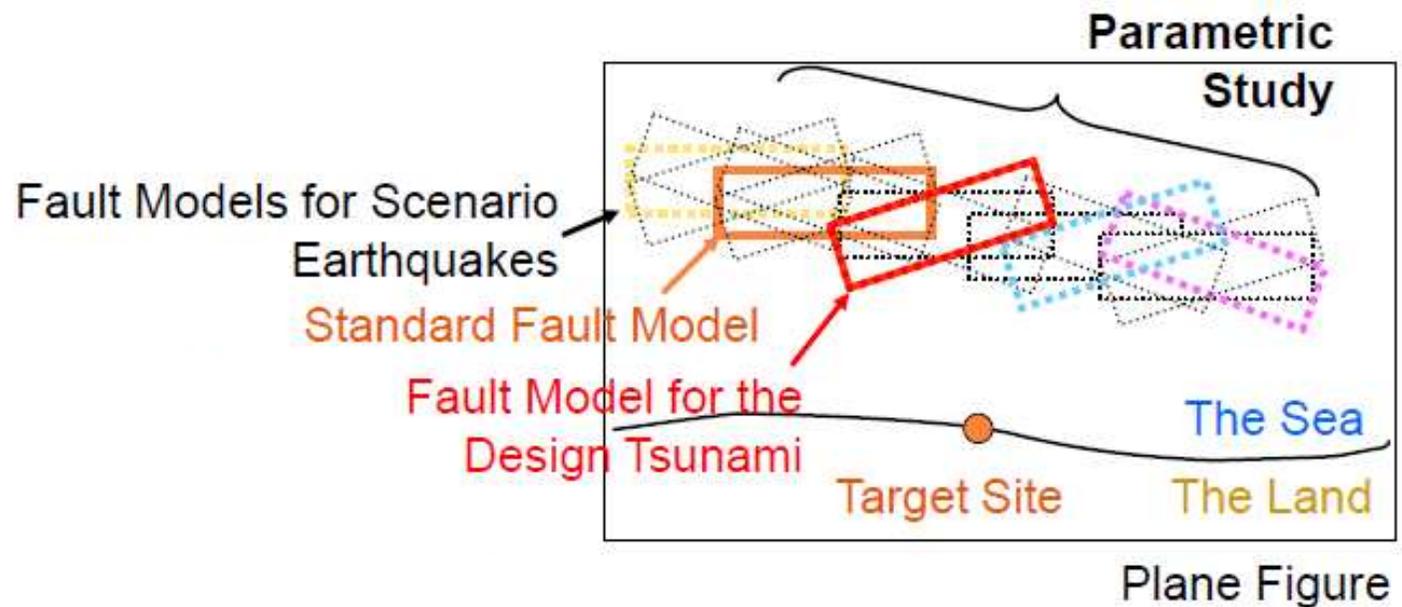
Aménagement du territoire

- Education des populations (résidents et touristes) au risque
 - sans catastrophisme



