Tsunami: Origine, Physique et Observations

P.Lognonné

Institut de Physique du Globe de Paris

Institut Universitaire de France

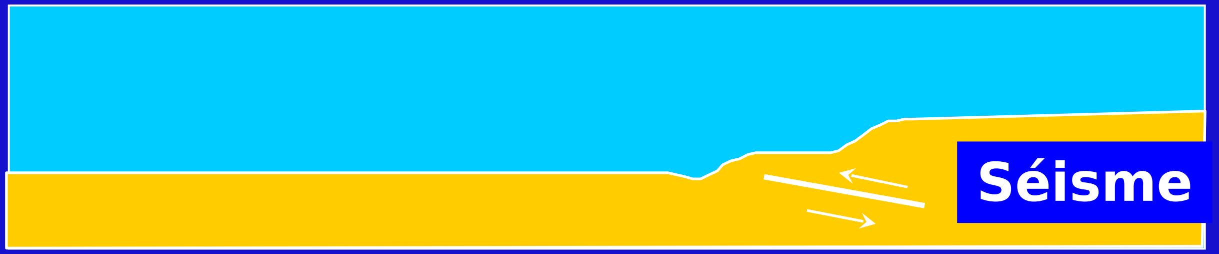
Plan

- Origine et Physique des Tsunami
- Quelques Tsunami historiques
- Aléas et risques
- Le grand tsunami de 2004: Observations et modélisations
- Un exemple de recherches actuelles: détection spatiale et couplage avec l'atmosphère et l'ionosphère…
- conclusion

- Remerciements:
  - Equipe IPGP/ESP: R.Garcia, G.Occhipinti, E. Kherani
  - Chercheurs de l'IPGP
  - CEA/DASE: H.Hébert
  - CNES: J.Artru

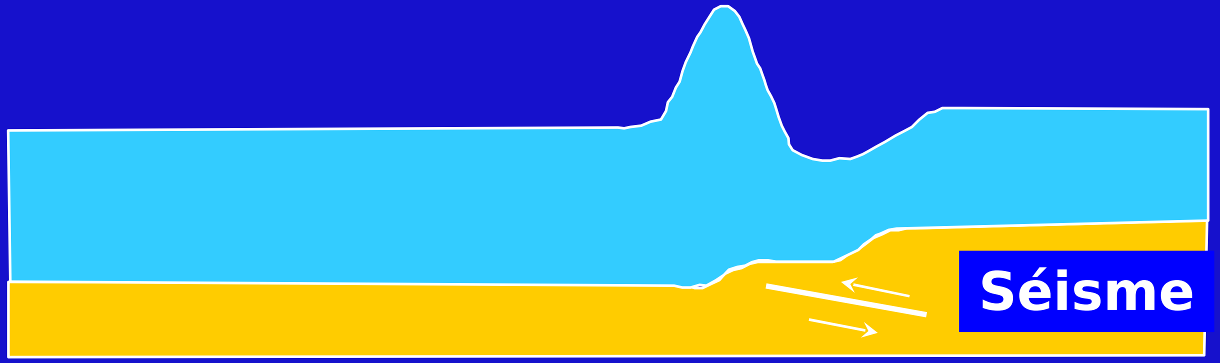
Origine et physique des tsunami

Comment se forme un tsunami?



Université de Fairbanks, Alaska

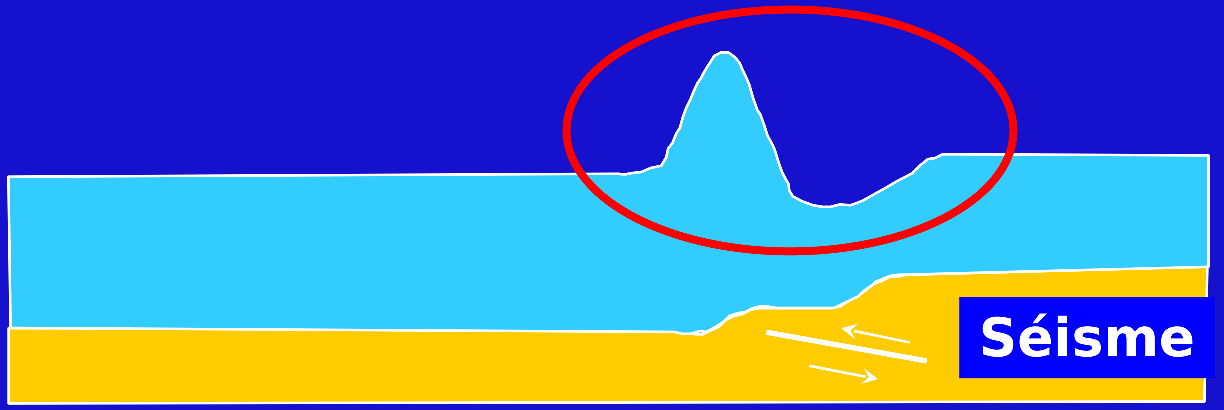
Comment se forme un tsunami?



Université de Fairbanks, Alaska

Comment se forme un tsunami?

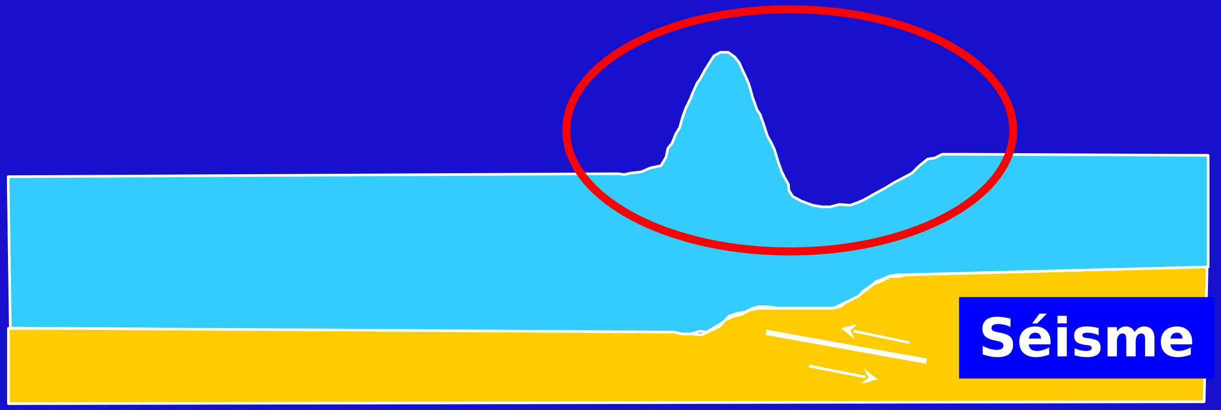
- Mouvement brusque de l’eau
  - Déplacement vertical du fond de l’eau (séisme, glissement de terrain)
  - Déplacement de la surface de l’eau (impact de météorite)



Université de Fairbanks, Alaska

Comment se forme un tsunami?

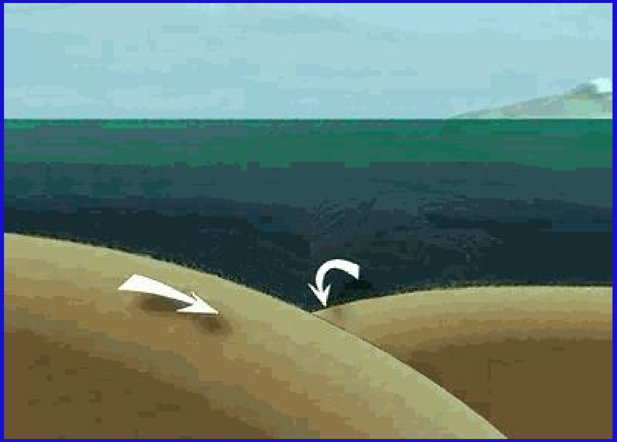
- Mouvement brusque de l’eau
    - Déplacement vertical du fond de l’eau (séisme, glissement de terrain)
    - Déplacement de la surface de l’eau (impact de météorite)
- Retour à l’équilibre : jeu des forces de***gravité***
    - propagation d’ondes

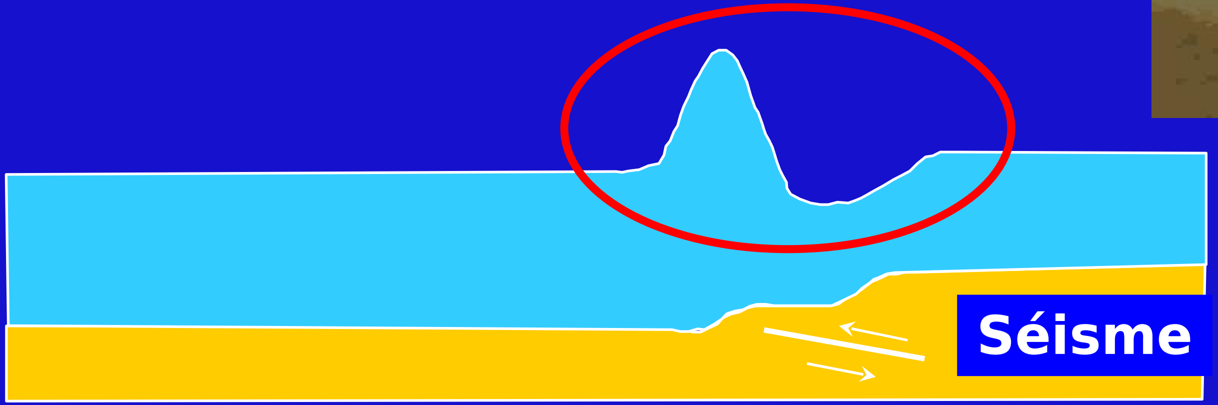


Université de Fairbanks, Alaska

Comment se forme un tsunami?

