

# Comprendre, prédire, prévenir les tsunamis

cea

Energie atomique - Energies alternatives



23<sup>e</sup> Journées  
scientifiques de  
l'environnement

1<sup>er</sup> février 2012

Crétail



**François Beauducel**

*Institut de Physique du Globe de Paris*

**Hélène Hébert**

*C.E.A.*

# Définitions

## Termes scientifiques

Tsunami

(mot japonais signifiant  
« vague du port »)

Séisme

(du grec seismos signifiant  
« secousse »)

↳ Décrit le phénomène sans aucune distinction d'origine, d'ampleur ou d'effets

## Termes grand public

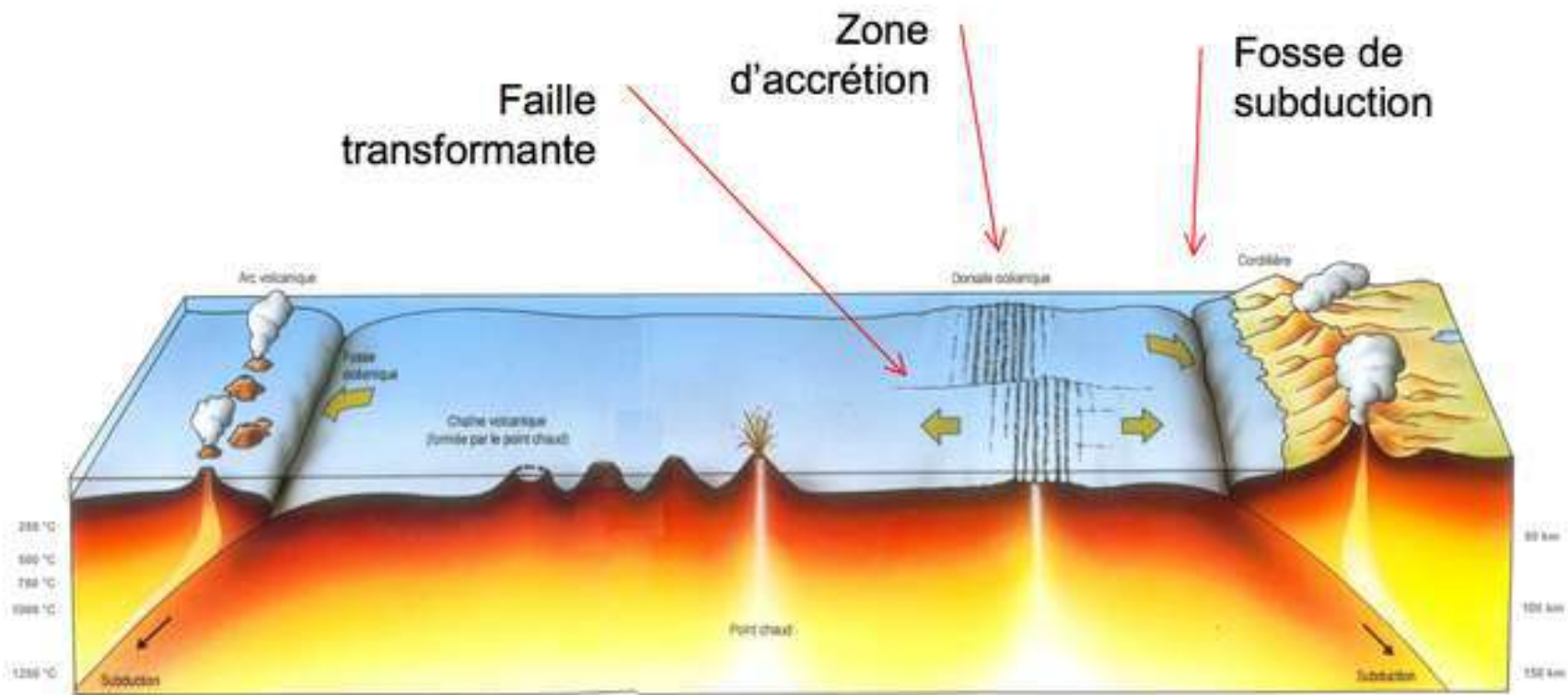
« raz-de-marée »

« tremblement de terre »

↳ Notion subjective d'effets importants sur l'homme (ressenti / dégâts)

# Dans les océans..

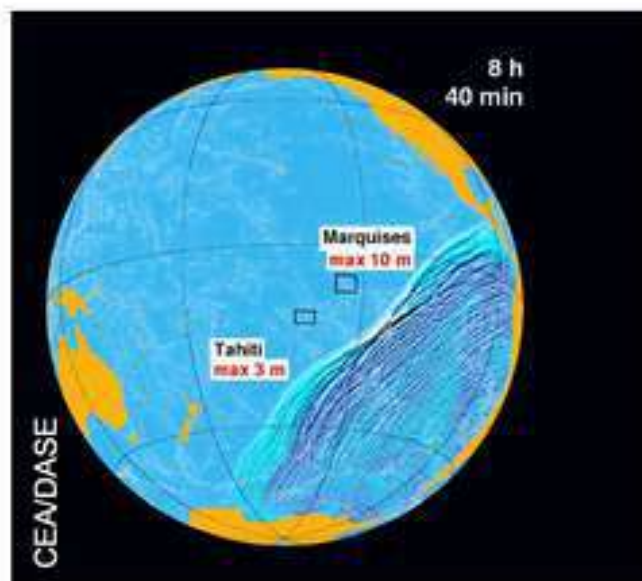
- Expansion des fonds océaniques
  - "tapis roulant", vitesse de 1 à 11 cm /an





# Les tsunamis majeurs sont dus aux séismes

- Dans les zones de subduction
  - où se produisent les plus forts séismes
- Les plus grands séismes génèrent des tsunamis **transocéaniques** :
  - dégâts sur des rivages très éloignés (Chili 1960, Sumatra 2004)



- D'autres tsunamis sont générés par des effondrements, des glissements de terrain (source gravitaire)
  - les dimensions mises en jeu dans ce cas sont plus réduites
  - l'énergie se propage moins efficacement, moins loin
- Les seuls cas observés à grande distance sont dus à des explosions volcaniques cataclysmiques
  - Santorin (1600 av JC), Krakatoa (1883)

# Les différents types de tsunami



- Magnitude  $> 7$  à  $7.5$  : dimension source  $\sim 100$  à  $800$  km
  - périodes 15 à 40 minutes
  - se propagent loin avec encore de l'énergie
  - dégâts possibles à distance
  - système d'alerte s'appuyant sur la détection sismique
- Dimension source  $\sim 5-30$  km
  - périodes 5 à 20 minutes
  - propagation dispersive
  - hauteurs de vagues très importantes, mais localement
  - pas de système d'alerte

# Qu'est-ce qu'un tsunami ?

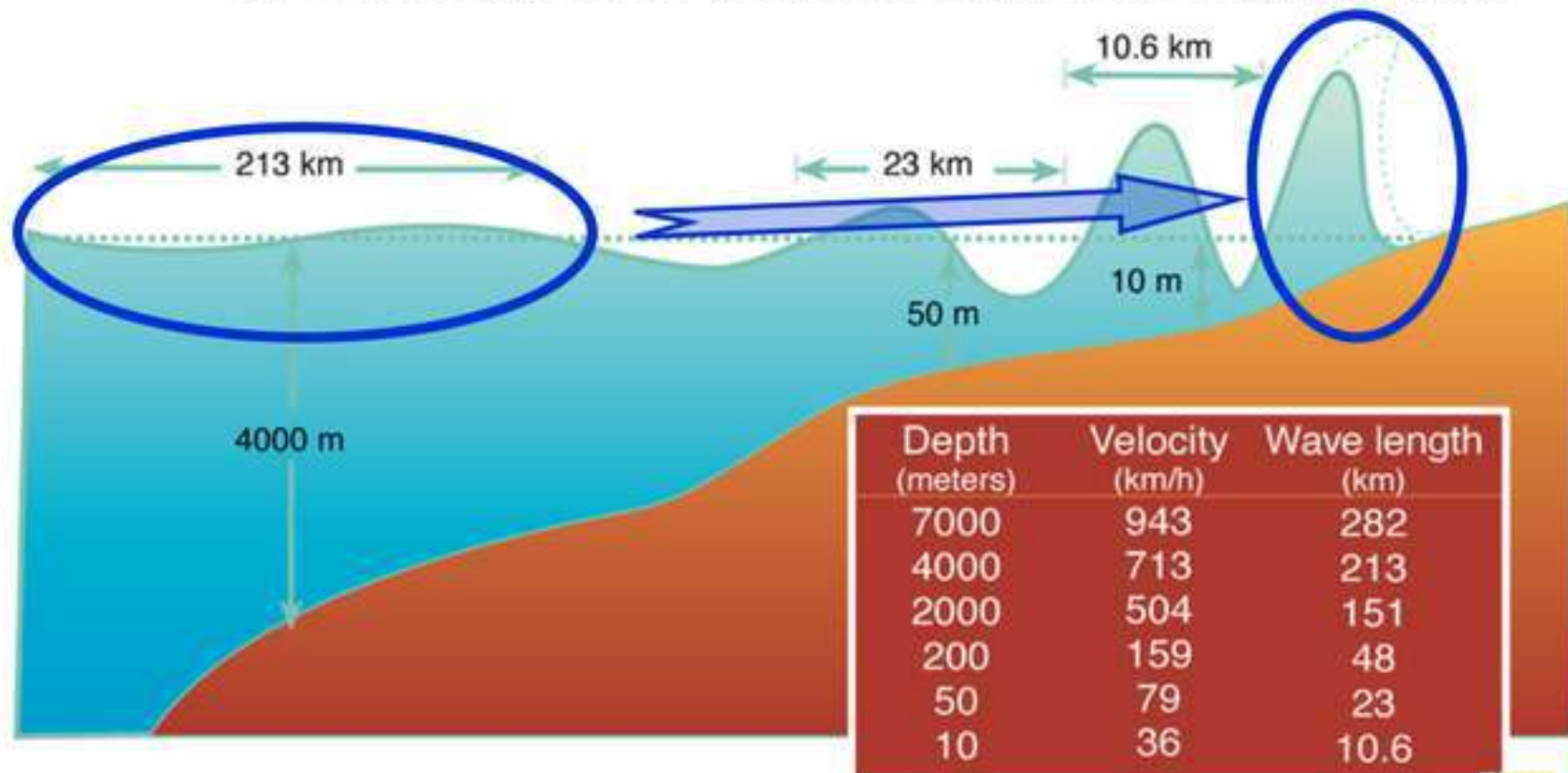


- Un fort séisme sous-marin
- Une déformation au fond de la mer
- L'océan n'est plus à l'équilibre
- Forces de gravité → propagation d'ondes
- Non ressenti sur un bateau au large :  $h \sim$  qqs dizaines de cm
- Vagues amplifiées à la côte, dans les ports



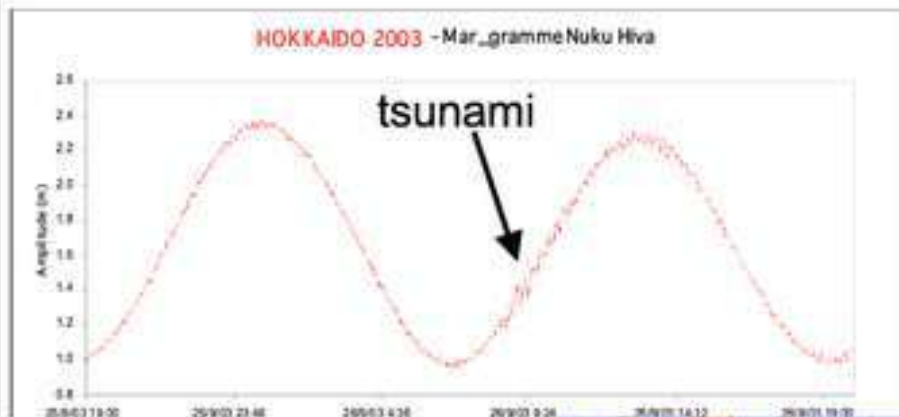
# Amplification près des côtes

- La célérité ne dépend que de  $h$
- Donc elle diminue près des côtes
- La conservation de l'énergie implique l'amplification