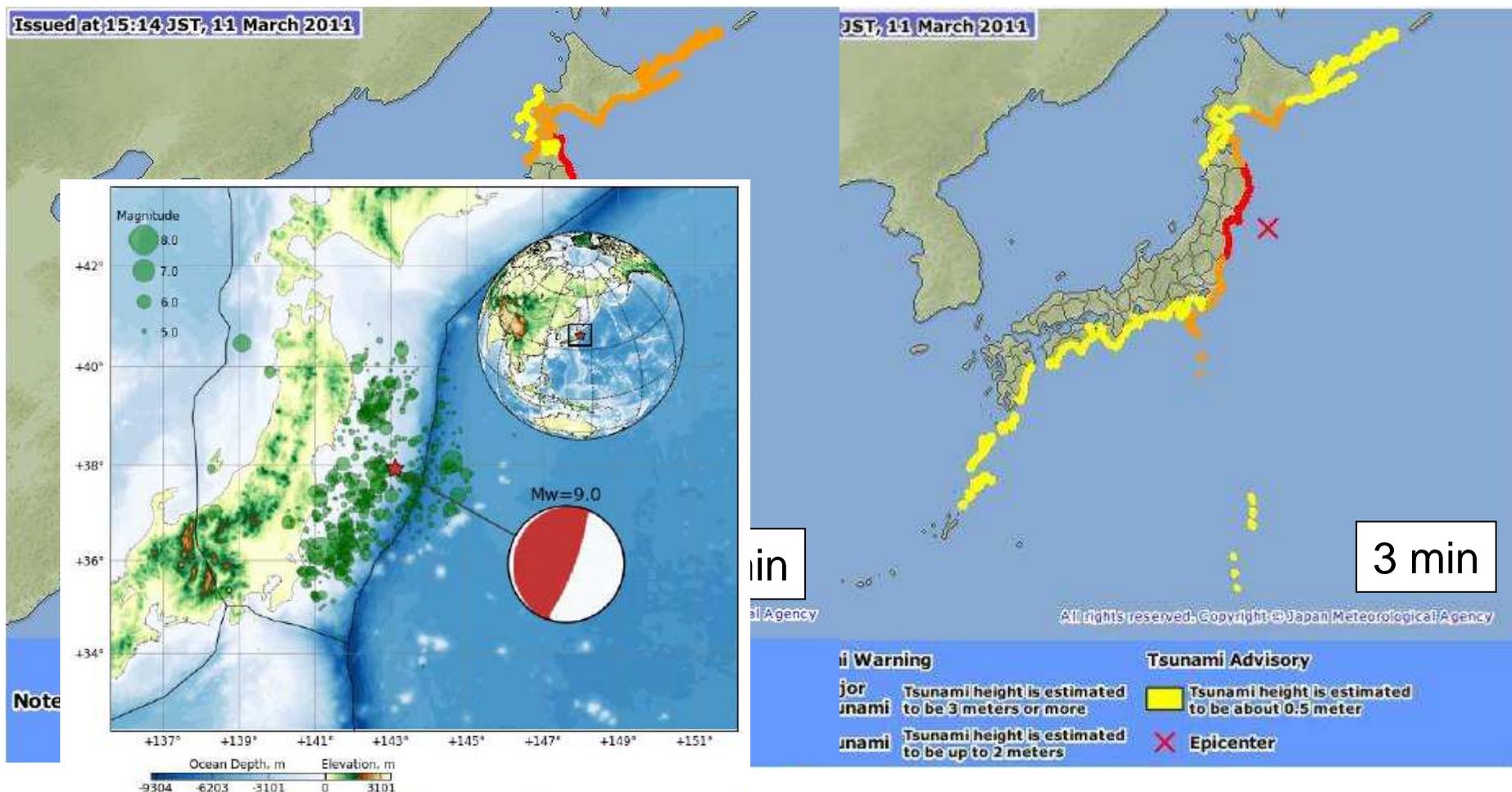
Fukushima

- Dimensionnement dans les années 1960
 - Peu après le grand tsunami de mai 1960, très marquant
 - Etudes paramétriques très complètes
 - ➔ mais magnitude limitée