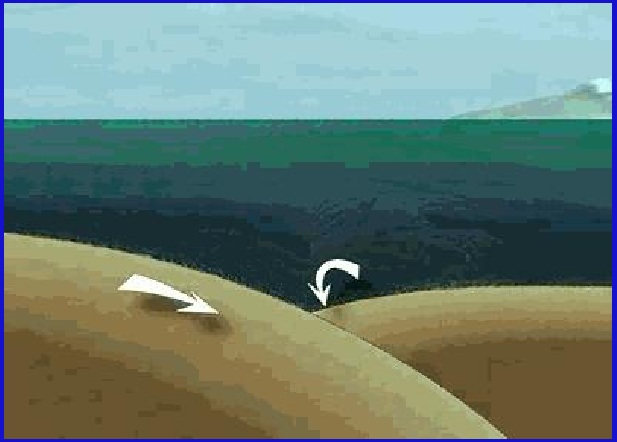
- Mouvement brusque de l’eau
  - Déplacement vertical du fond de l’eau (séisme, glissement de terrain)
  - Déplacement de la surface de l’eau (impact de météorite)
- Retour à l’équilibre : jeu des forces de ***gravité***
  - propagation d’ondes

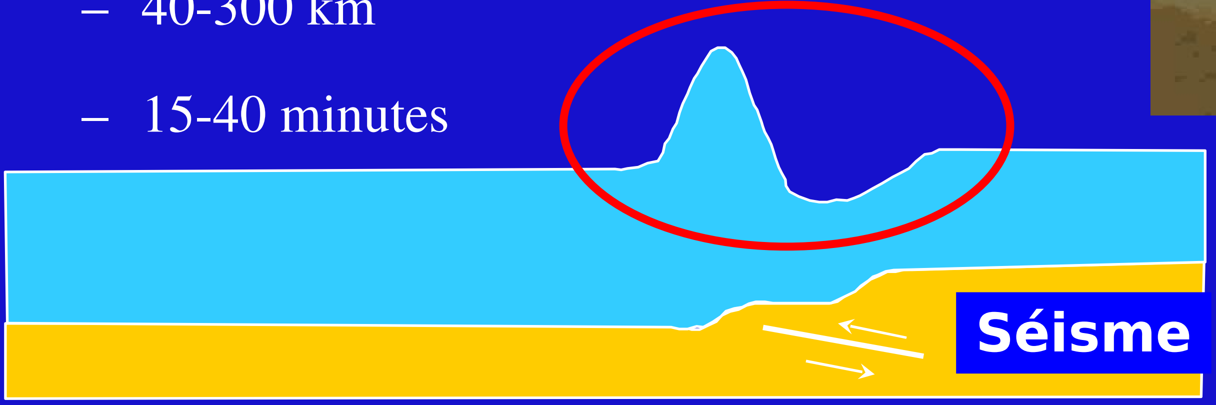

Université de Fairbanks, Alaska



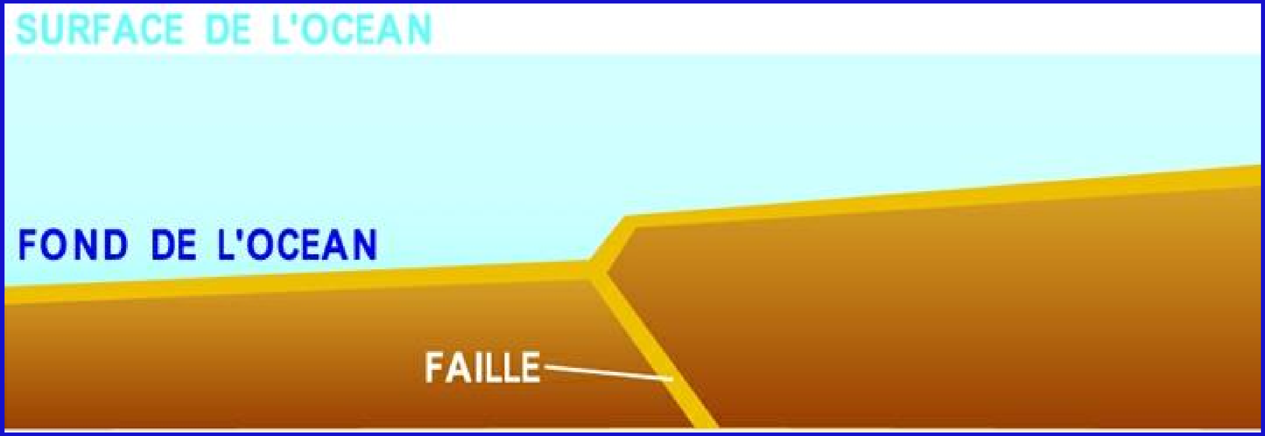
Comment se forme un tsunami?

- Mouvement brusque de l’eau
    - Déplacement vertical du fond de l’eau (séisme, glissement de terrain)
    - Déplacement de la surface de l’eau (impact de météorite)
- Retour à l’équilibre : jeu des forces de***gravité***
    - propagation d’ondes
- Longueurs d'ondes et périodes sont très grandes
    - 40-300 km
    - 15-40 minutes