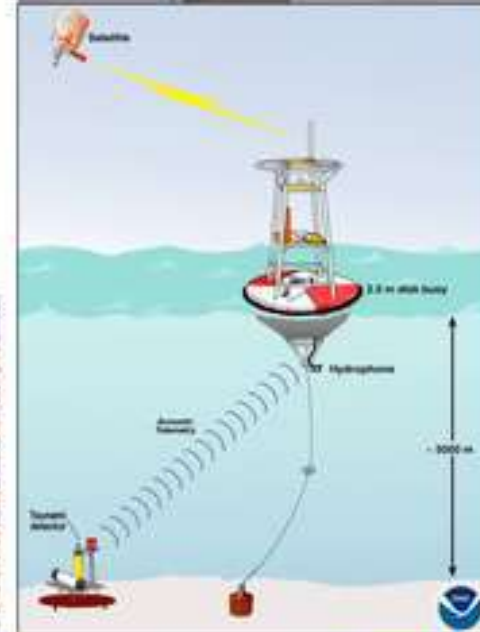


# Un tsunami est observé à la côte

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

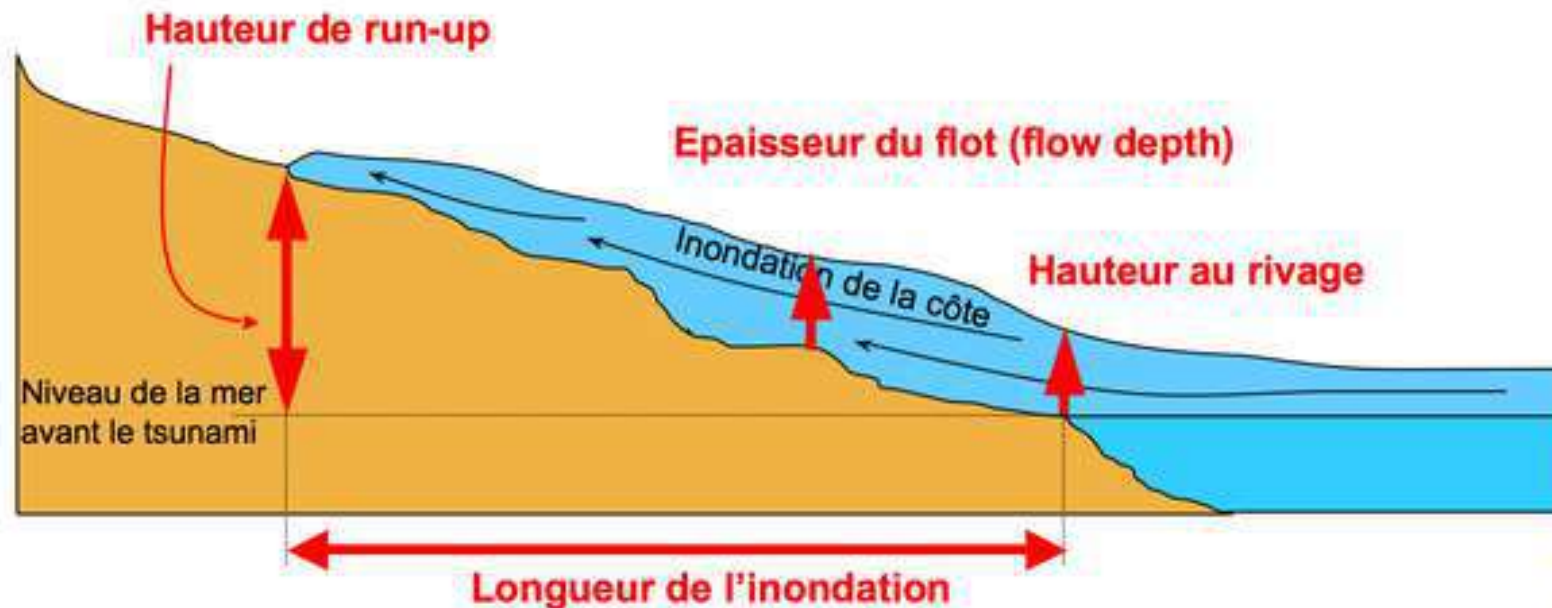


- Capteurs de pression au fond de la mer
- Bouées GPS

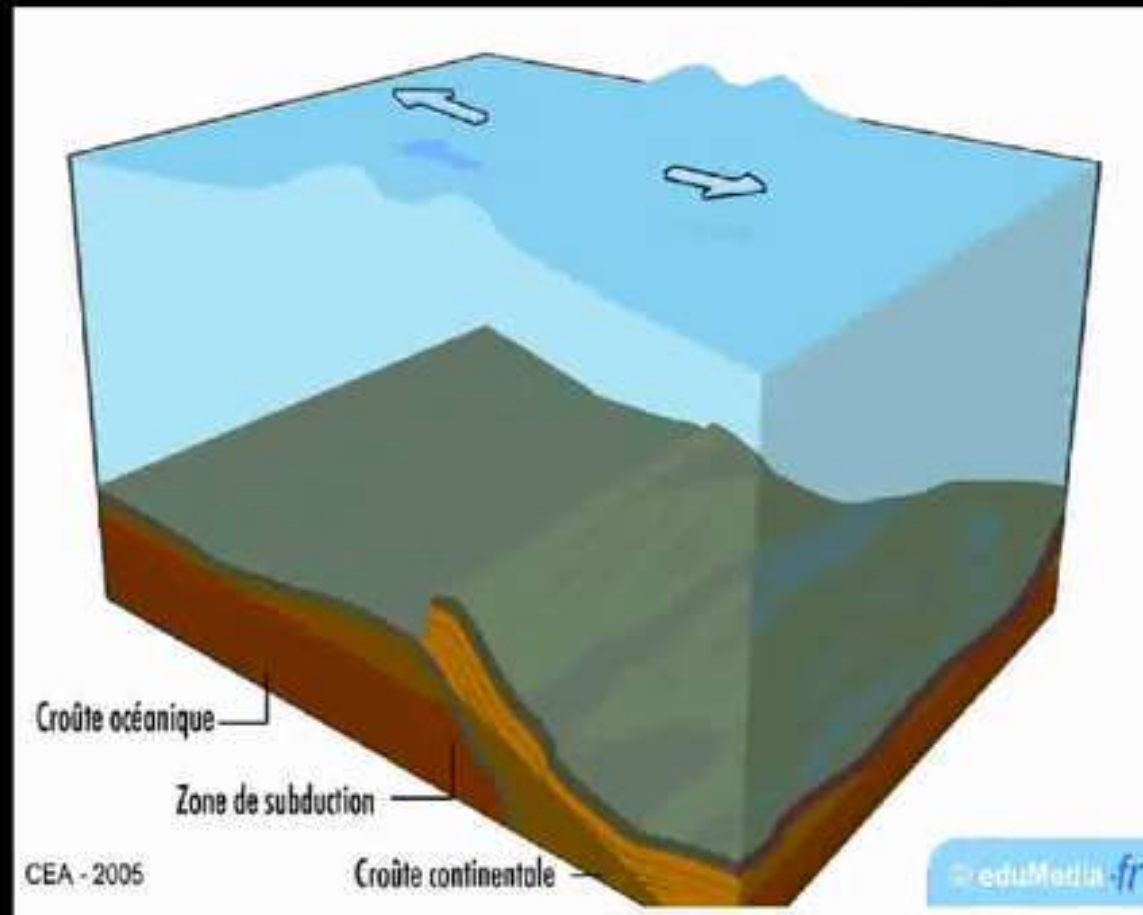




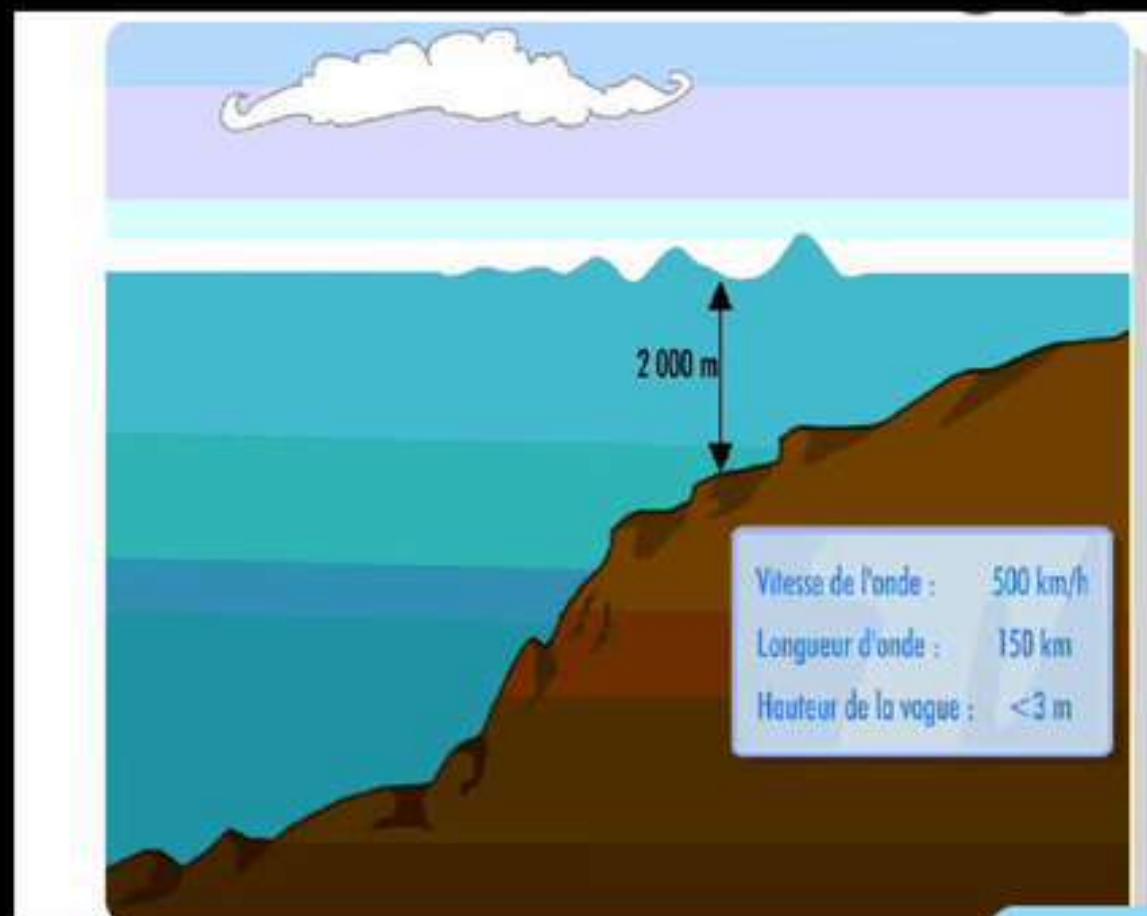
- Données d'amplitude ponctuelles :
  - longueur (pénétration) de l'inondation
  - épaisseur du flot (flow depth)
  - hauteur au rivage
  - run-up
- Surtout qualitatif
- Peu de contraintes temporelles



# Perturbation soudaine du fond sous-marin

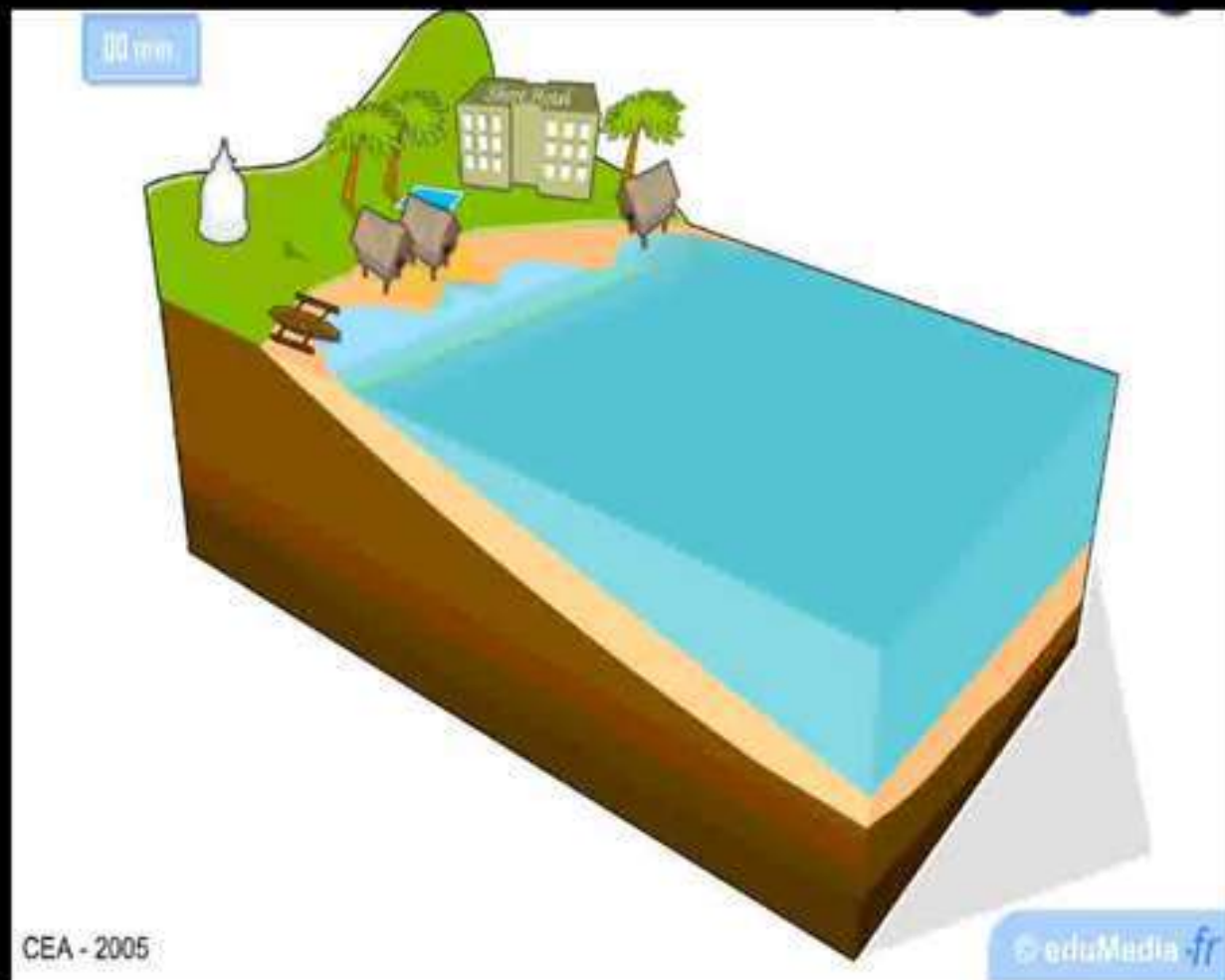


# La célérité décroît à l'approche des côtes

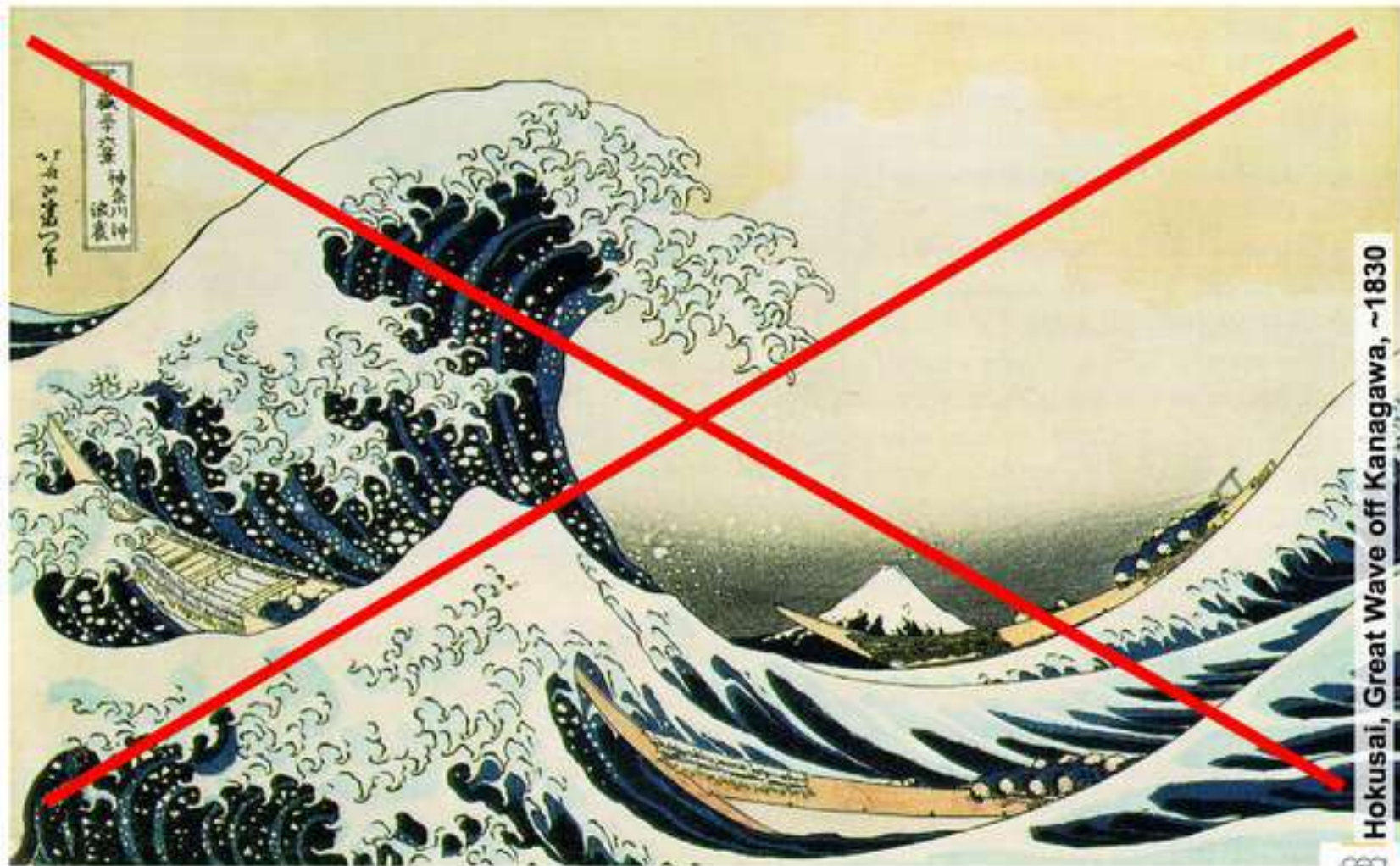




# Les plus forts tsunamis produisent des inondations et destructions sur la côte, durant plusieurs heures



# Qu'est-ce qui n'est pas un tsunami?





Tsunamis are often no taller than normal wind waves, but they are much more dangerous.