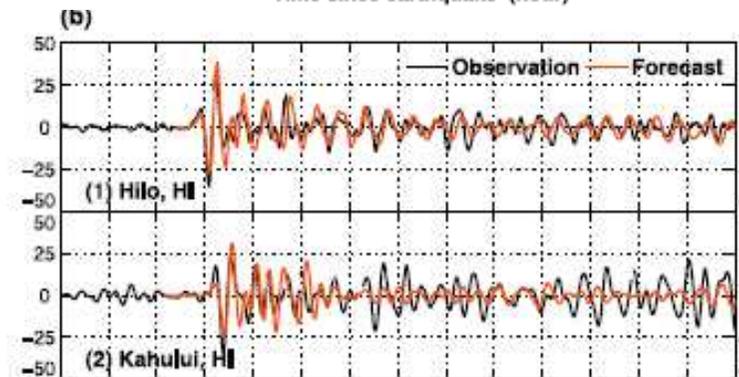
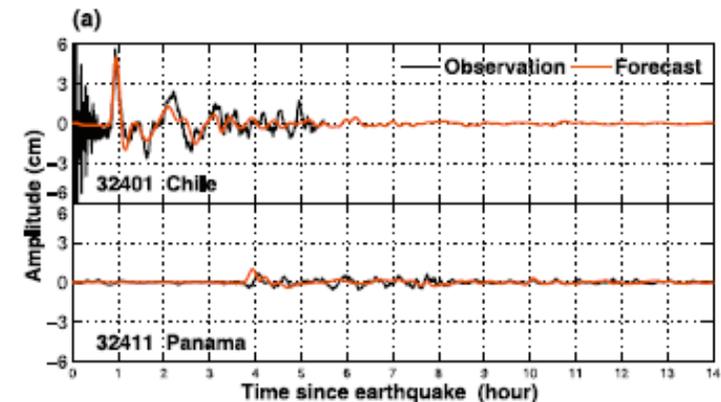
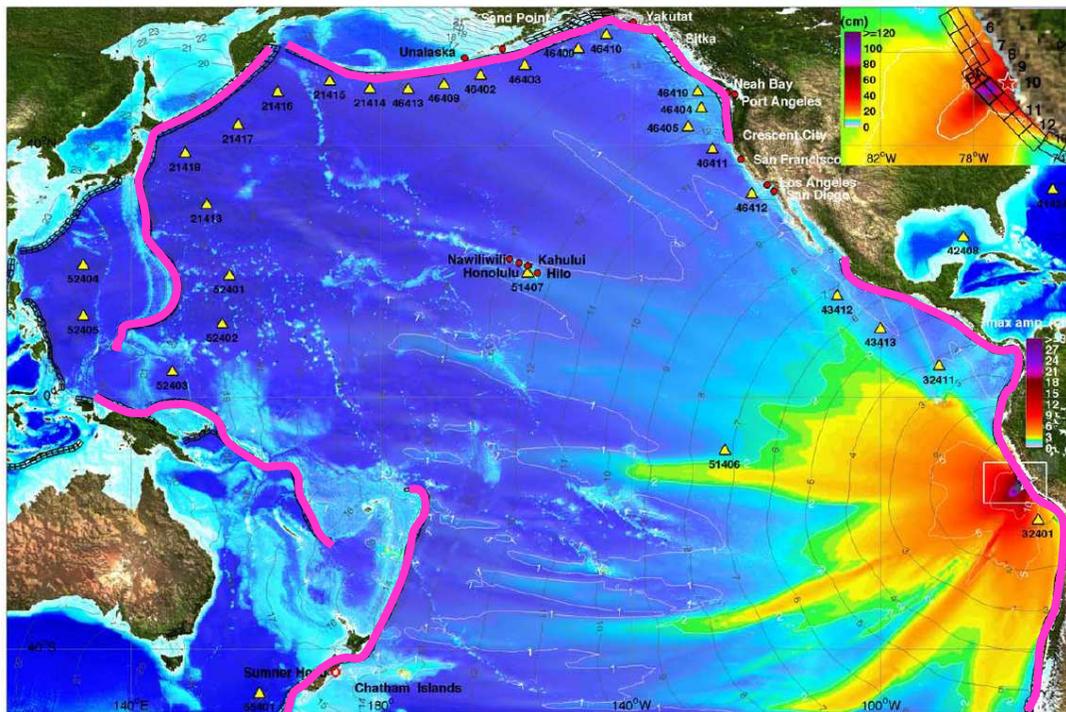
Un tsunami en direct

- Le système d'alerte fonctionne depuis les années 1940 au Japon
 - alerte émise en moins de 4 minutes
 - → magnitude sous-estimée à 7.9 (M_{JMA} sur les ondes P + saturation)