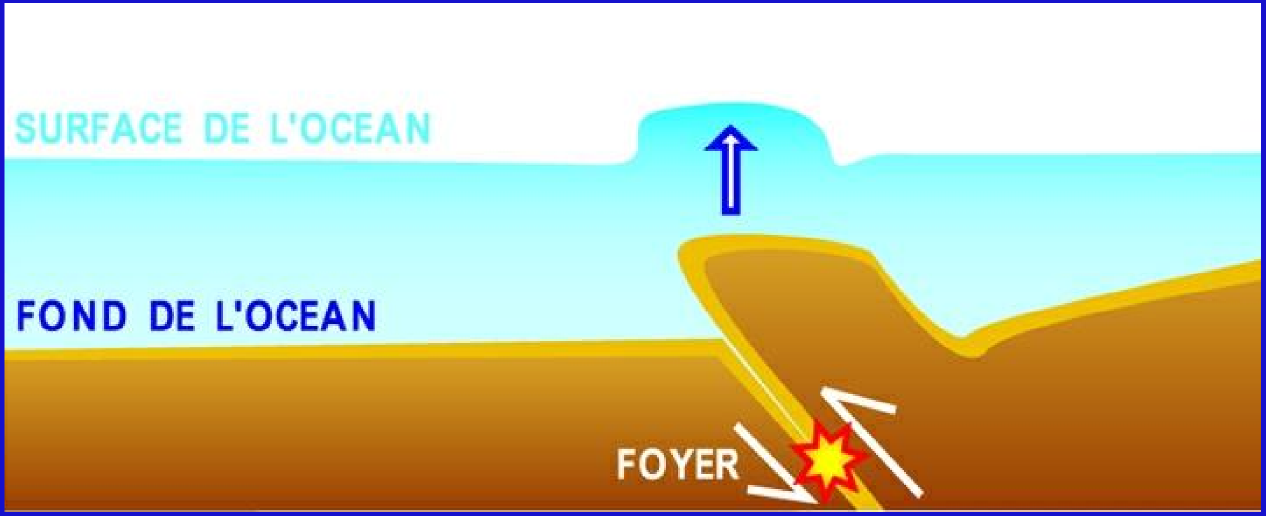

Université de Fairbanks, Alaska



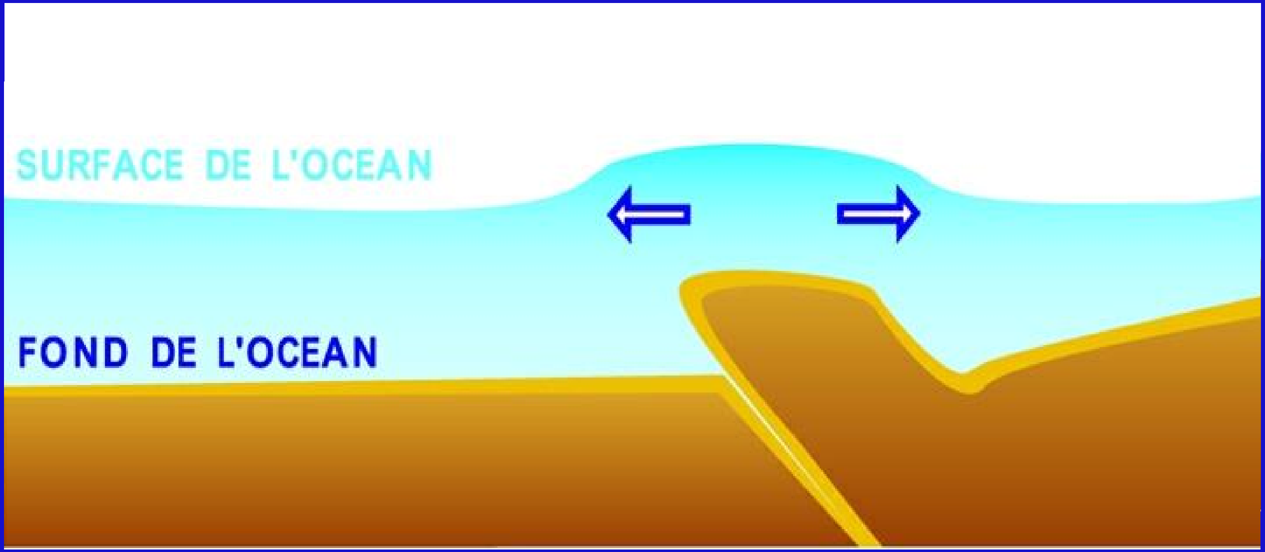
Propagation et amplification


SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN
FAILLE

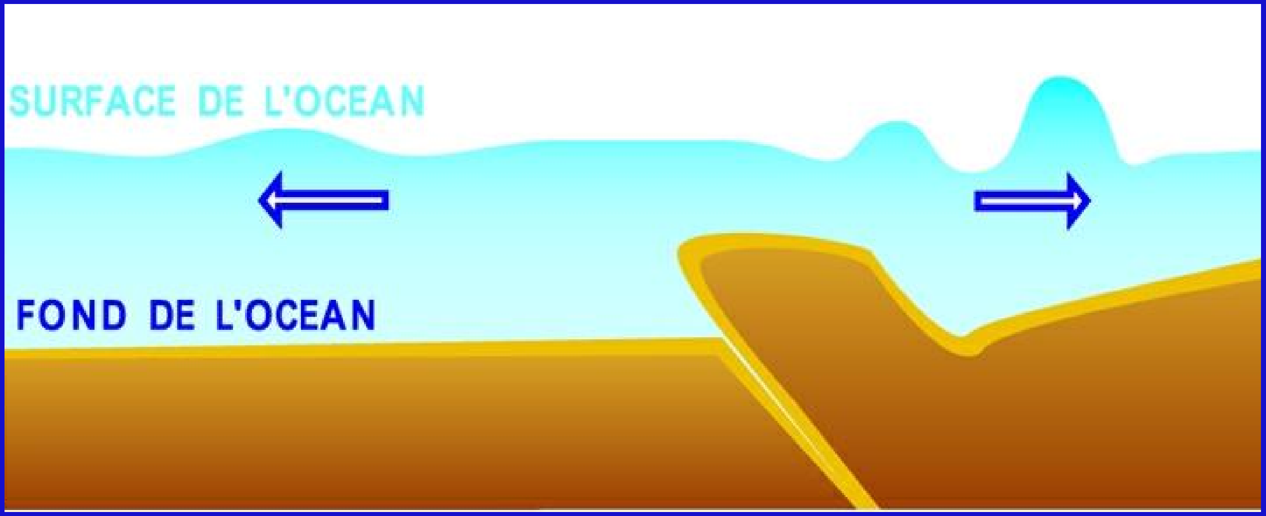
Propagation et amplification


SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN
FOYER

Propagation et amplification


SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN

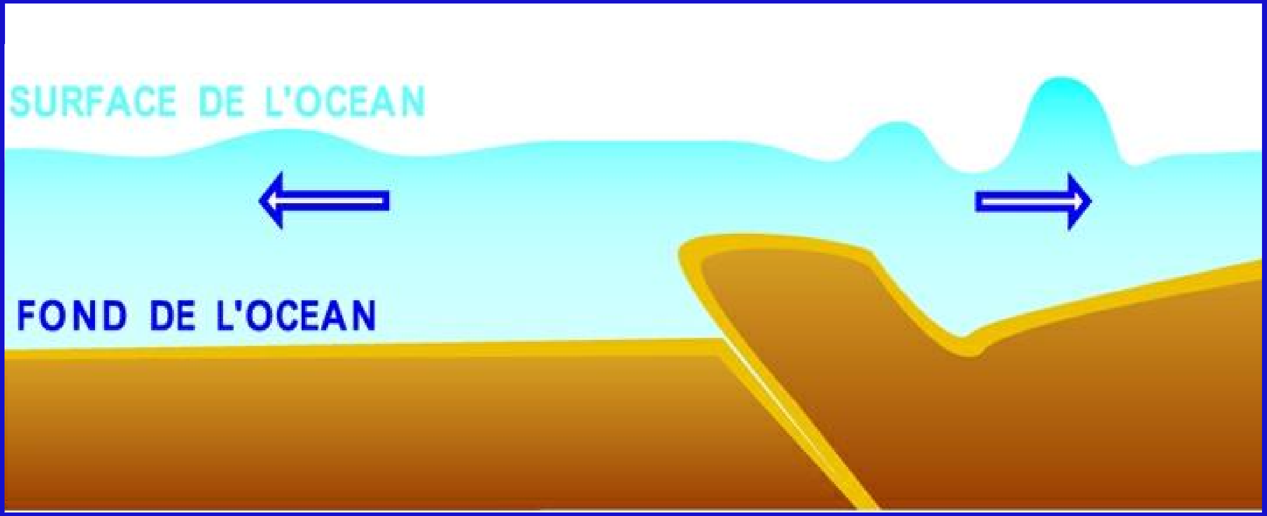
Propagation et amplification


SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN

- Vitesse de propagation

$$c = \sqrt{gh}$$

Propagation et amplification

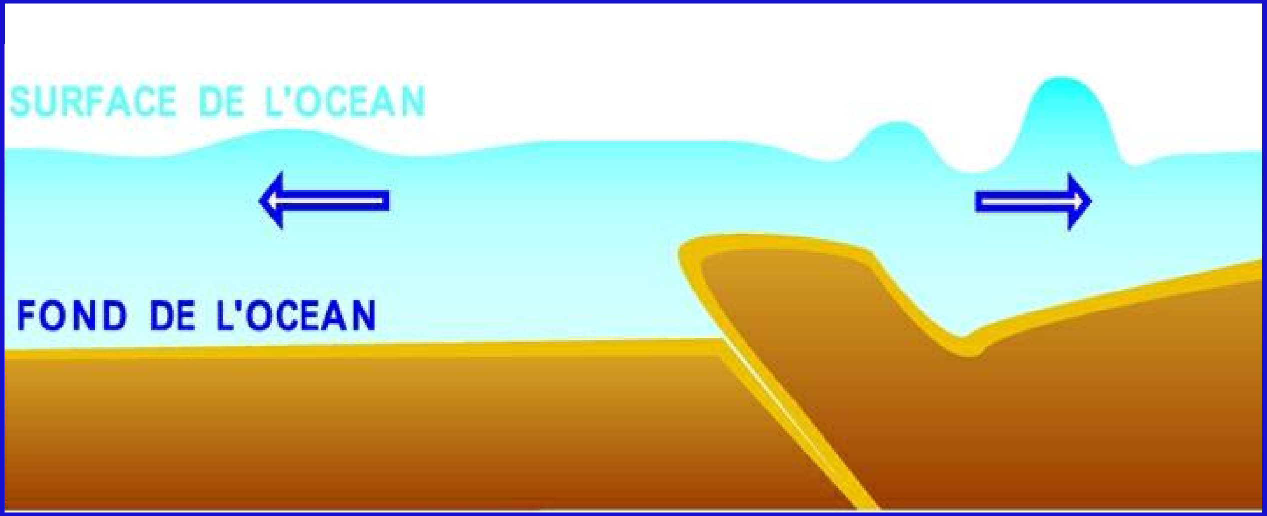

SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN

- Vitesse de propagation

$$c = \sqrt{gh}$$

- Vers le large (océan profond)
  - Evacuation plus rapide de l’eau: vitesse de propagation plus grande
  - Plus de volume d’eau distribuant le mouvement: amplitudes plus faibles

Propagation et amplification

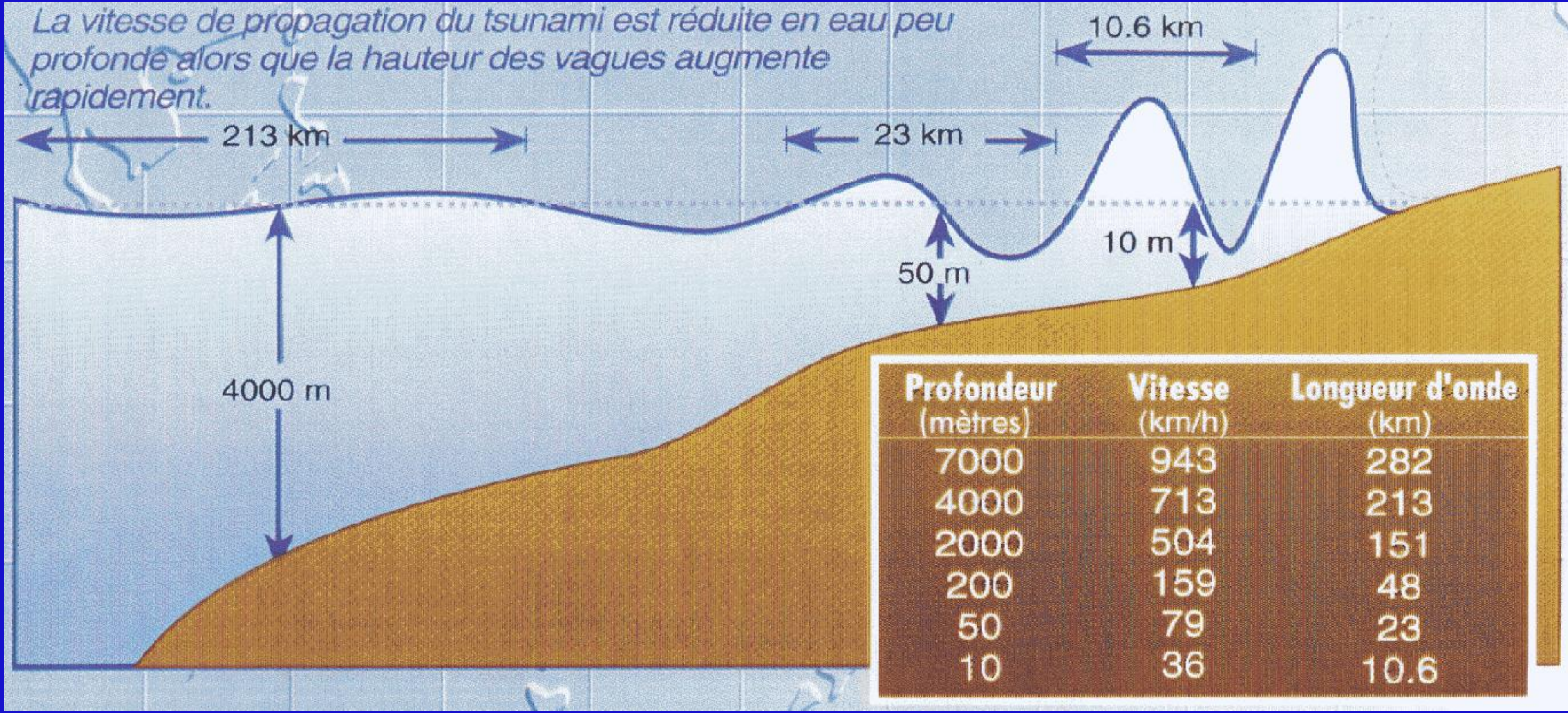


- Vitesse de propagation

$$c=\sqrt{gh}$$

- Vers le large (océan profond)
  - Evacuation plus rapide de l’eau: vitesse de propagation plus grande
  - Plus de volume d’eau distribuant le mouvement: amplitudes plus faibles
- Vers la côte
  - amplification dès que *h* (profondeur d'eau) décroît significativement