Wind waves come and go without flooding higher areas.



Tsunamis run quickly over the land as a wall of water.



Even a tsunami that looks small can be dangerous!

Any time you feel a large earthquake, or see a disturbance in the ocean that might be a tsunami, head to high ground or inland.

© University of Washington





## Exemple

**1957, séisme aux Aléoutiennes (N Pacific)  
→ effet à Hawaï**



source: NGDC

## Manzanillo (Mexique) 1995

- Magnitude  $M_w$  8.0
- Dimension source ~ 200 km
- Vagues
  - 10 m (Mexique)
  - 1 m (Marquises)
  - 4 cm (Australie)



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



Figure 1. View of the small town of Aonae, on the Iwojima Island, Japan, after the 1993 earthquake. Note the devastation wrought on the island by the earthquake and the rubble washed out in the harbour in the next-day photograph. (Courtesy of Y. Tsuji.)



Aonae fishing port



Kamiura fishing port





# La Polynésie française est exposée aux tsunamis surtout les îles Marquises



Taiohae Bay (Nuku Hiva island)

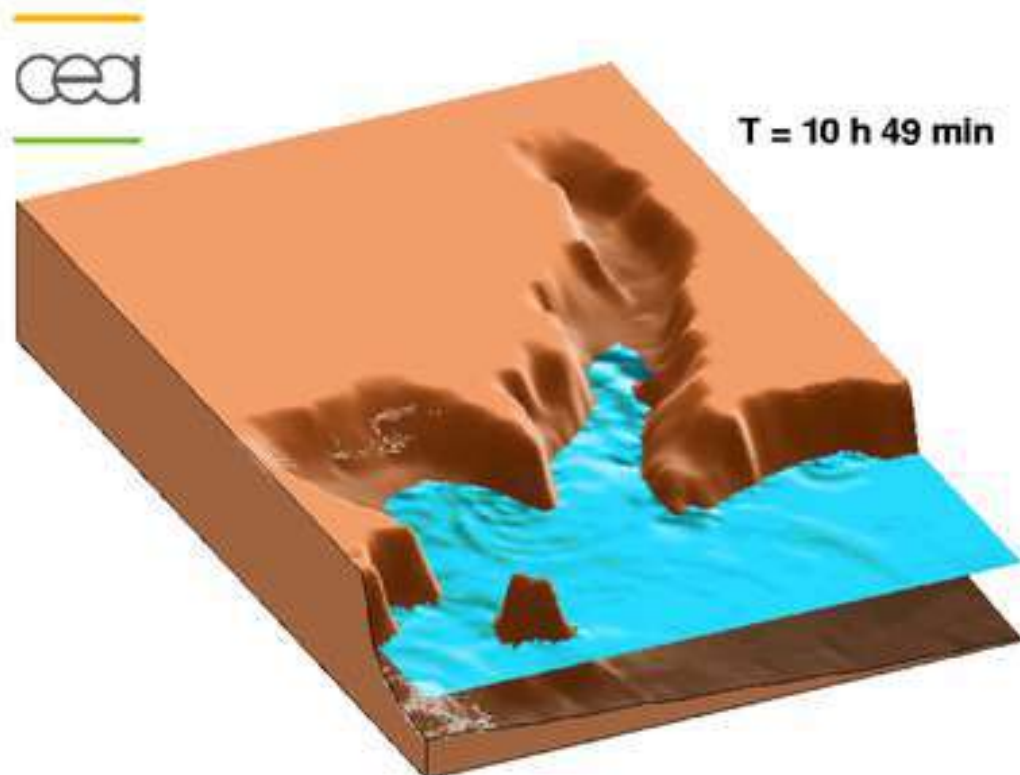
# Tsunami du 27 février 2010, suite au séisme du Chili (M8.8). Vu à Hiva Oa (Marquises)





## Les tsunamis peuvent être modélisés

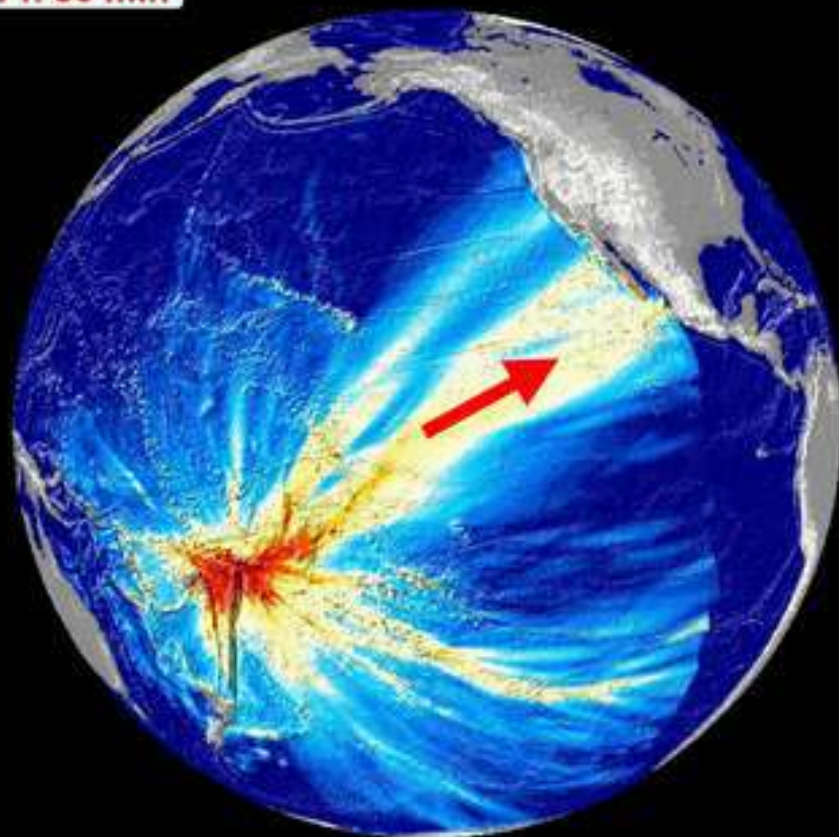
- Exemple d'un scénario de séisme au Chili
- Modèle dans la baie de Tahauku



# Tsunami des Samoa (29 Septembre 2009)

→ direction de l'énergie maximale

11 h 30 min



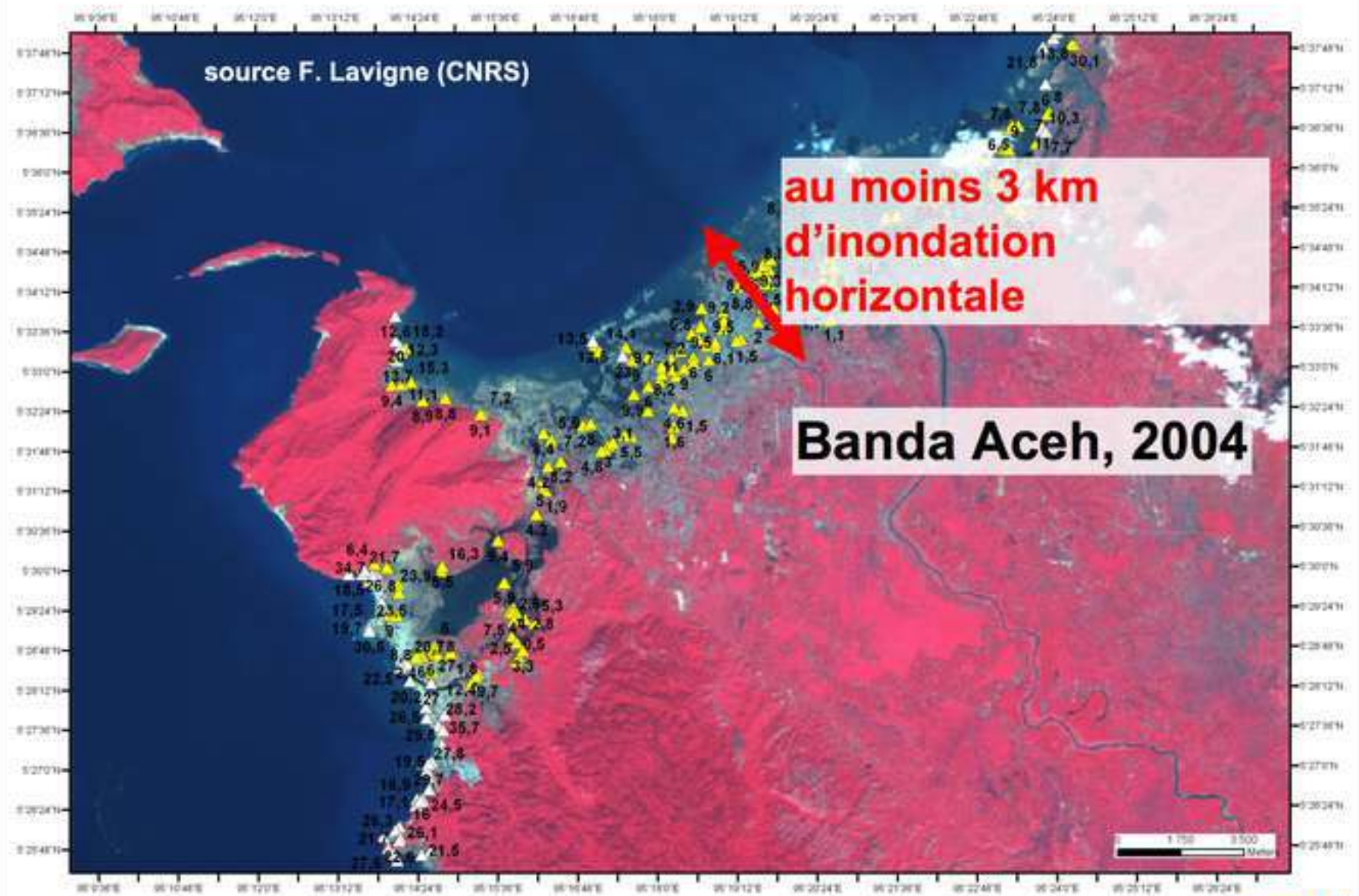
# Les plus grands tsunamis détruisent tout à la côte ce fut le cas en 2004 suite au séisme de Sumatra



source Raphaël Paris (CNRS)









# Observations locales



région de Banda Aceh - clichés JC Borrero - USC



Hélène Hébert CEA

Photo prise  
à 3 km  
de la côte

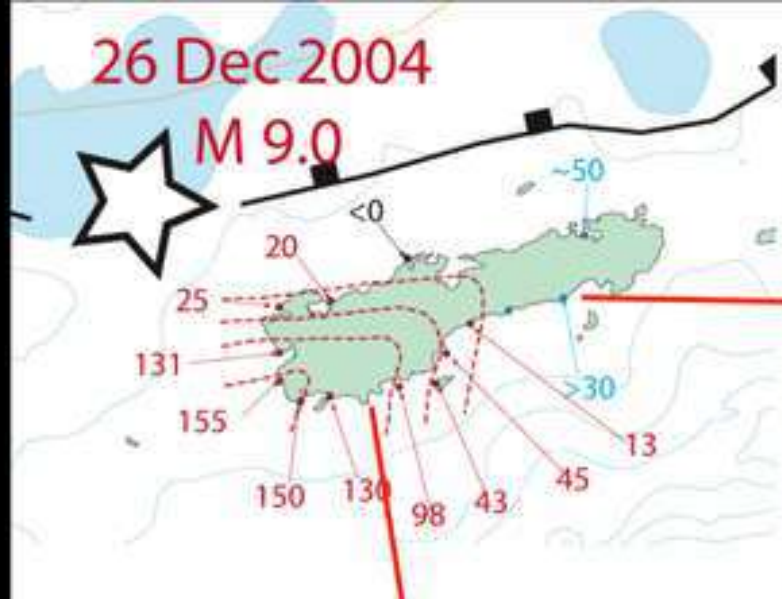


Hélène Hébert CEA



26 Dec 2004

M 9.0



L'île de Simuelue  
a été basculée:  
sa côte sud émerge  
de près de 2m  
et le nord s'est enfoncé  
d'un mètre