Apport de la modélisation pour l'alerte

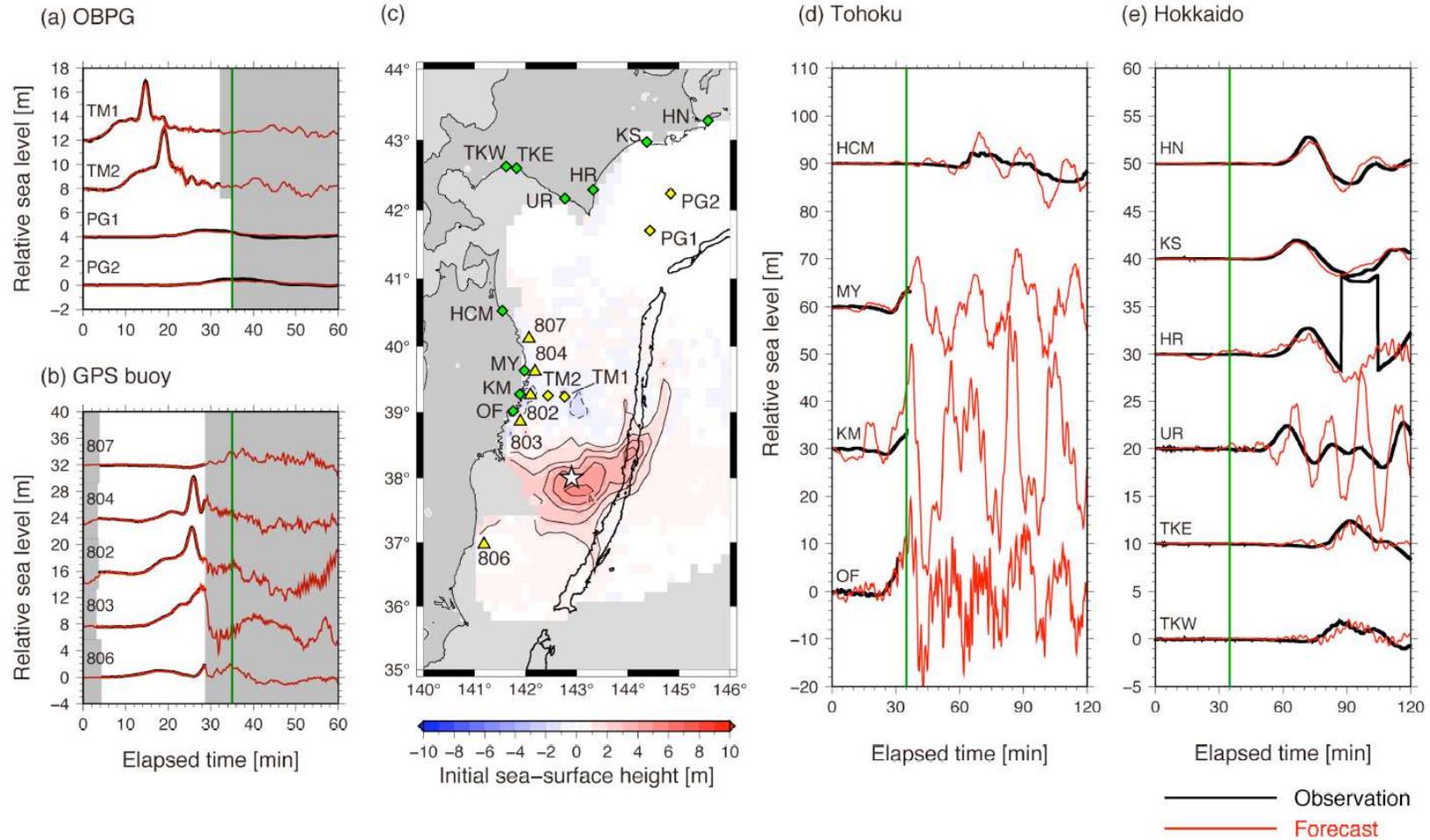
- Mise en place progressive dans le Pacifique (« forecast »)
- Principe : bases de données de scénarios pré-calculés
- En contexte d'alerte (ex. séisme et tsunami du Pérou, 15 août 2007)
 - exploitation des signaux DART
 - sélection des scénarios pertinents
 - extrapolation jusqu'aux baies et ports



(Wei *et al.*, GRL, 2008)

Vers la prévision des tsunamis

35 minutes after the earthquake



(Tsushima *et al.*, EPS, 2011)