Propagation

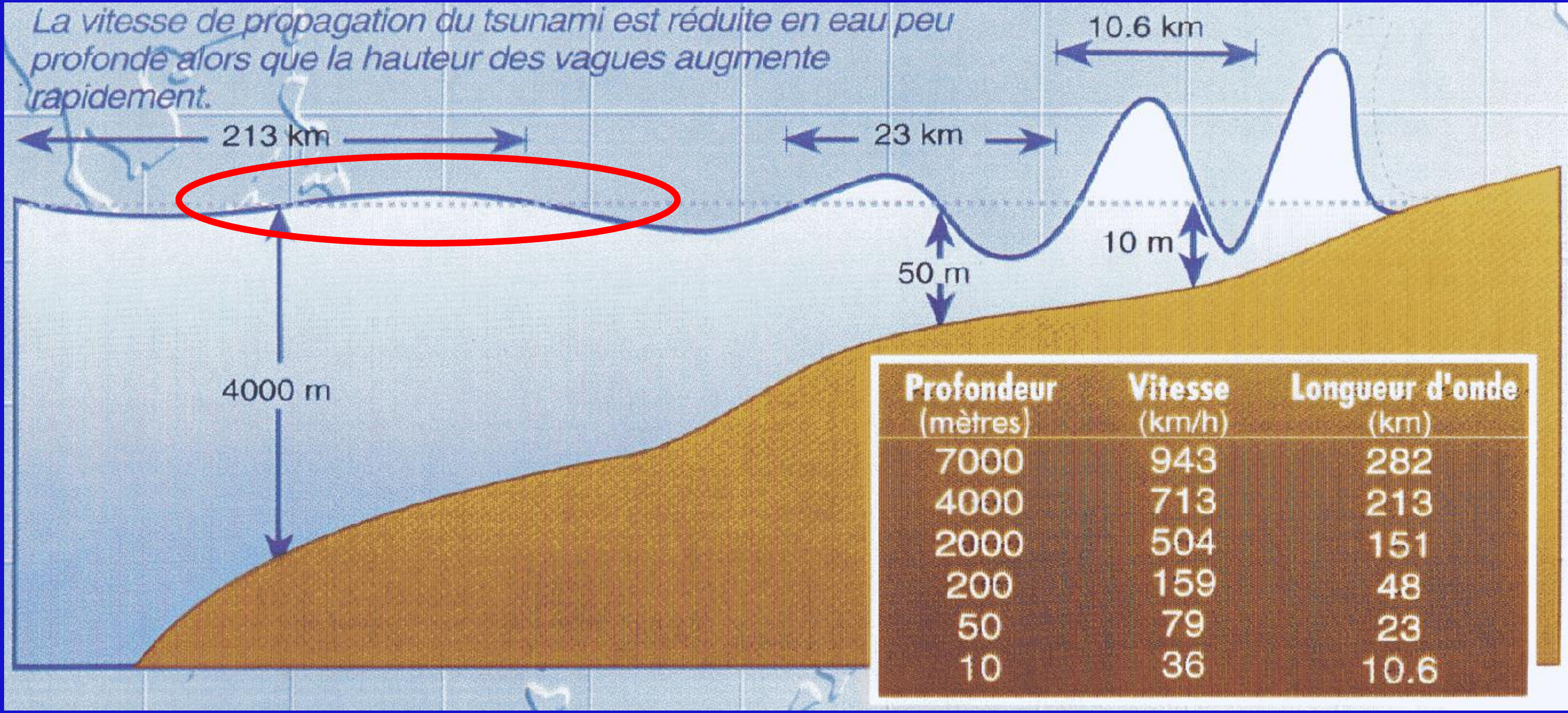


La vitesse de propagation du tsunami est réduite en eau peu profonde alors que la hauteur des vagues augmente rapidement.

213 km
23 km
10.6 km
4000 m
50 m
10 m

Profondeur (mètres)	Vitesse (km/h)	Longueur d'onde (km)
7000	943	282
4000	713	213
2000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	36	10.6

Propagation

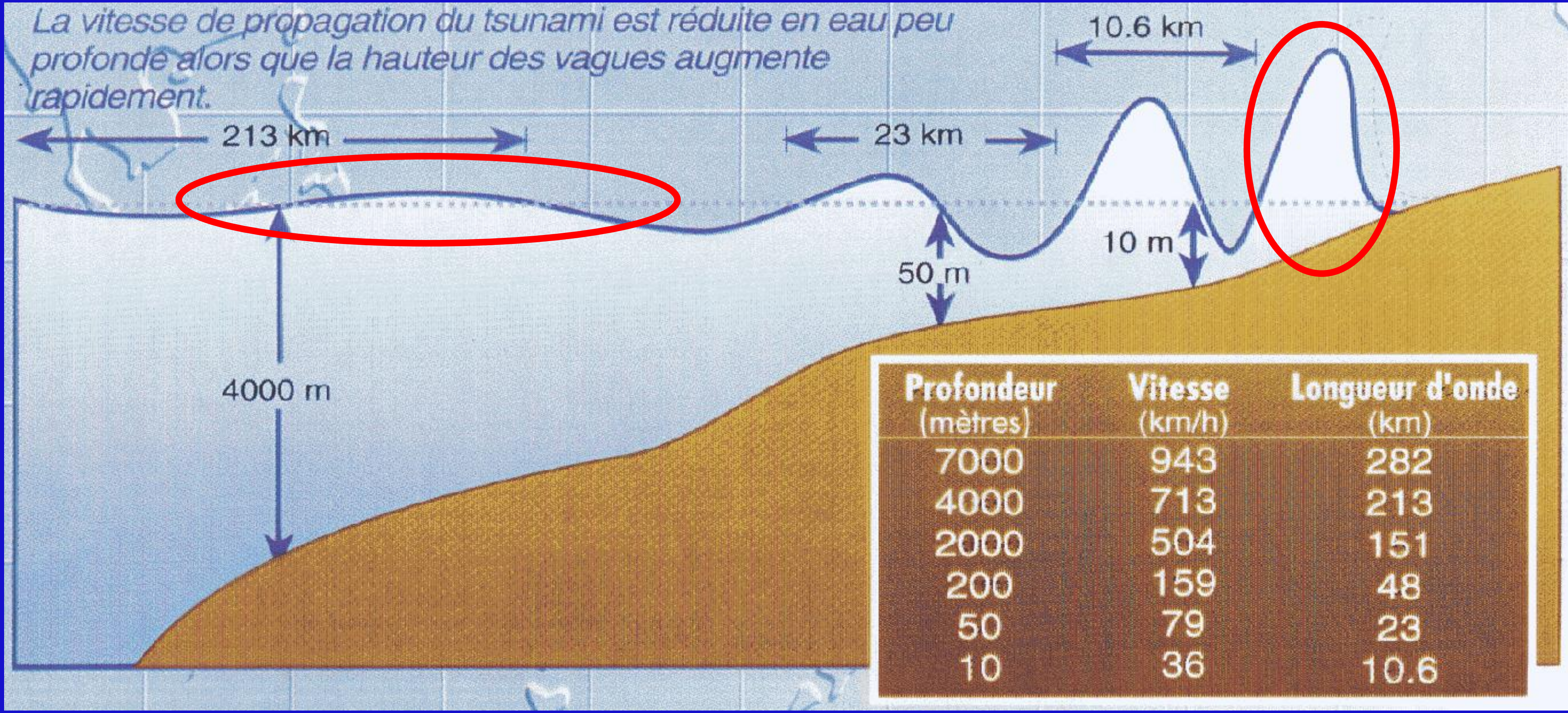


La vitesse de propagation du tsunami est réduite en eau peu profonde alors que la hauteur des vagues augmente rapidement.

213 km
23 km
10.6 km
4000 m
50 m
10 m

Profondeur (mètres)	Vitesse (km/h)	Longueur d'onde (km)
7000	943	282
4000	713	213
2000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	36	10.6

Propagation



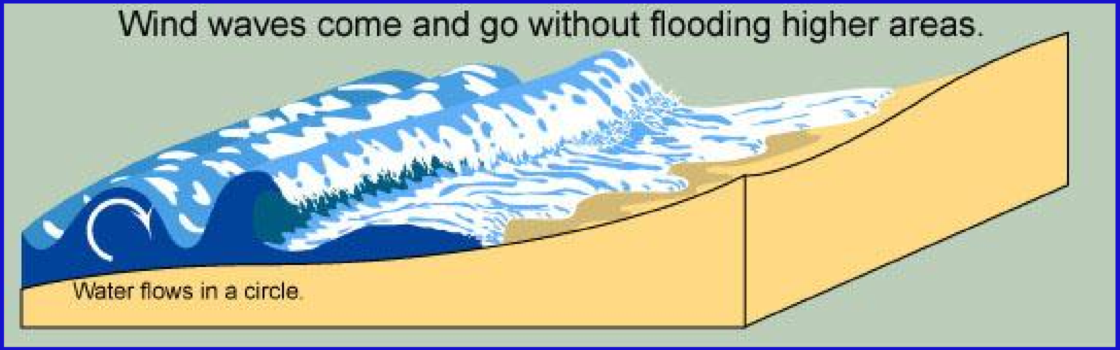
La vitesse de propagation du tsunami est réduite en eau peu profonde alors que la hauteur des vagues augmente rapidement.

213 km
23 km
10.6 km
4000 m
50 m
10 m

Profondeur (mètres)	Vitesse (km/h)	Longueur d'onde (km)
7000	943	282
4000	713	213
2000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	36	10.6

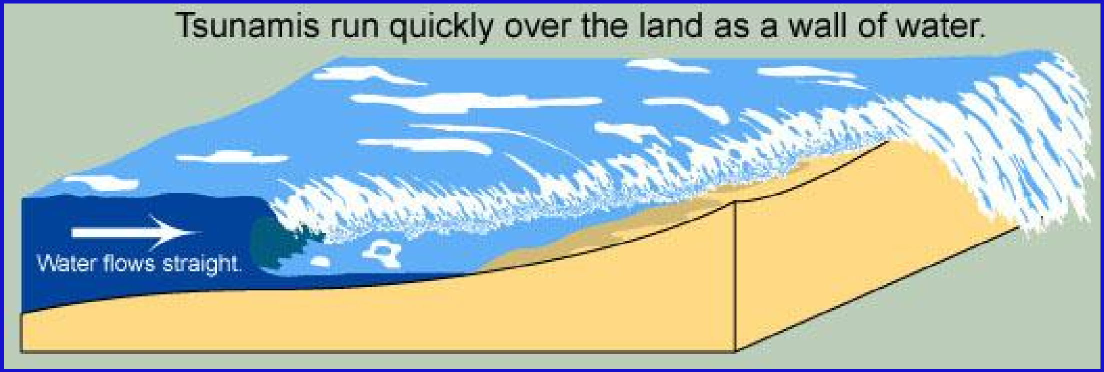
A quoi ressemble un tsunami ?