155 cm





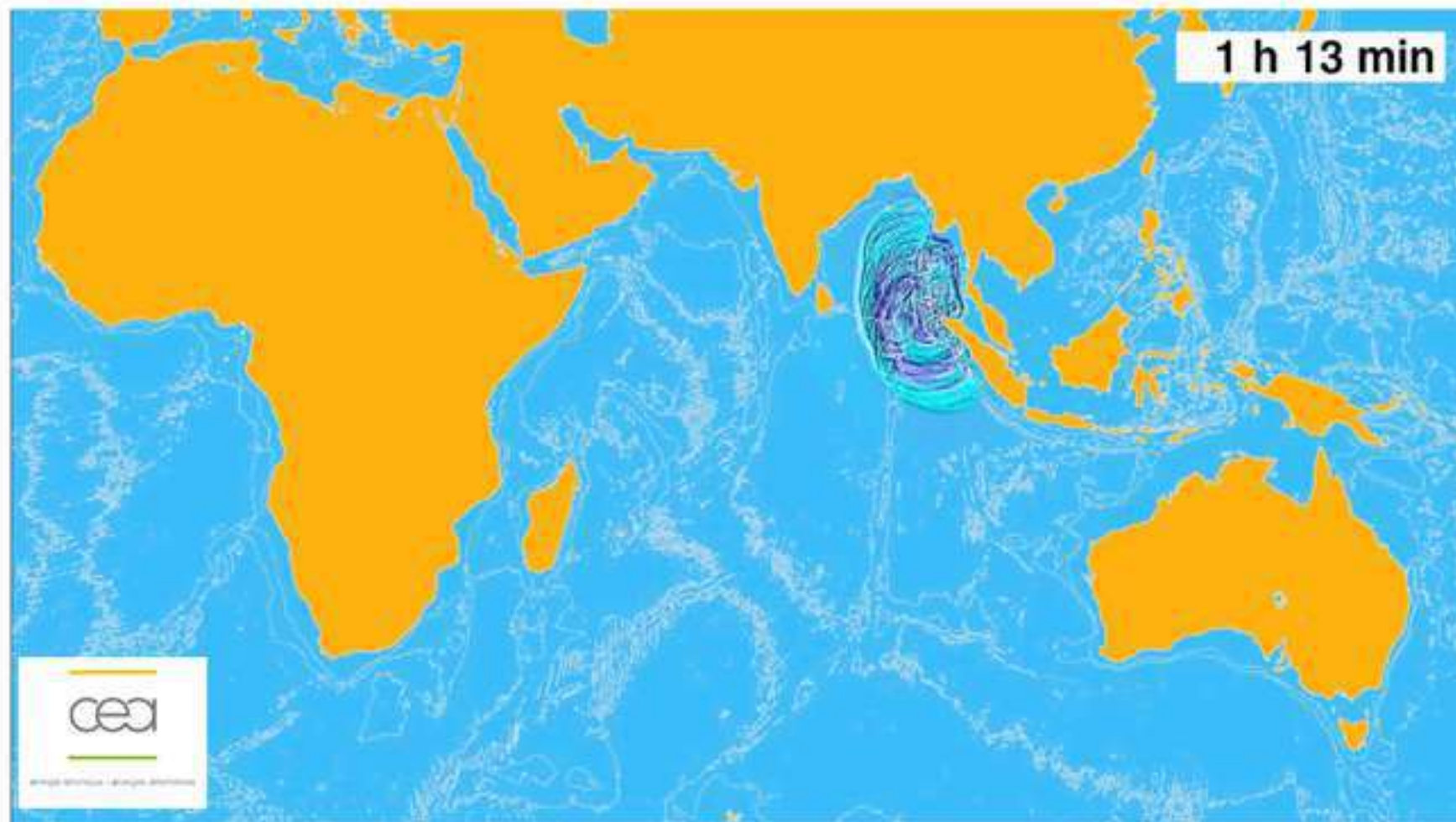
Banda Aceh avant  
et après le passage  
du tsunami  
(une submergence  
en partie  
permanente)





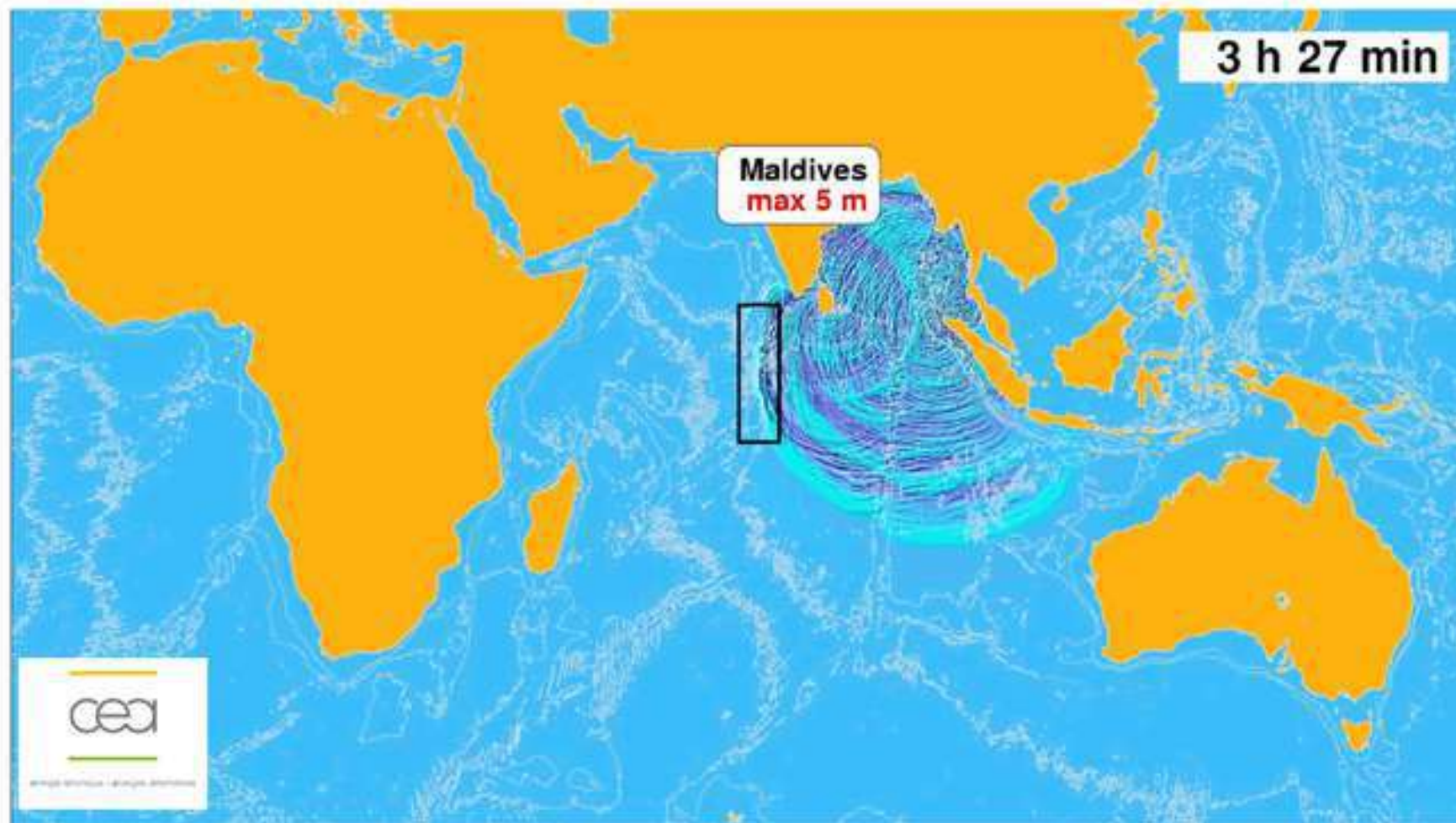
# Indian Ocean, 26 December 2004

## Séisme de magnitude $M_w$ 9.2



# Indian Ocean, 26 December 2004

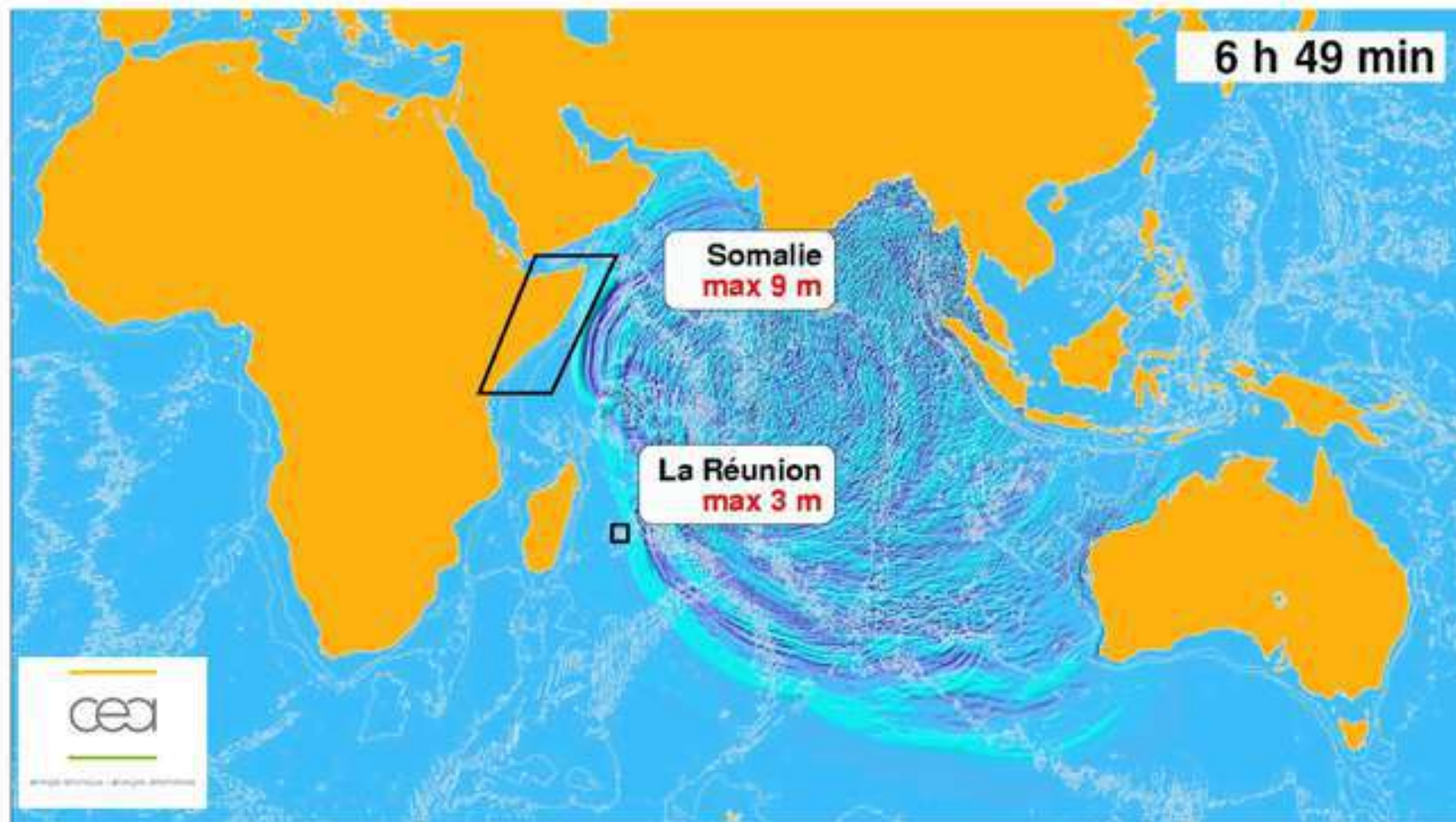
## Séisme de magnitude $M_w$ 9.2





# Indian Ocean, 26 December 2004

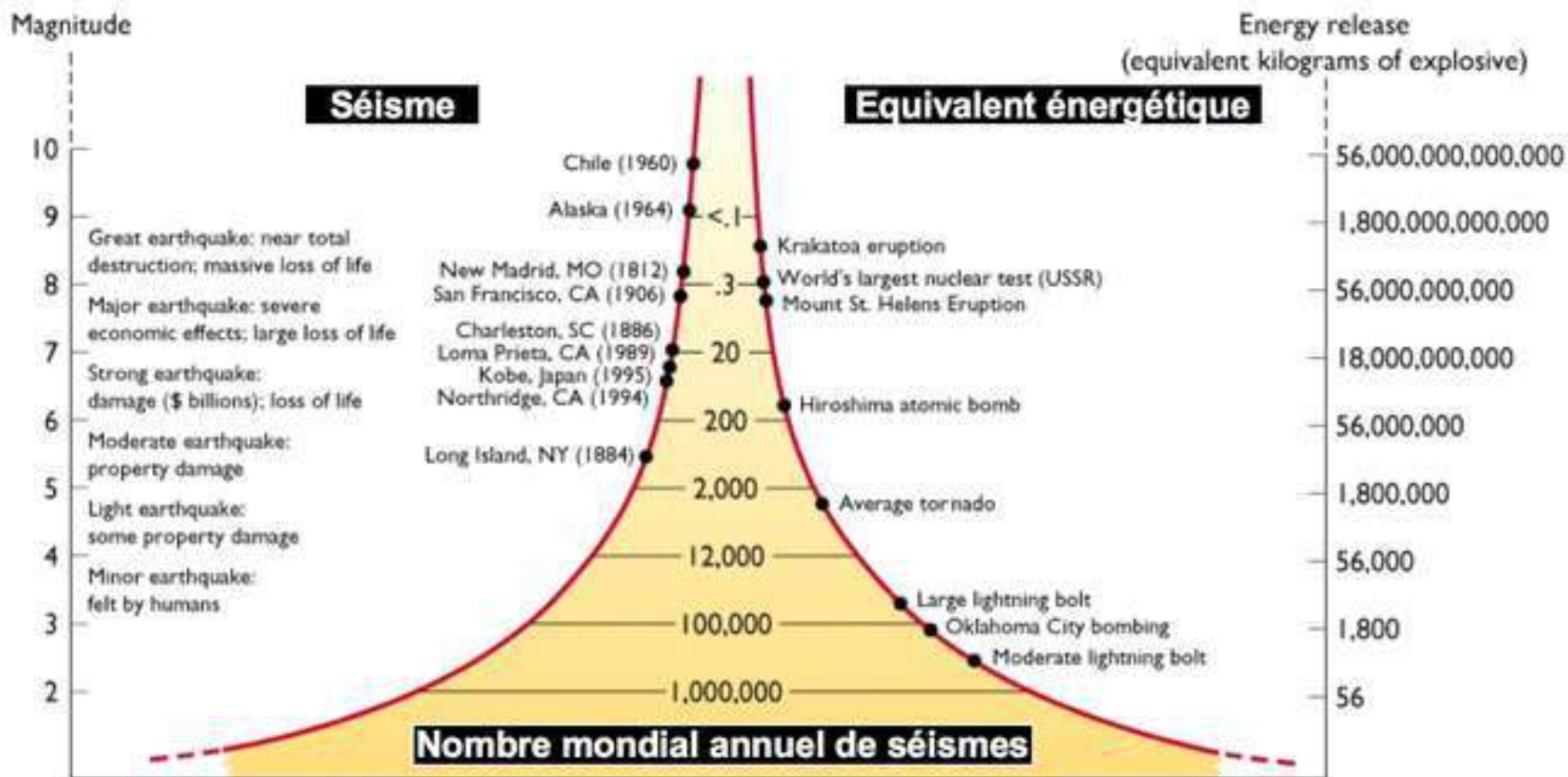
## Séisme de magnitude $M_w$ 9.2





# Magnitude de Richter et énergie

## Nombre annuel de séismes et énergie



(1 mégatonne (Mt) =  $10^9$ kg)

## Fréquence des grands tsunamis dans l'océan Indien:

- 1797: 300 morts à Padang
- 1833: nombreuses victimes à l'ouest de Sumatra
- 1843: île de Nias, nombreuses victimes
- **1861: Sumatra, des milliers de morts**
- 1883: Java et Sumatra, 36.000 morts après l'éruption du Krakatoa

Presque rien au 20ème siècle !