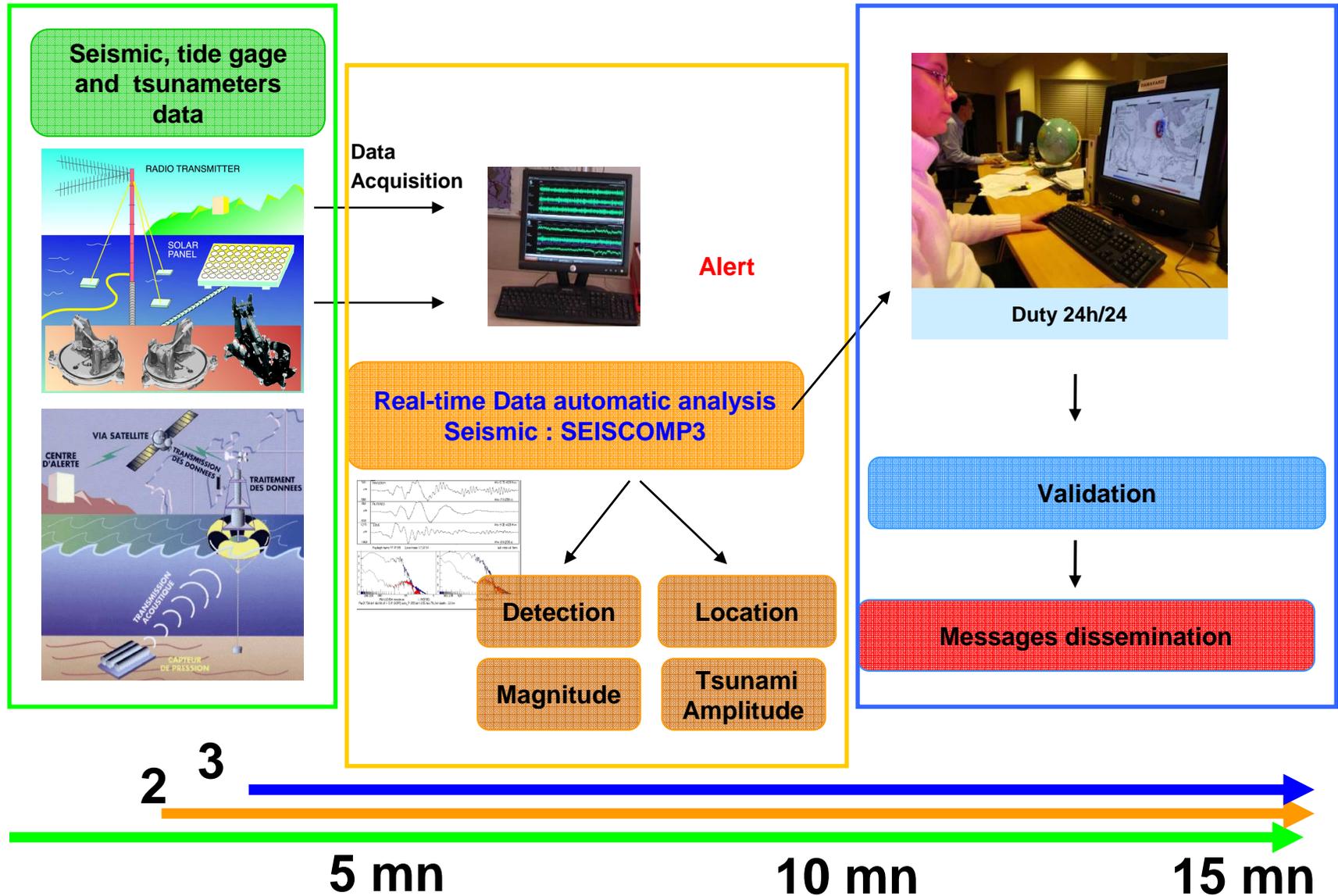
Le Centre National d'Alerte aux Tsunamis (CENALT)

- Opérationnel mi-2012 – Tsunamis d'origine sismique
- Partenariat CEA, SHOM, CNRS-INSU
- Les objectifs sont de :

- détecter le séisme
- surveiller le niveau de la mer
- émettre des messages d'alerte