- Les vagues ne sont pas beaucoup plus hautes que les vagues de houle
  - mais les vagues de houle ne pénètrent pas à terre


Wind waves come and go without flooding higher areas.
Water flows in a circle.

A quoi ressemble un tsunami ?

- Les vagues ne sont pas beaucoup plus hautes que les vagues de houle
  - mais les vagues de houle ne pénètrent pas à terre
  - les vagues de tsunami provoquent des **crues (et décrues) dévastatrices**

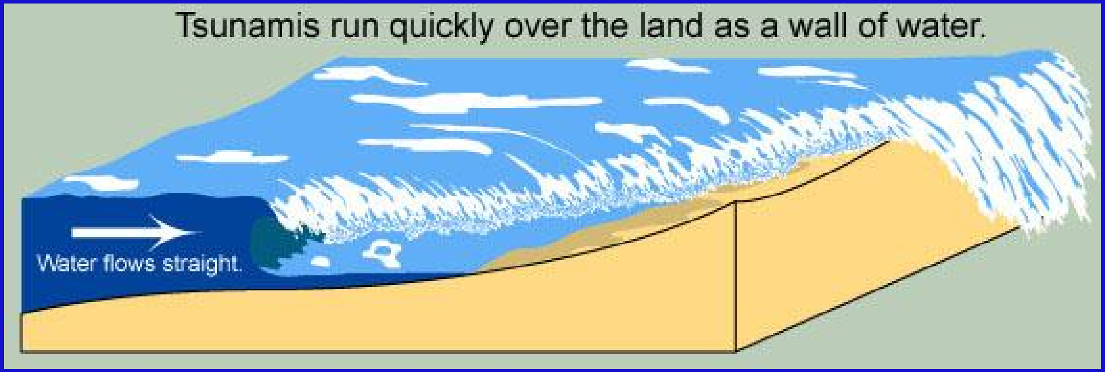

Tsunamis run quickly over the land as a wall of water.
Water flows straight.

© University of Washington

-

A quoi ressemble un tsunami ?

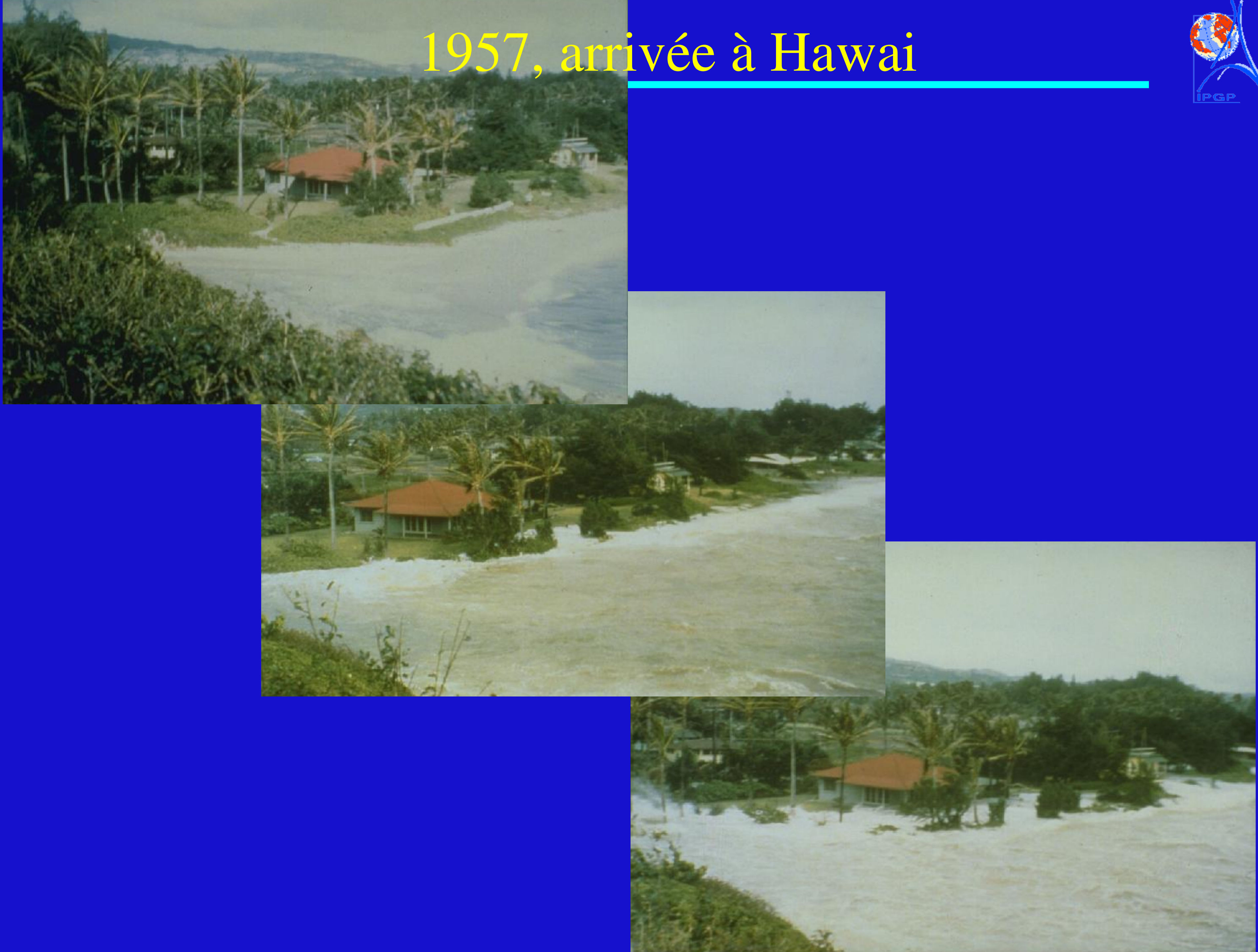
- Les vagues ne sont pas beaucoup plus hautes que les vagues de houle
  - mais les vagues de houle ne pénètrent pas à terre
  - les vagues de tsunami provoquent des **crues (et décrues) dévastatrices**


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

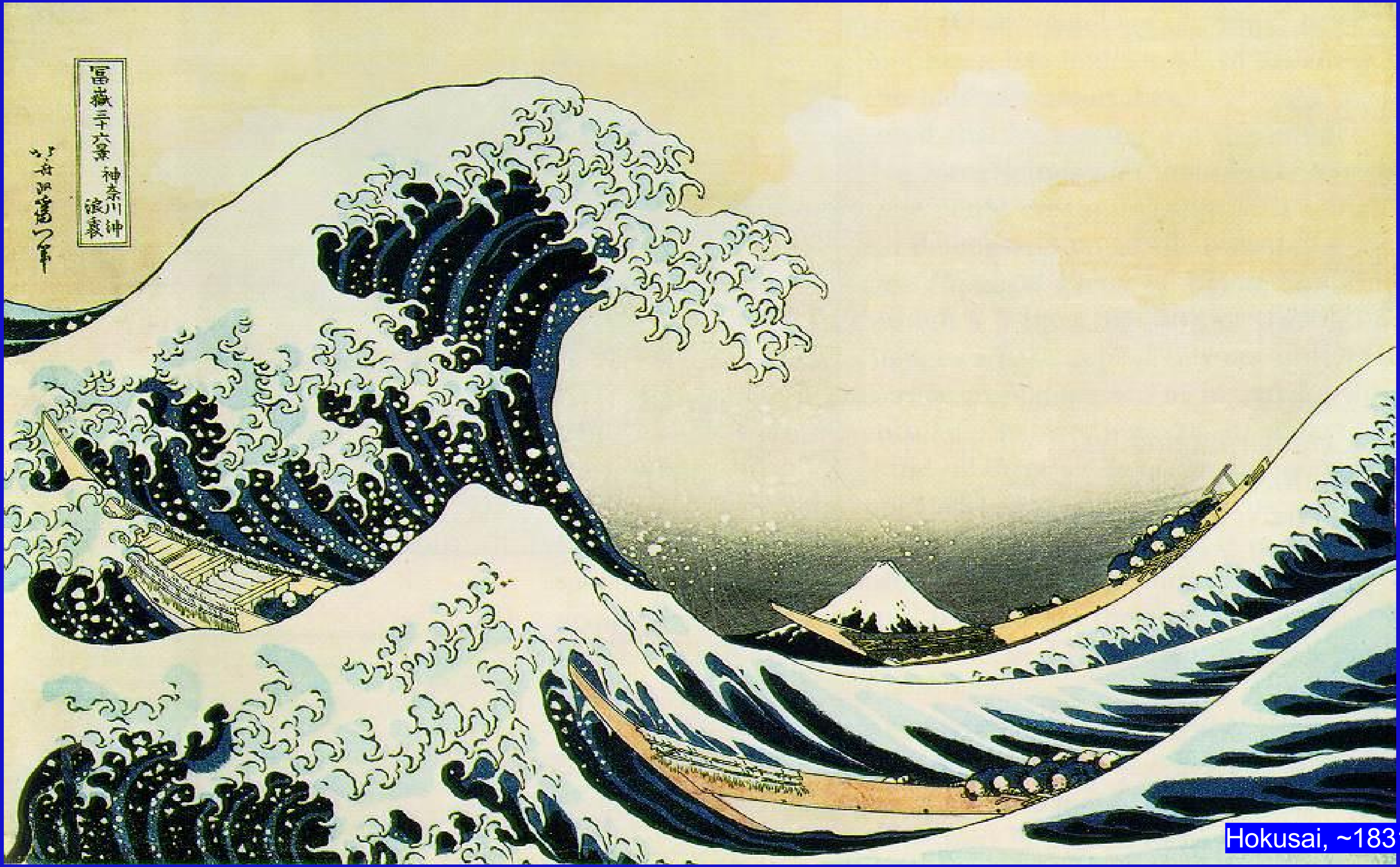
© University of Washington

- Même un tsunami qui semble petit peut être dangereux
  - le phénomène dure **plusieurs heures**
  - les vagues les plus hautes ne sont pas forcément les premières

1957, arrivée à Hawai



A quoi (ne) ressemble (pas) un tsunami ?