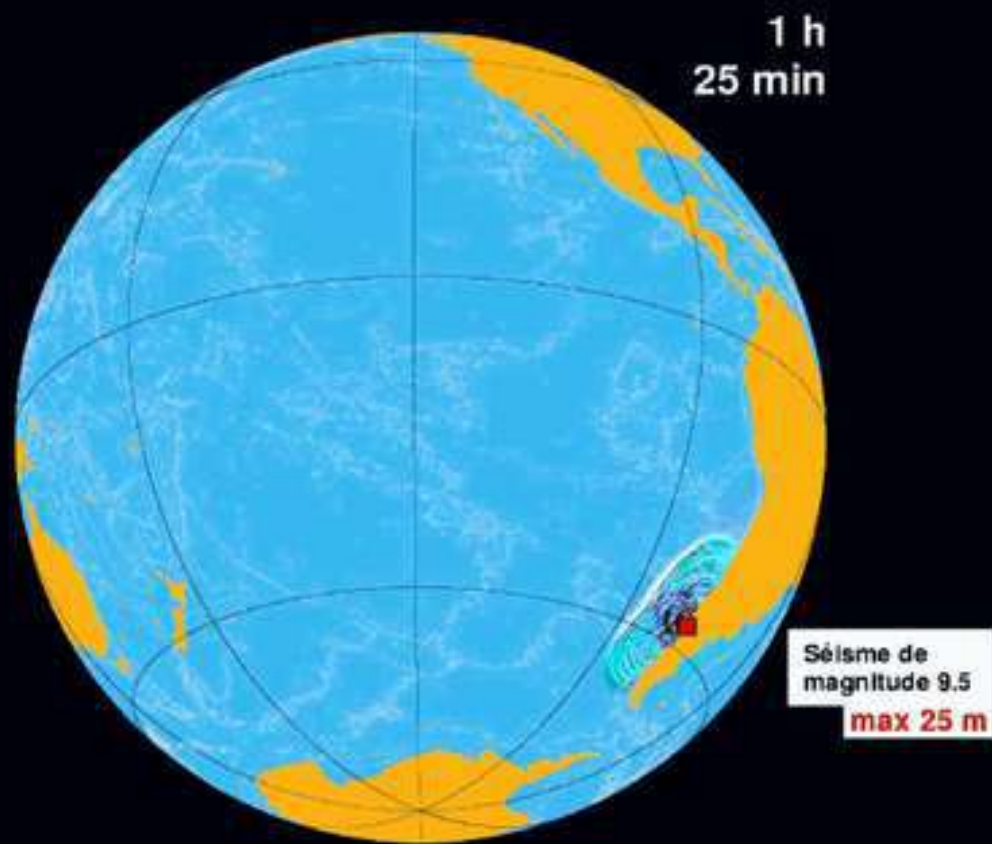
# Le souvenir du tsunami de 1861





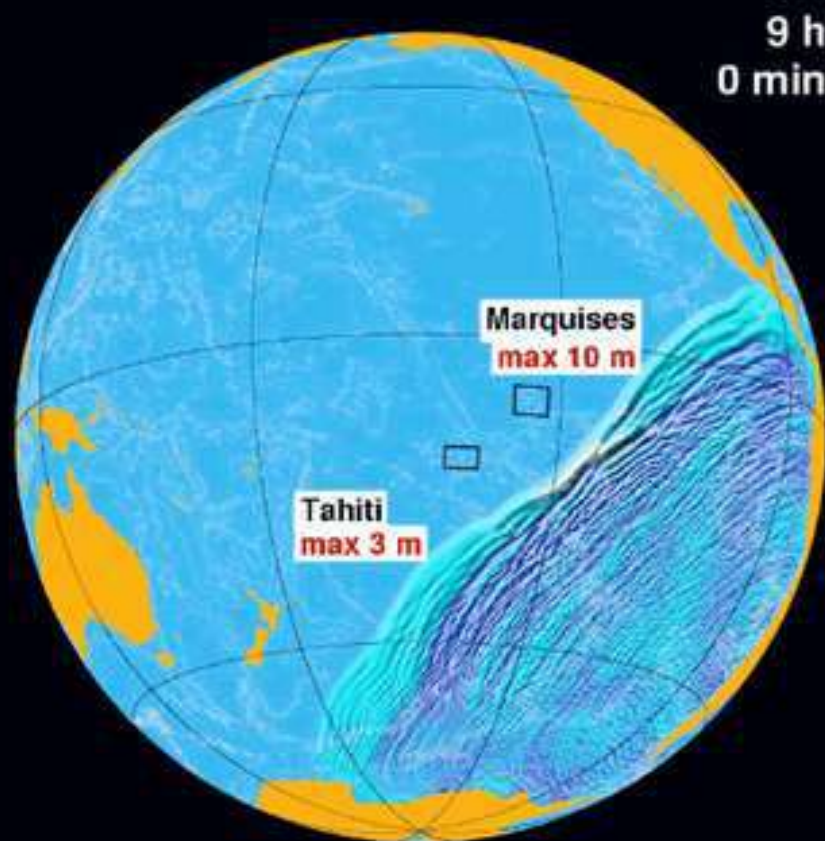
# Chile, 22 May 1960

## Séisme de magnitude $M_w$ 9.5



# Chile, 22 May 1960

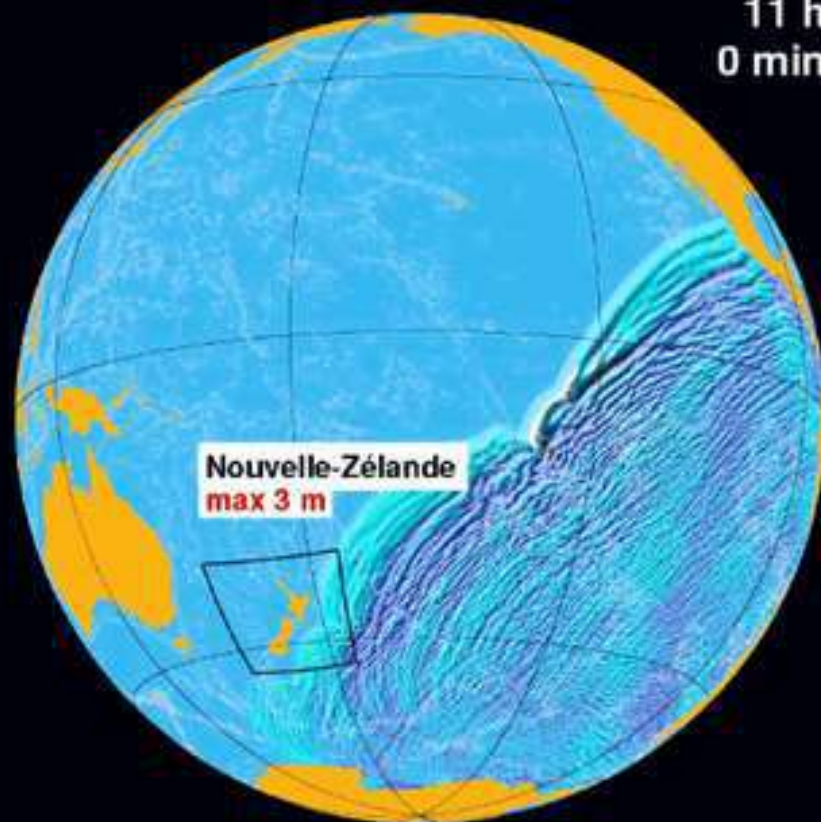
## Séisme de magnitude $M_w$ 9.5



# Chile, 22 May 1960

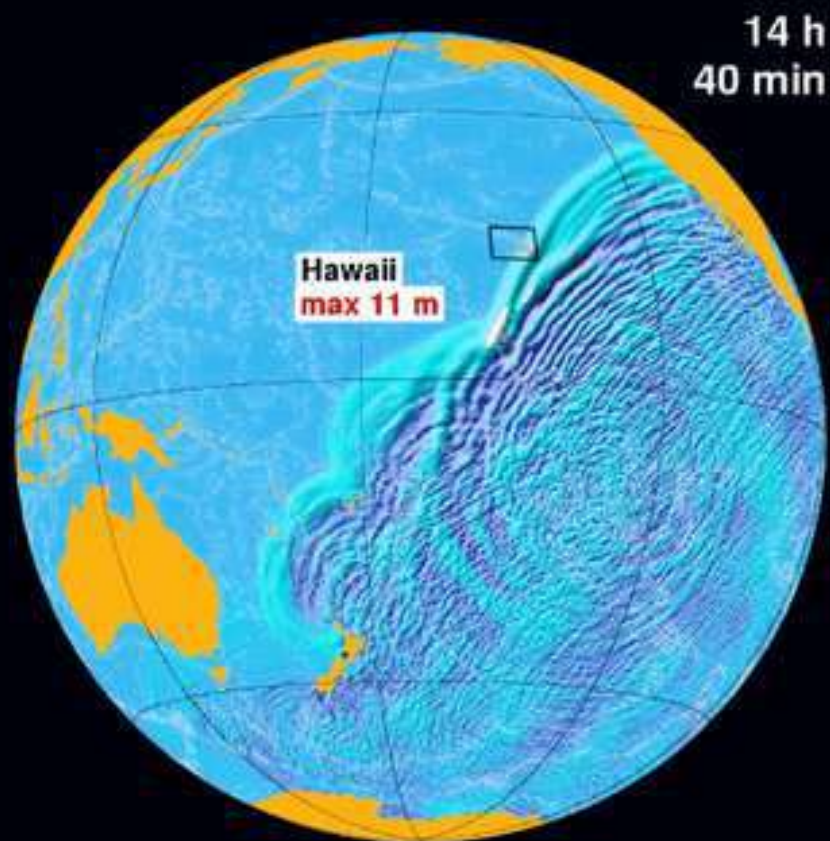
## Séisme de magnitude $M_w$ 9.5

11 h  
0 min



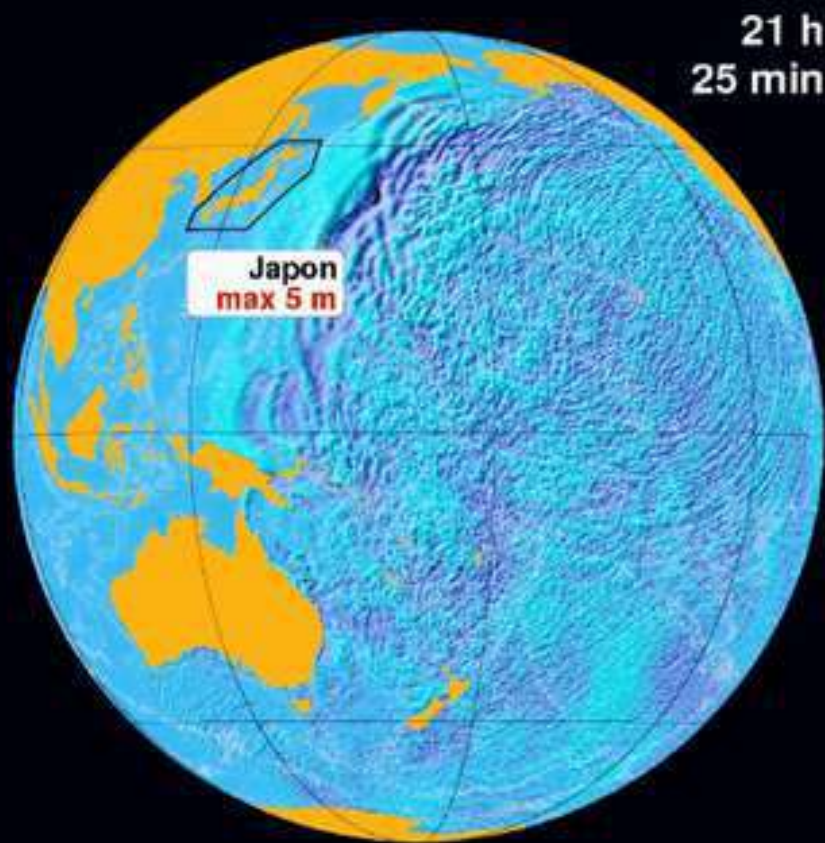


Chile, 22 May 1960  
Séisme de magnitude  $M_w$  9.5

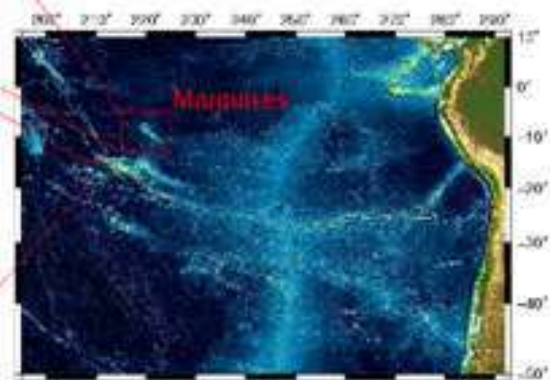
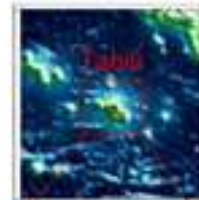
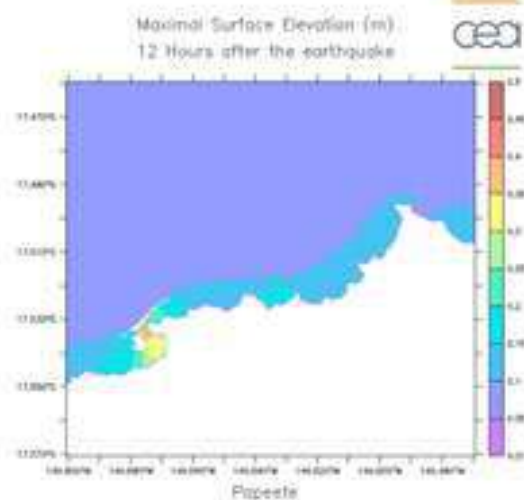
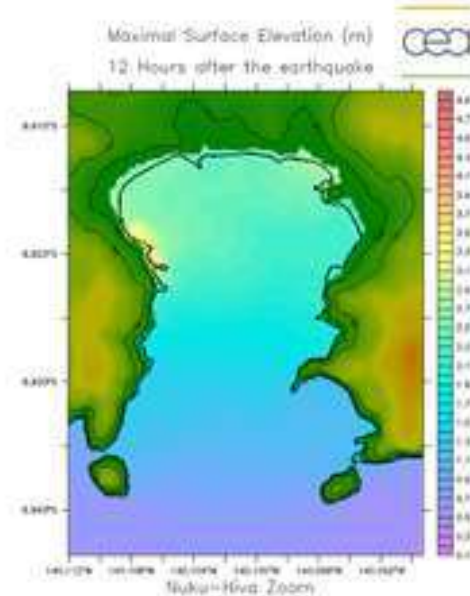
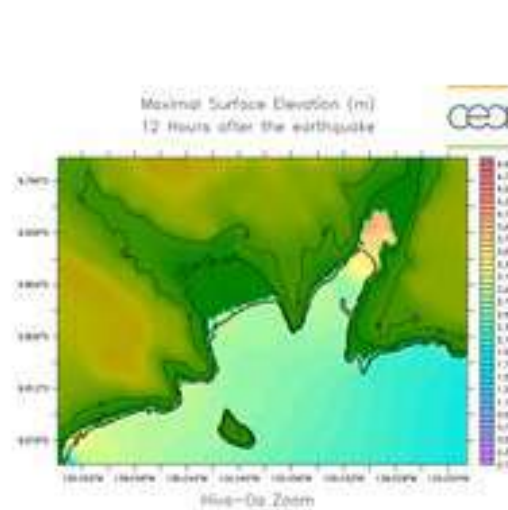
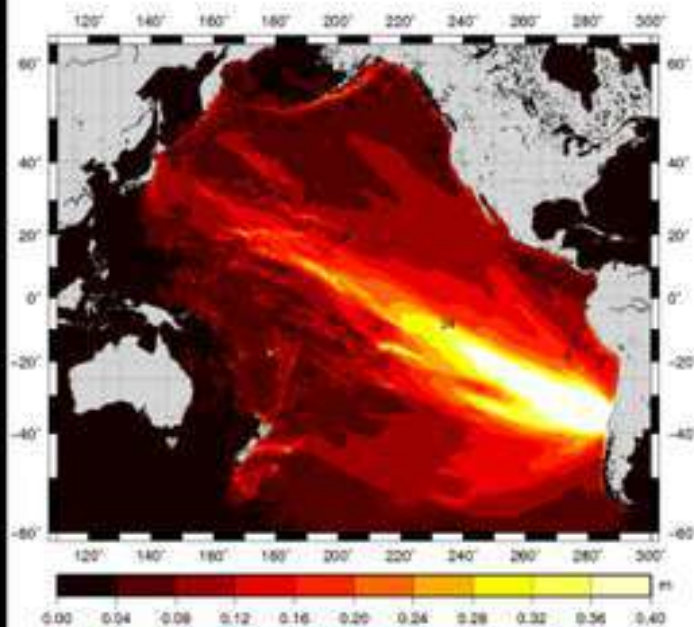


# Chile, 22 May 1960

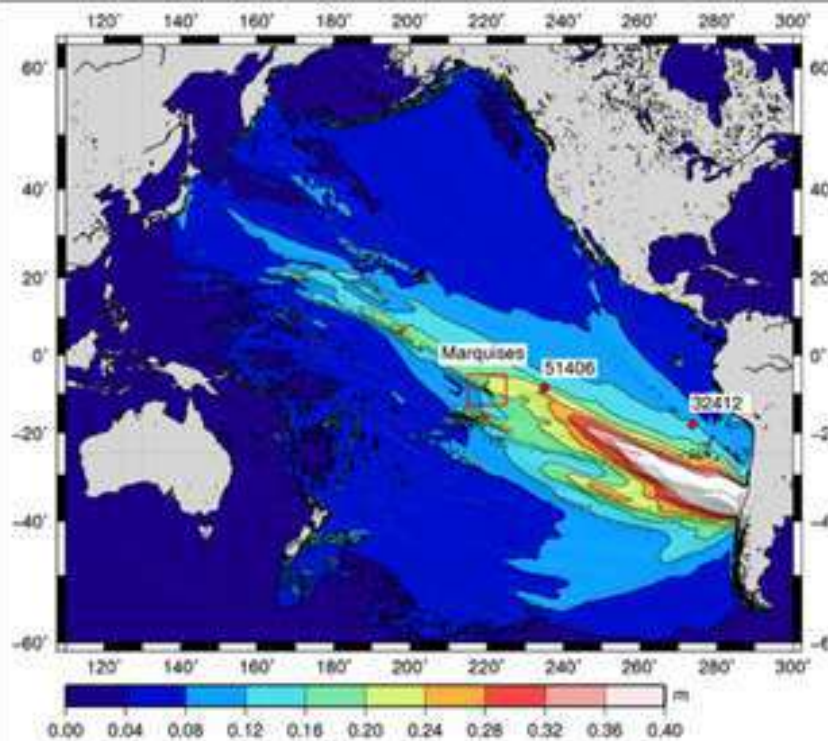
## Séisme de magnitude $M_w$ 9.5



# Exemple du séisme du Chili (27/02/10)

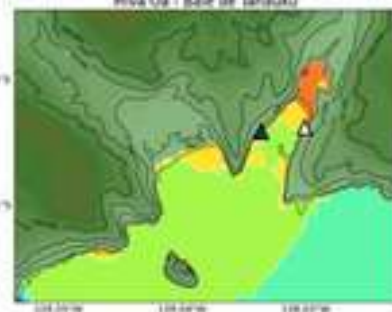