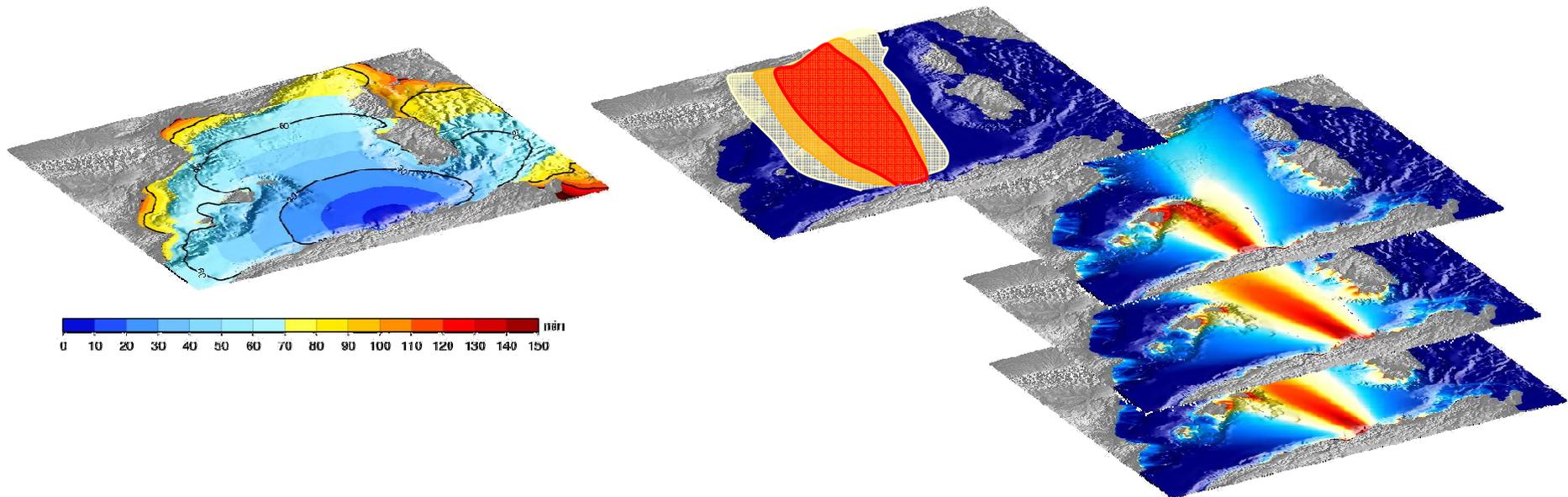
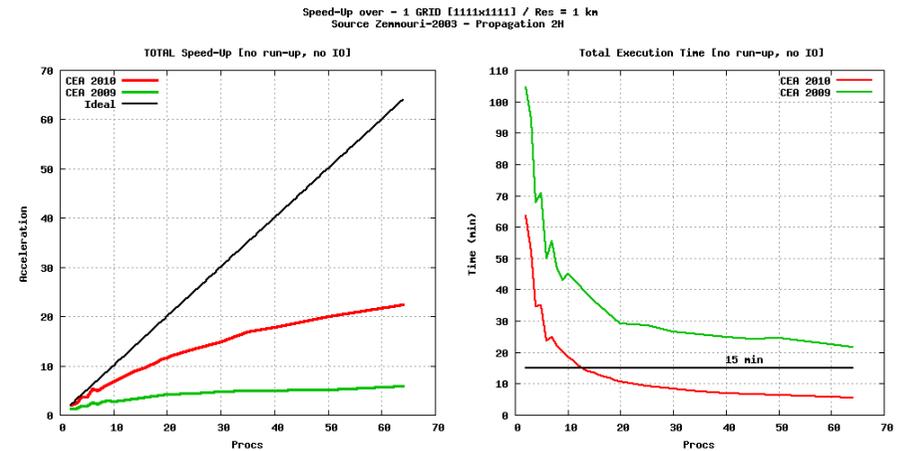
Centre national d'alerte aux tsunamis (CENALT)