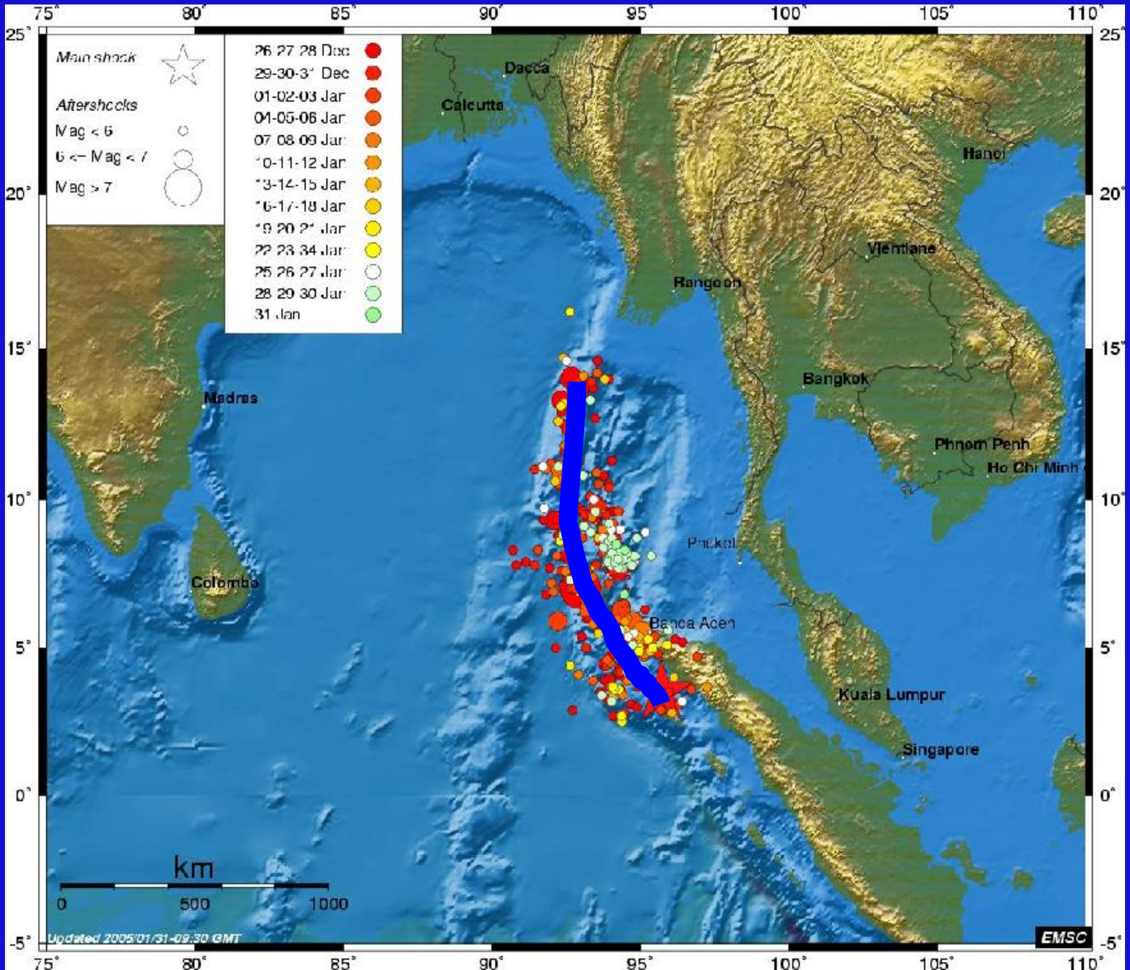

冨嶽三十六景 神奈川沖 浪裏
北斎改為一筆

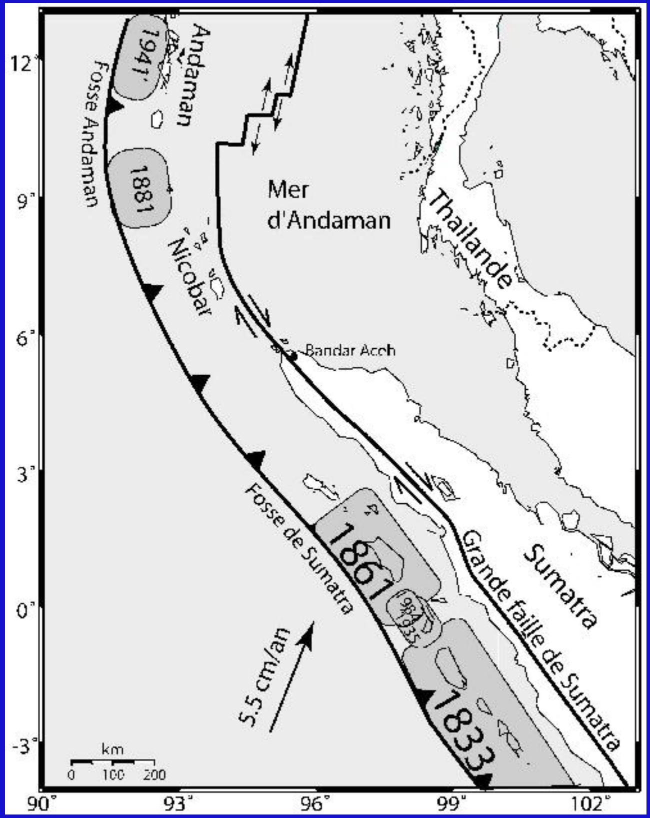
Hokusai, ~1831

Sumatra, Décembre 2004
le séisme

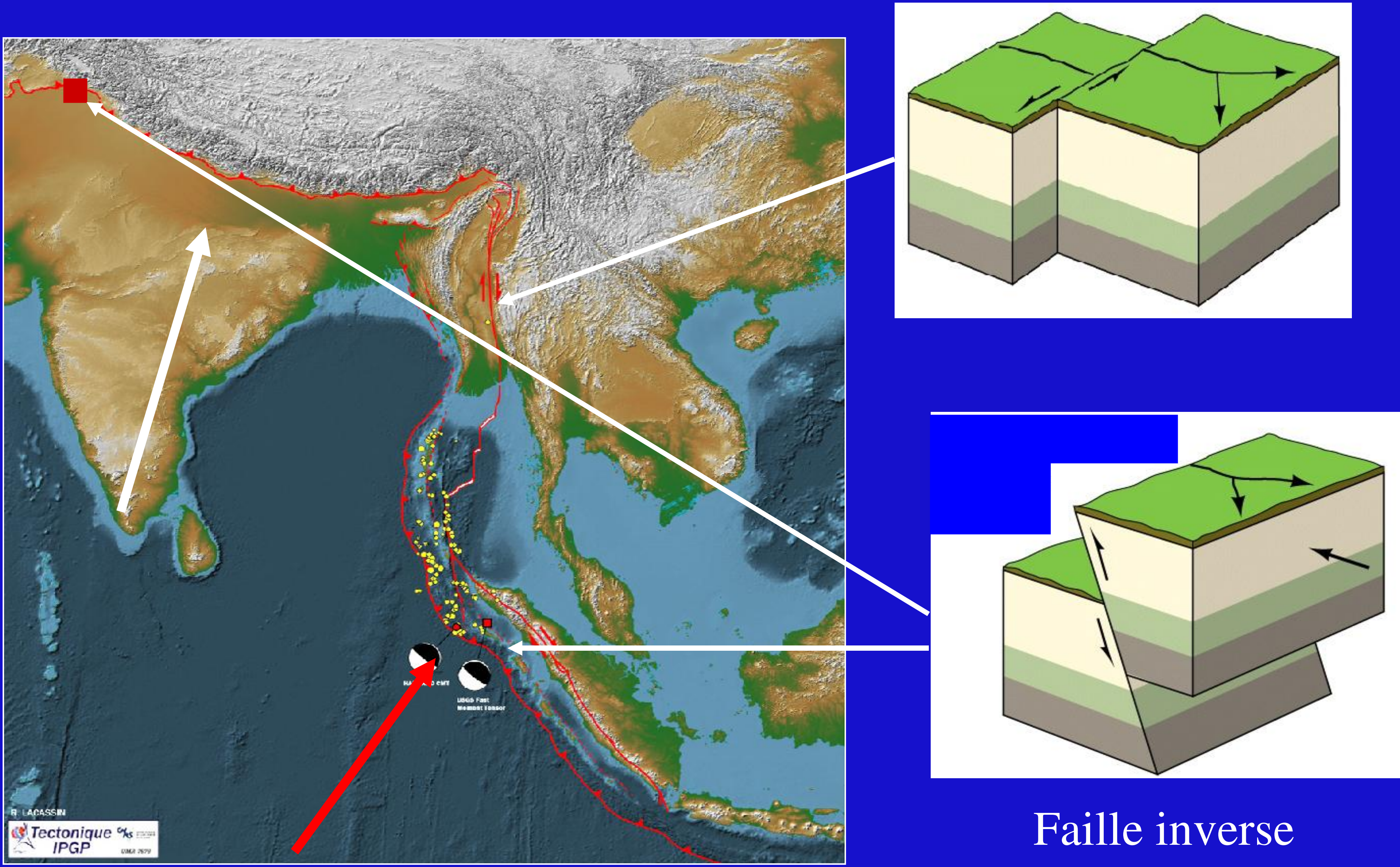
Sumatra, 26 décembre 2004

- Séisme de subduction majeur (Mw ~ 9.2) ➔ tsunami majeur
  - pas "attendu" dans l'Océan Indien
  - touche des zones très peuplées (dont touristes…)
  - enregistrements "modernes" innombrables