### Hauteurs maximales simulées après 12h de propagation

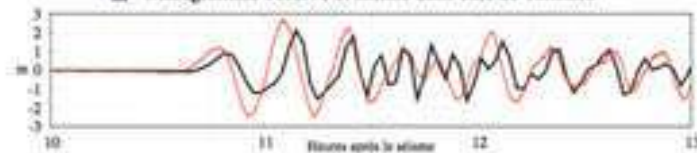
Hiva Oa - Baie de Tahauku



▲ Position du marégraphe.

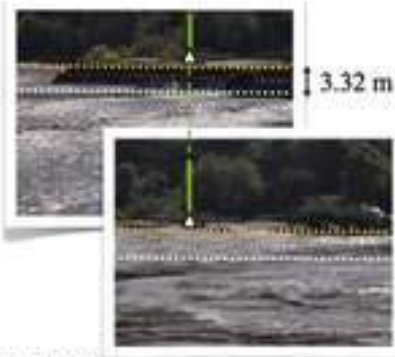
△ 1.30 m simulé au point de mesure illustré par les deux photographies.

▲ Marégramme observé et simulé dans baie de Tahauku

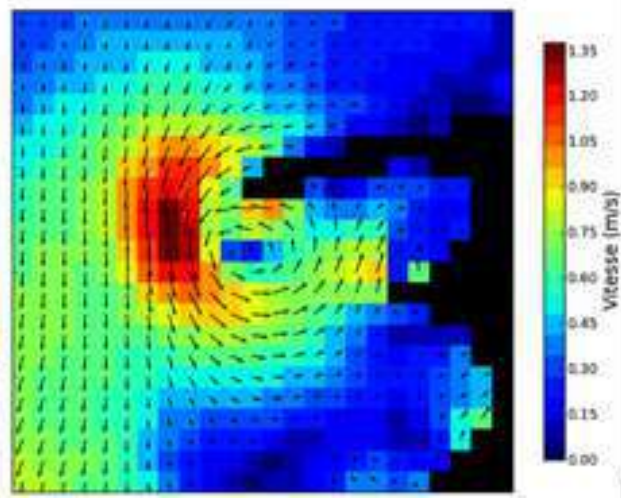
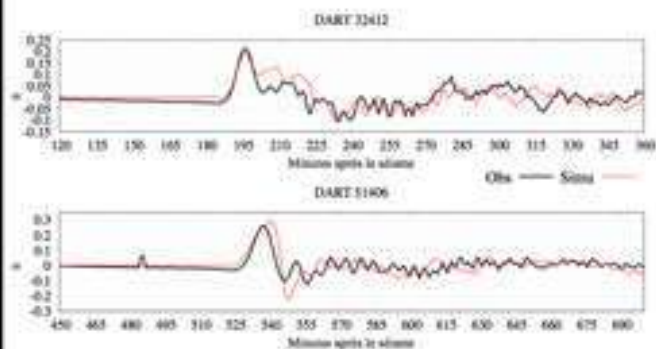


cea

énergie atomique énergie alternative



3.32 m



# 2011 : séisme de Tohoku-oki

- Tsunami : données japonaises exceptionnelles
- Polynésie : alerte rouge / évacuation

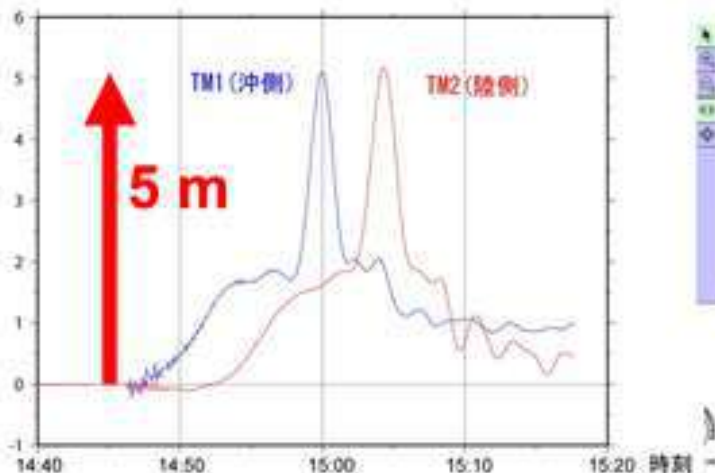


図2 海底水圧計の観測記録。14時46分頃、本震(M9.0)の揺動が水圧計に伝わり、TM1(海寄り)では、その時から徐々に海面が上昇している。約2m上昇し、約11分後にはさらに約3m急激に上昇し、合計約5m海面が上昇した。約30km陸寄りに設置されているTM2ではwaterから約4分遅れて同様の海面上昇を記録した。

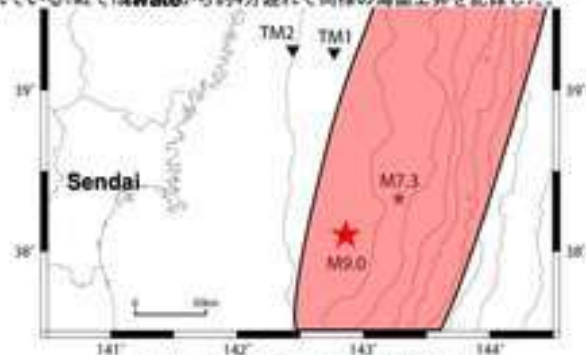
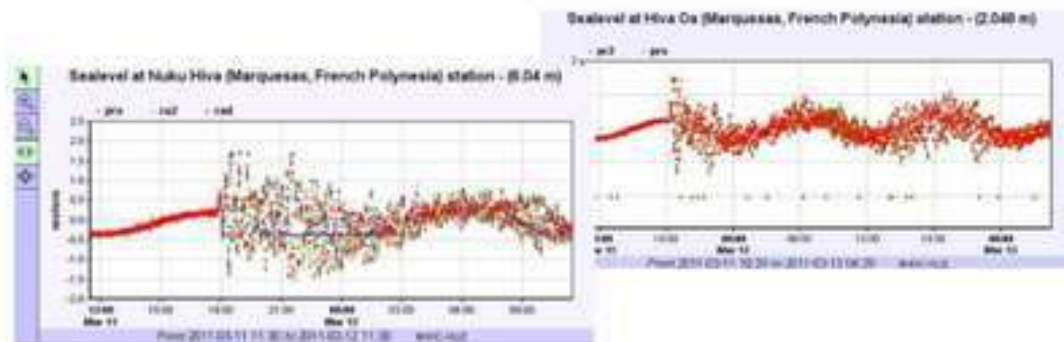
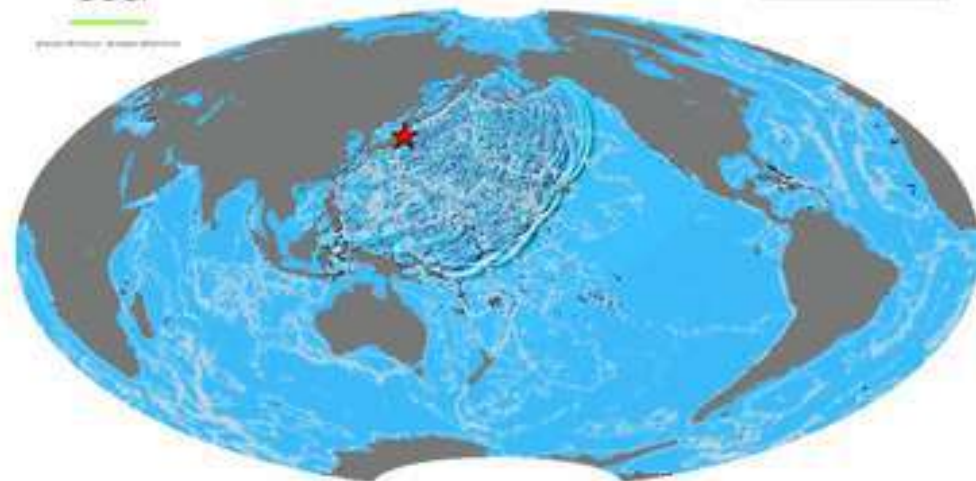