Perspectives sur les outils opérationnels

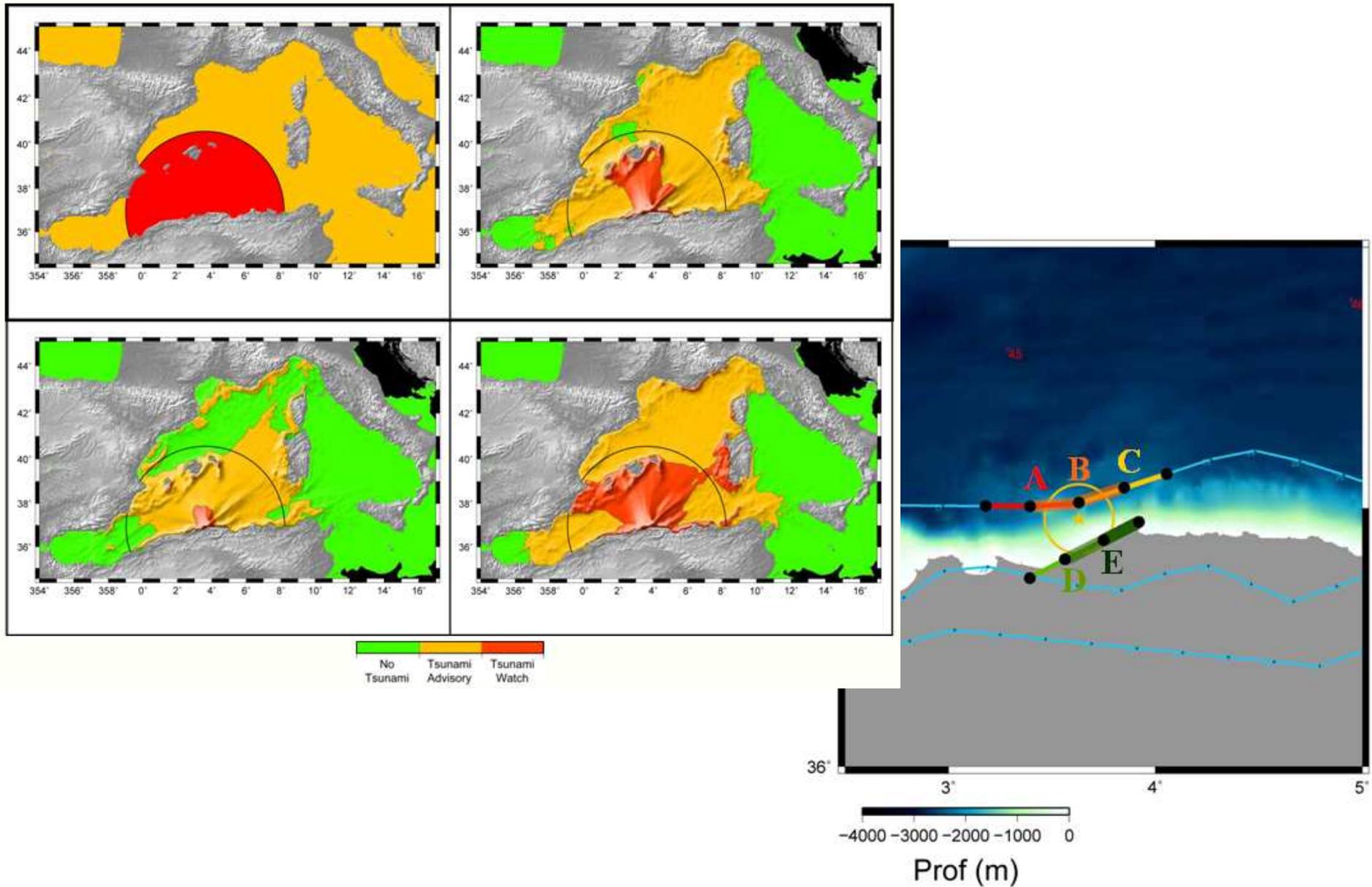
- Intégration de différents modules dans un code parallélisé
 - multiplication des études paramétriques

- Perspective opérationnelle
 - construction des scénarios pré-calculés interrogés lors d'une alerte



Agrégation linéaire de scénarios pré-calculés

■ Estimation des effets au large



Quelques éléments de réflexion

- Modèles à utiliser à bon escient
 - Le recul historique et la connaissance sismotectonique en sont le moteur

- Les modèles prennent une part croissante dans la décision en contexte d'alerte
 - La connaissance de la magnitude dans les premières minutes est déterminante

- Education des populations