Main shock
Aftershocks
Mag < 6
6 <= Mag < 7
Mag > 7
26 27 28 Dec
29-30-31 Dec
01-02-03 Jan
04-05-06 Jan
07 08 09 Jan
10-11-12 Jan
13-14-15 Jan
16-17-18 Jan
19 20 21 Jan
22 23 24 Jan
25 26 27 Jan
28 29 30 Jan
31 Jan
Dacca
Calcutta
Hanoi
Vientiane
Rangoon
Bangkok
Madras
Colombo
Phuket
Phnom Penh
Ho Chi Minh
Banda Aceh
Kuala Lumpur
Singapore
km
0
500
1000
Updated 2005/01/31-09:30 GMT
EMSC
75°
80°
85°
90°
95°
100°
105°
110°
25°
20°
15°
10°
5°
0°
-5°

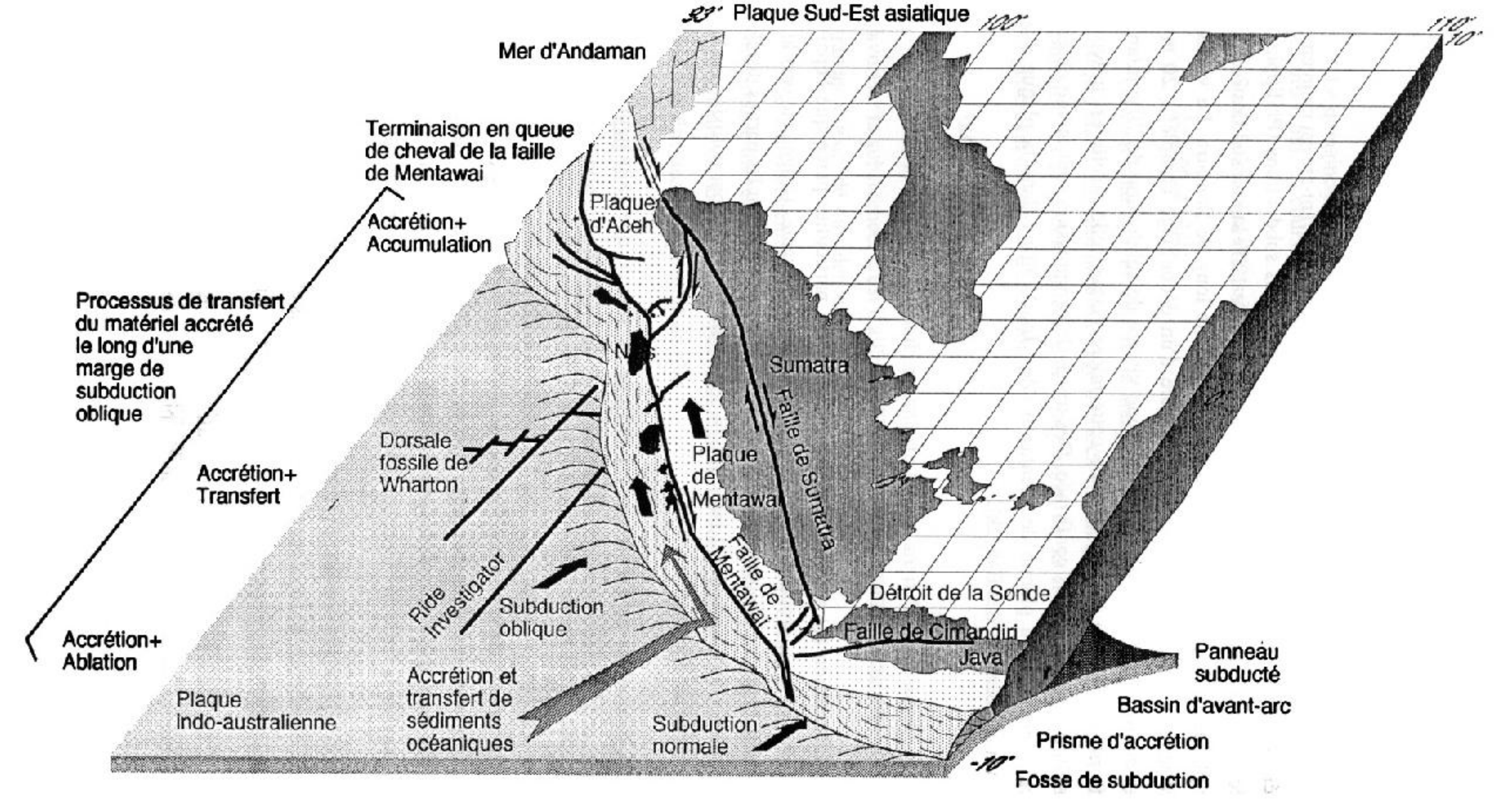

Andaman
Fosse Andaman
1941
1881
Nicobar
Mer d'Andaman
Thailande
Bandar Aceh
Fosse de Sumatra
1861
1984
1935
1833
Grande faille de Sumatra
Sumatra
5.5 cm/an
km
0
100
200
12°
9°
6°
3°
0°
-3°
90°
93°
96°
99°
102°

La zone du Nord Est de l'océan indien


HA… CMT
USGS Fast
Memont Tensor
R. LACASSIN
Tectonique
IPGP
UMR 7579

Faille inverse

Sumatra: frontière complèxe


Plaque Sud-Est asiatique
100°
110°
10°
Mer d'Andaman
Terminaison en queue de cheval de la faille de Mentawai
Plaque d'Aceh
Accrétion+ Accumulation
Processus de transfert du matériel accrété le long d'une marge de subduction oblique
Sumatra
Faille de Sumatra
Dorsale fossile de Wharton
Plaque de Mentawai
Accrétion+ Transfert
Faille de Mentawai
Ride Investigator
Subduction oblique
Détroit de la Sonde
Faille de Cimandiri
Java
Accrétion+ Ablation
Panneau subducté
Plaque Indo-australienne
Accrétion et transfert de sédiments océaniques
Bassin d'avant-arc
Subduction normale
Prisme d'accrétion
-10°
Fosse de subduction

D’après la thèse (Paris 6) d’un étudiant indonésien Kemal Badrul (1993)

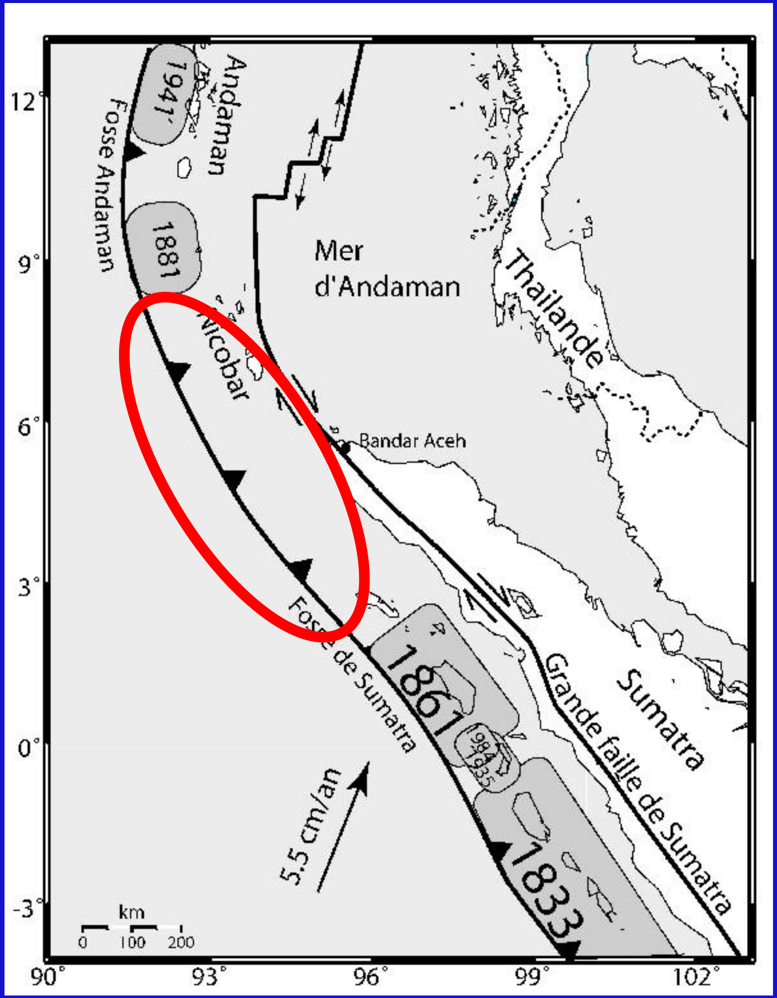
Convergence de la plaque à 5.5 cm/an

Une histoire chargée

La subduction de Sumatra est affectée par de forts séismes. La zone affectée le 26 décembre n'avait pas rompu historiquement !

Pas de séisme dans cette zone depuis plus de 300 ans

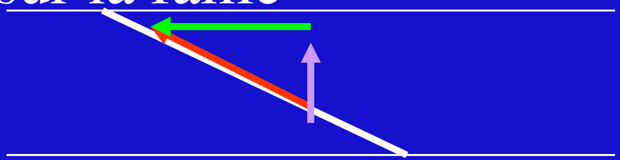
=> 5cm/an X 300 ans = 15 m de déformation accumulée


12°
9°
6°
3°
0°
-3°
90°
93°
96°
99°
102°
1941
Andaman
Fosse Andaman
1881
Mer d'Andaman
Thailande
Nicobar
Bandar Aceh
Fosse de Sumatra
1861
1984
1935
1833
Sumatra
Grande faille de Sumatra
5.5 cm/an
km
0
100
200