図1 岩石沖ケーブル式海底水圧計の位置



Honshu 2011

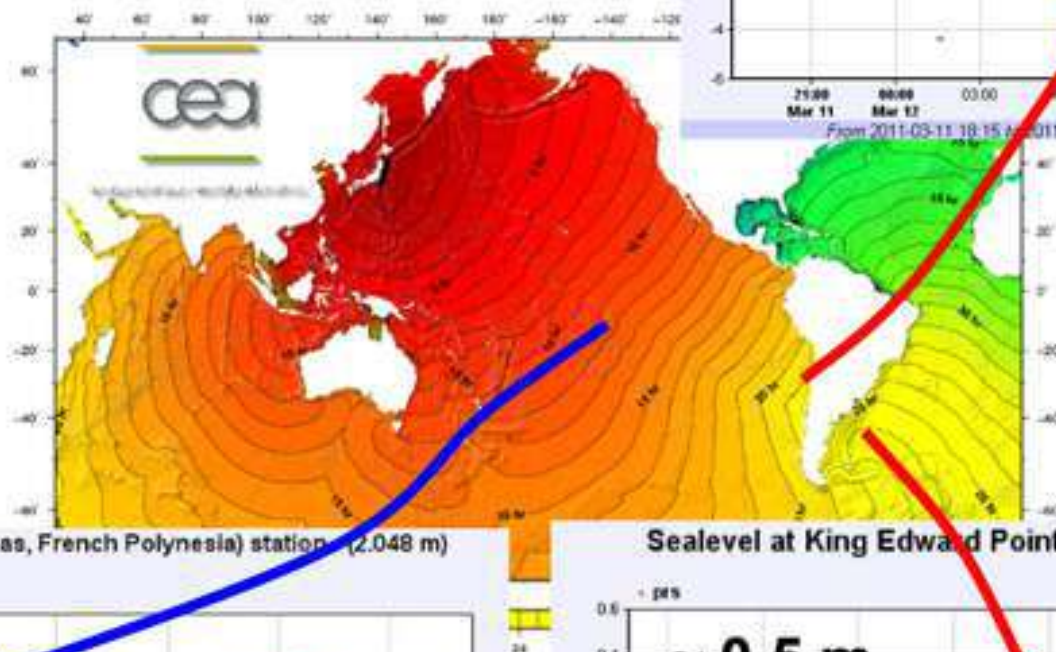
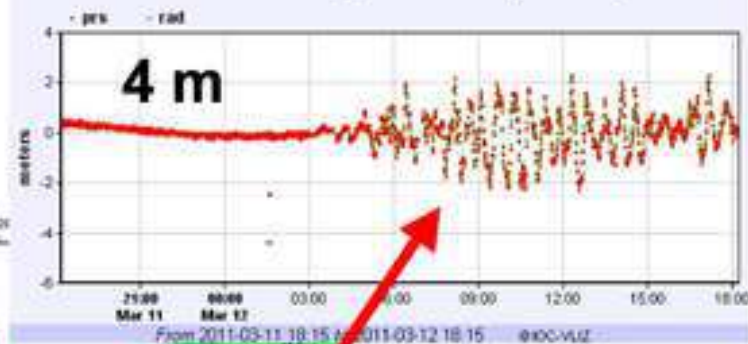
07 h 30 min



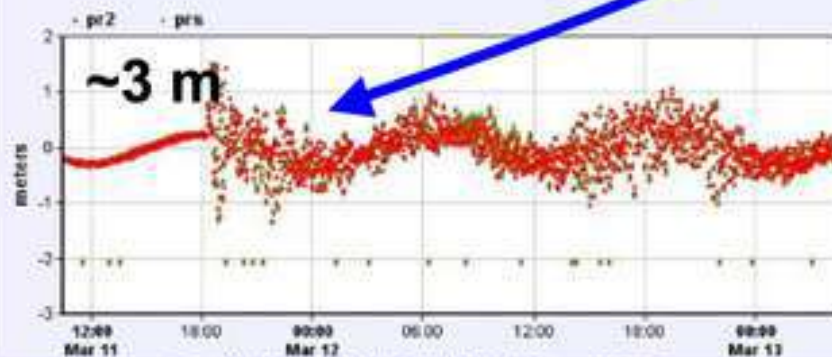


# Tsunami trans-Pacifique

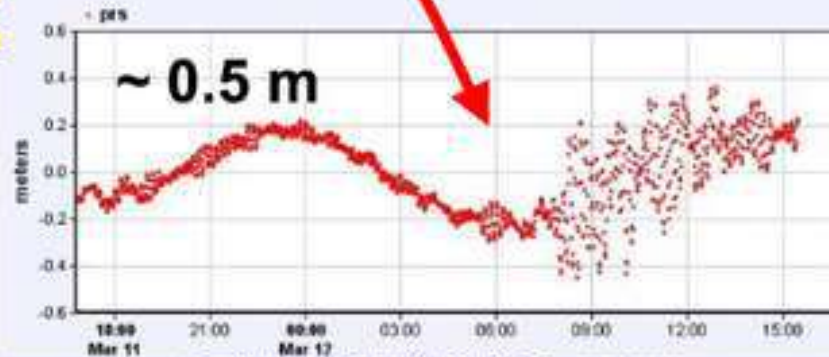
Sealevel at Arica\_CL station - (4.387 m)



Sealevel at Hiva Oa (Marquesas, French Polynesia) station - (2.048 m)



Sealevel at King Edward Point station - (1.309 m)





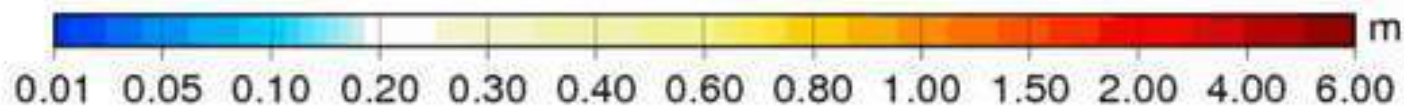
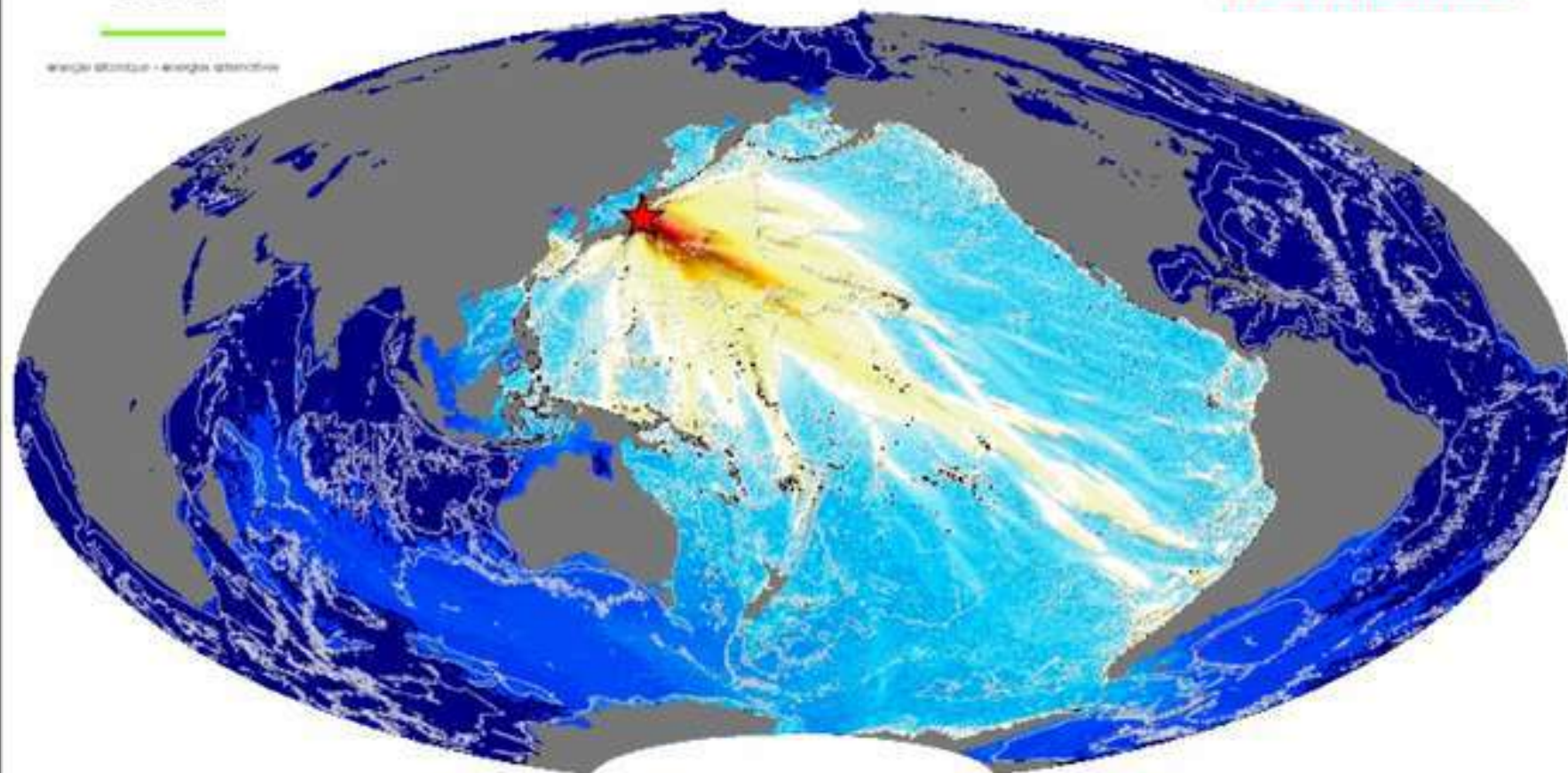
Une énergie maximale vers le sud-est Pacifique

## Tohoku-oki 2011

40 h 00 min

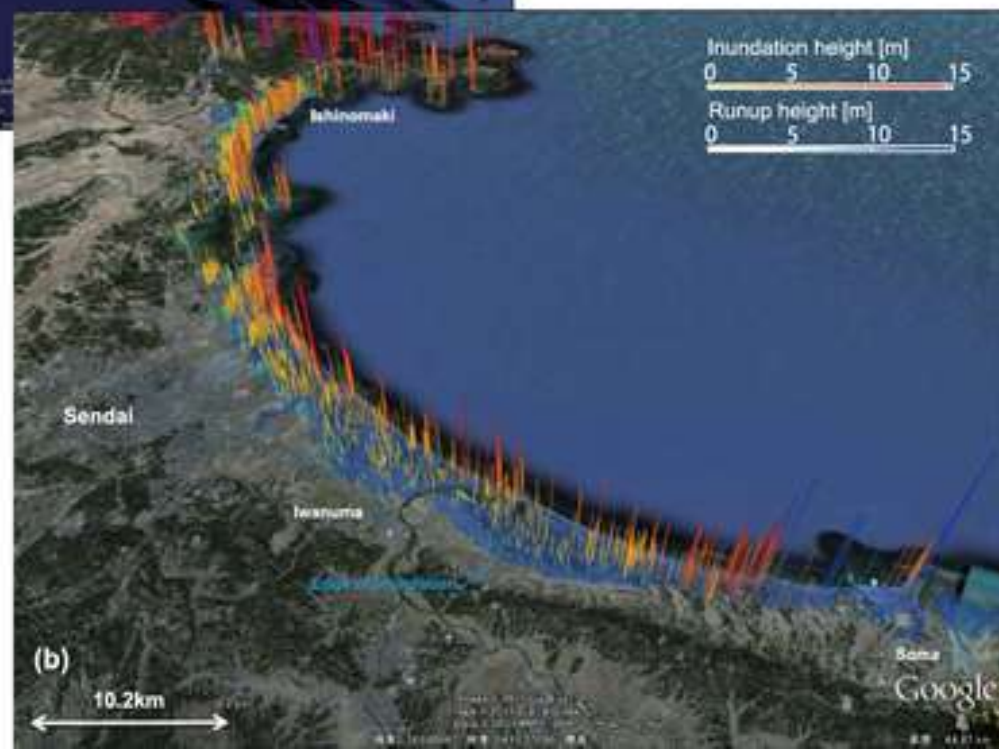
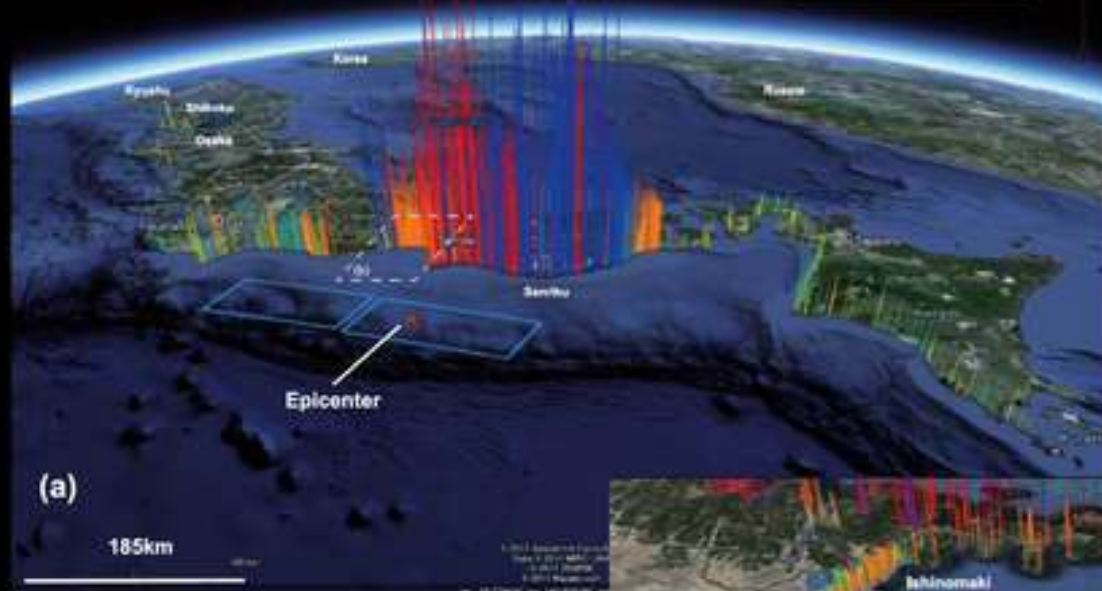


énergie atomique - énergie alternative



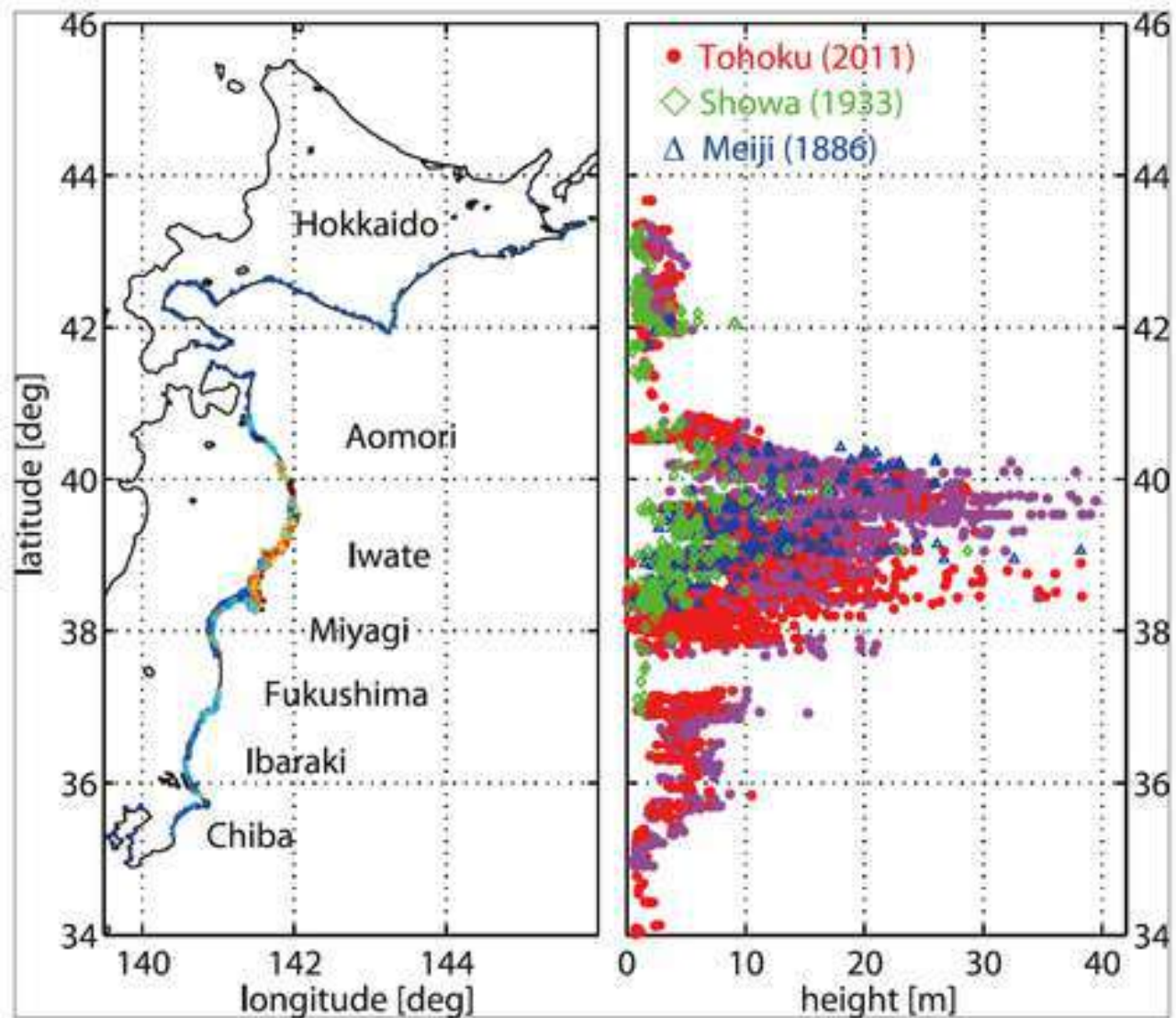


# Sur les côtes japonaises



(Mori et al., GRL, 2011)

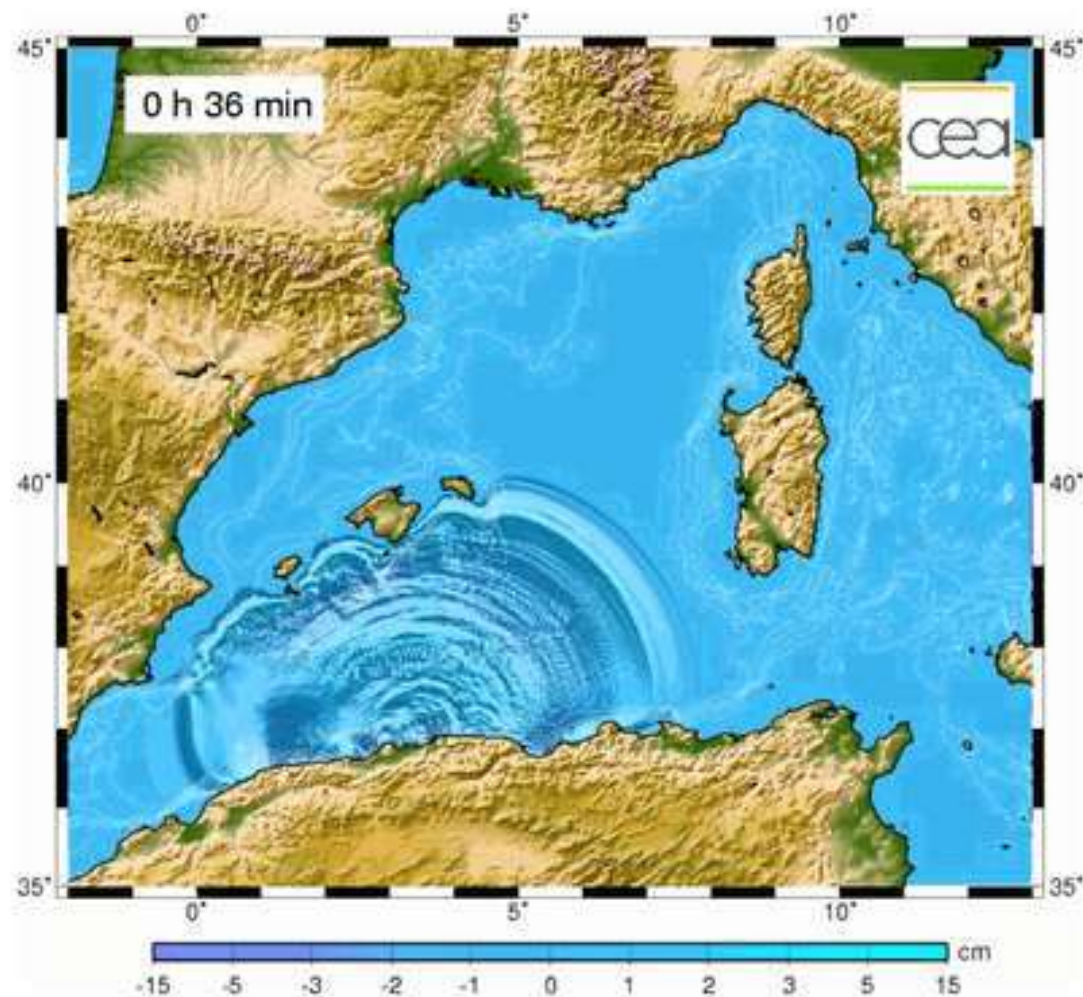








# Boumerdès (Algérie), 21 mai 2003: séisme de magnitude $M_w$ 6.8





# **Systemes de surveillance et d'alerte: éducation et prévention**





# Barrage anti-tsunami à Taro, Japon



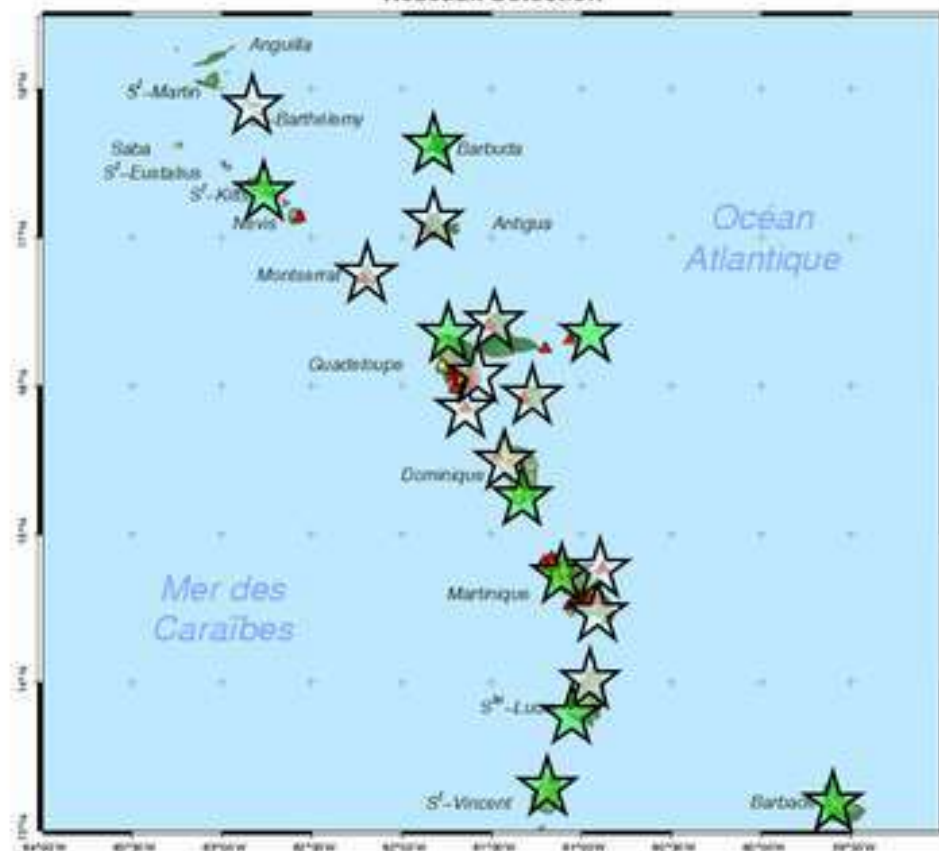
Courtesy of Taro, Japan

Les systèmes d'**alerte précoce**  
(*early warning*)  
reposent sur des réseaux d'appareils de  
mesure terrestres, marins et sous-marins  
(sismomètres, bouées et marégraphes,  
capteurs de pression).



# Des stations sismiques à terre (transmission satellite)

Réseaux Détection



- ▲ Sismologie Courte-Période - IGP (37/37 stations)
- △ Sismologie Large-Bande - IGP (8/6 stations)
- △ Sismologie Large-Bande - BRGM (4/4 stations)

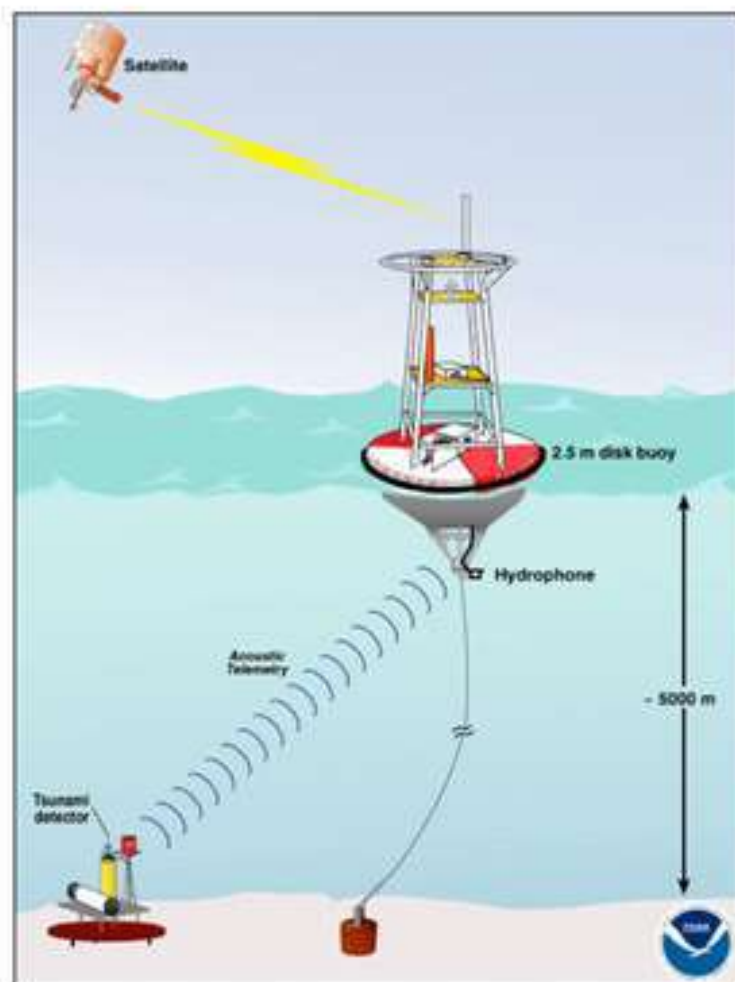
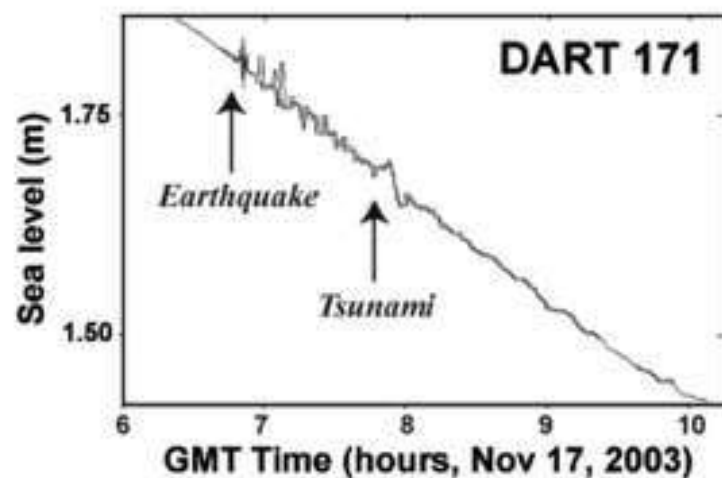
- ★ installées
- ☆ en projet





# Capteurs de pression (fond de mer) au large

- alerte en moins de 10 minutes ??



Des avancées nouvelles existent dans le domaine des techniques spatiales (en plus de l'imagerie haute résolution traditionnelle):

la **détection ionosphérique**

(les ondes sismiques et océaniques du raz de marée engendrent des ondes gravito-acoustiques dans l'atmosphère qui peuvent être détectées par des récepteurs GPS au sol, sensibles à l'ionosphère)

# Le Centre National d'Alerte aux Tsunamis (CENALT)

- Opérationnel mi-2012 au CEA (Bruyères le Châtel)
- 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





# Actions prioritaires

## ■ Séismes

- Prévention indispensable (parasismique, gestes réflexes, culture du risque)
- Études appliquées: effets de sites (RAP)
- Études fondamentales: couplage subduction, reconnaissance des failles, sismologie

## ■ Tsunamis

- Information/prévention gestes réflexes
- Système d'alerte (Caraïbe, Méditerranée)
- Études fondamentales: marégraphes permanents pour étude effets de sites et modélisation
- Réseaux sismologiques opérationnels

# Évaluation des risques

## Recherche, prévention et éducation

### ■ En temps réel

- détermination rapide de l'énergie sismique
- détermination de la position et de l'azimut de la faille

### ■ Prévention

- cartographie des inondations sur les zones exposées
  - > besoin de cartes détaillées
- cartes d'évacuation
- éducation

## ■ Recherche

- identification et connaissance des zones tsunamigéniques
  - études sismotectoniques (et volcaniques) fondamentales
- amélioration des modèles de rupture
- Prospection des nouvelles méthodes de détection (ionosphère)

**En amont, il faut aussi financer la recherche!**