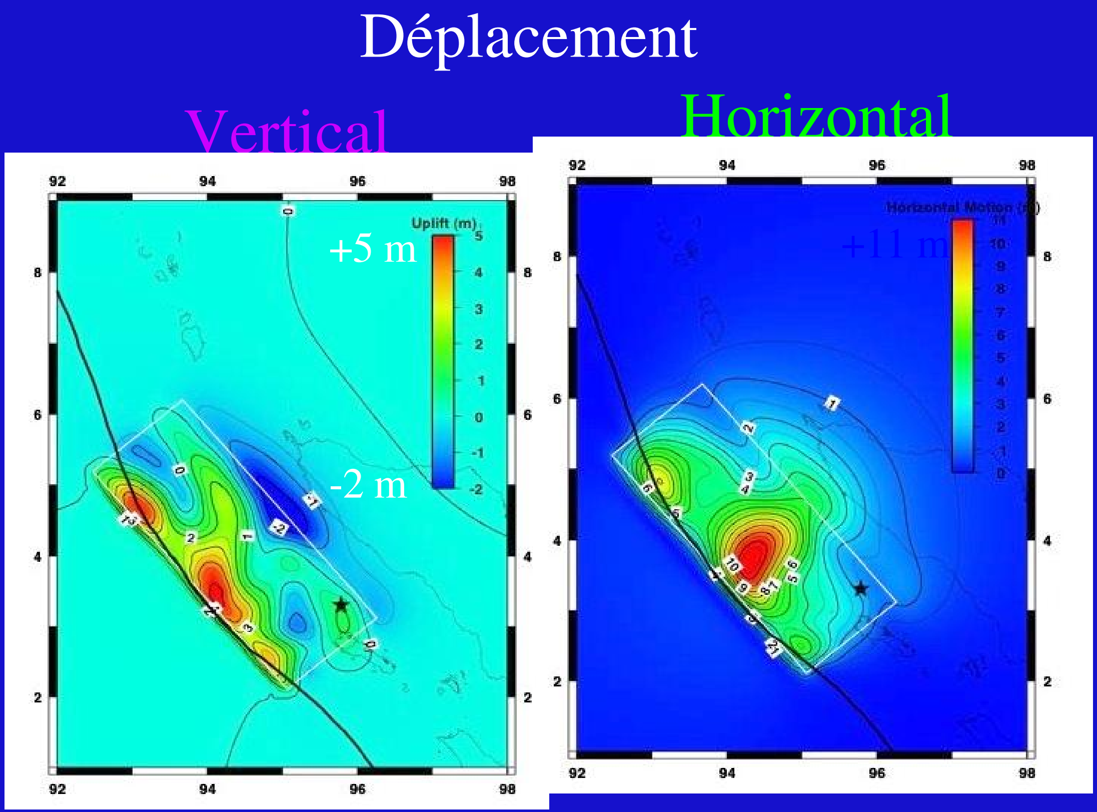
D'après le site du CEA-DASE

La faille a « glissé »

- 15-20 m de glissement sur la faille

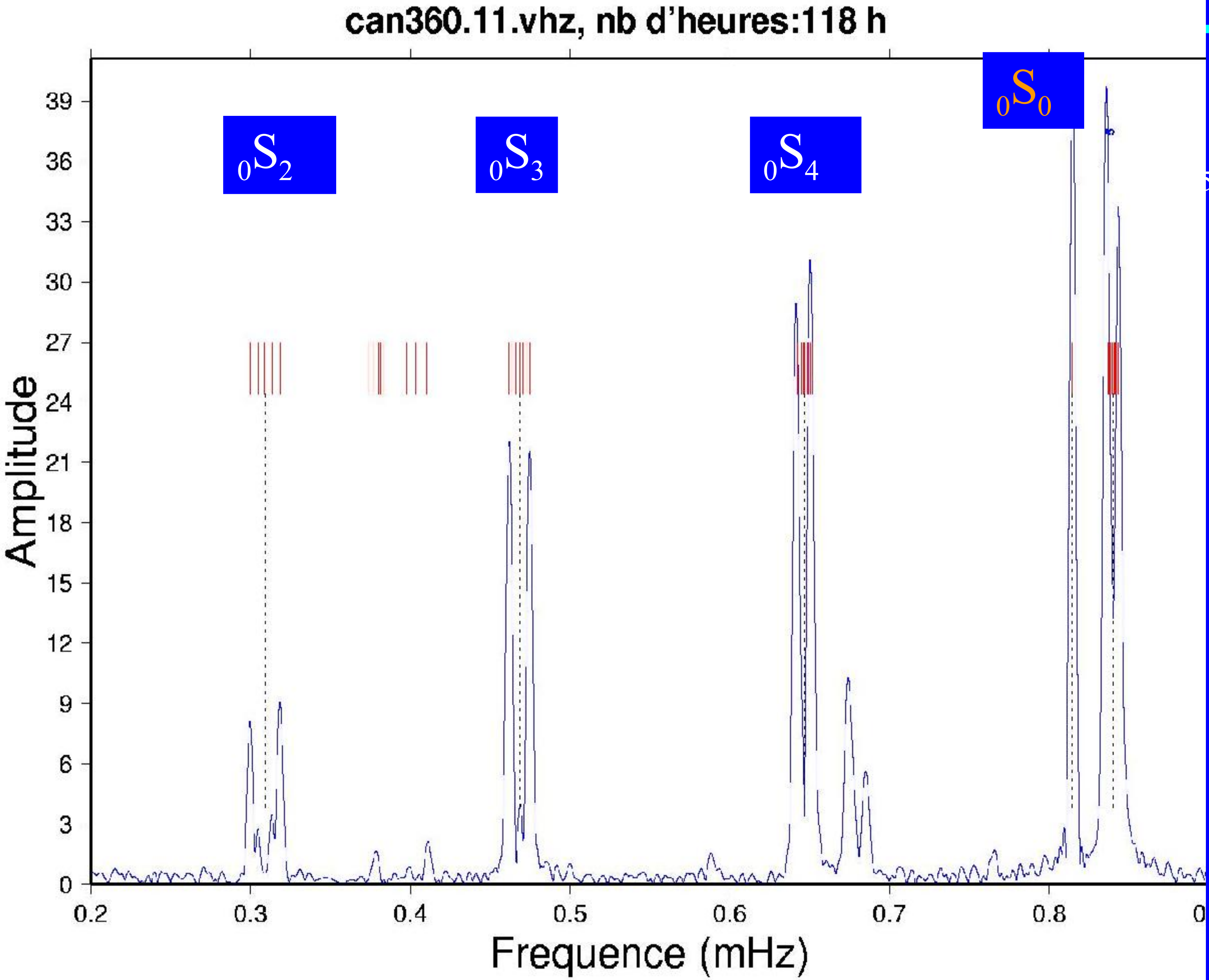


- sur 400 à 1000 km de longueur
- durant 4 à 8 minutes

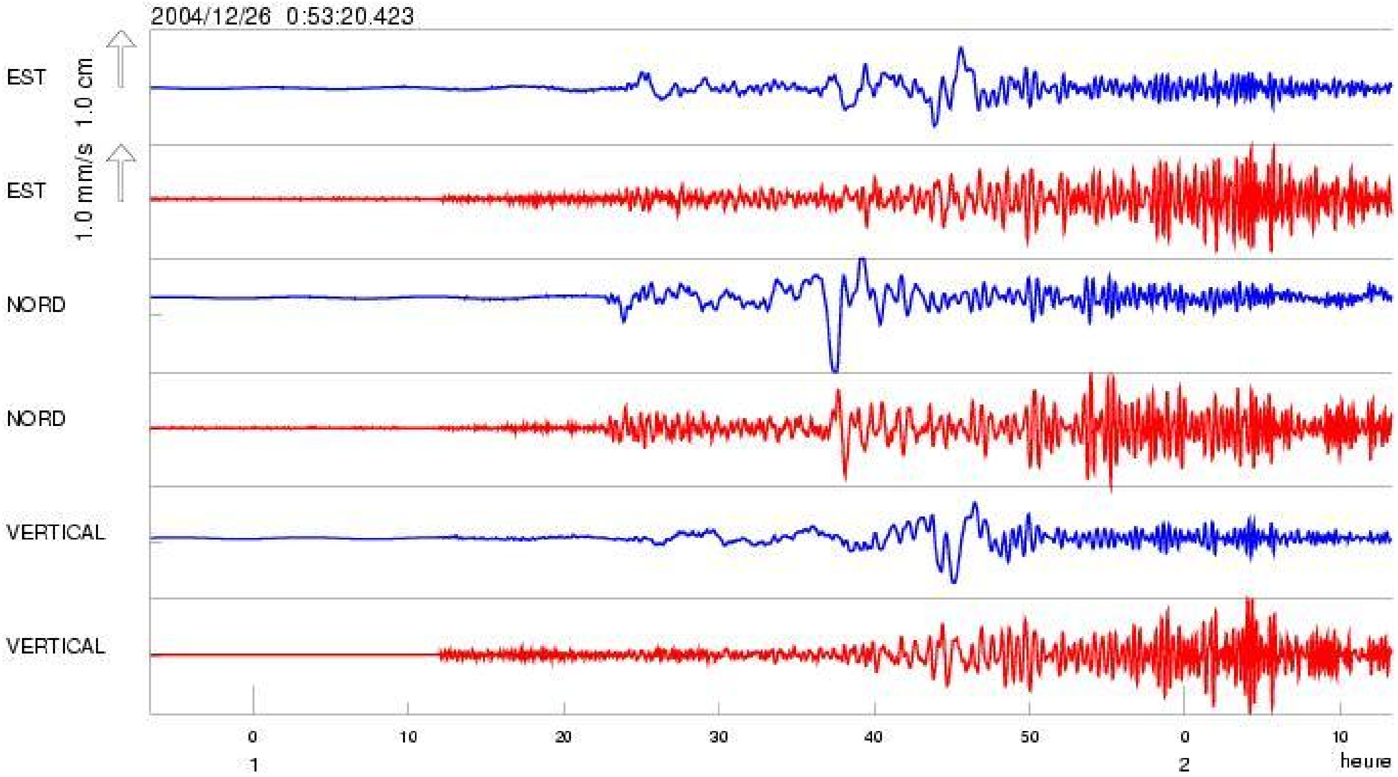

Déplacement
Vertical
Horizontal
Uplift (m)
+5 m
-2 m
Horizontal Motion (m)
+11 m
92
94
96
98
2
4
6
8

D'après le California Institute of technology

Energie du séisme M=9.0 soit 20 .10^{17} Joules
(ou encore 475 Mt TNT= 23000 fois la bombe d'Hiroshima)


can360.11.vhz, nb d'heures:118 h
$_0S_2$
$_0S_3$
$_0S_4$
$_0S_0$
Amplitude
0
3
6
9
12
15
18
21
24
27
30
33
36
39
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
Frequence (mHz)

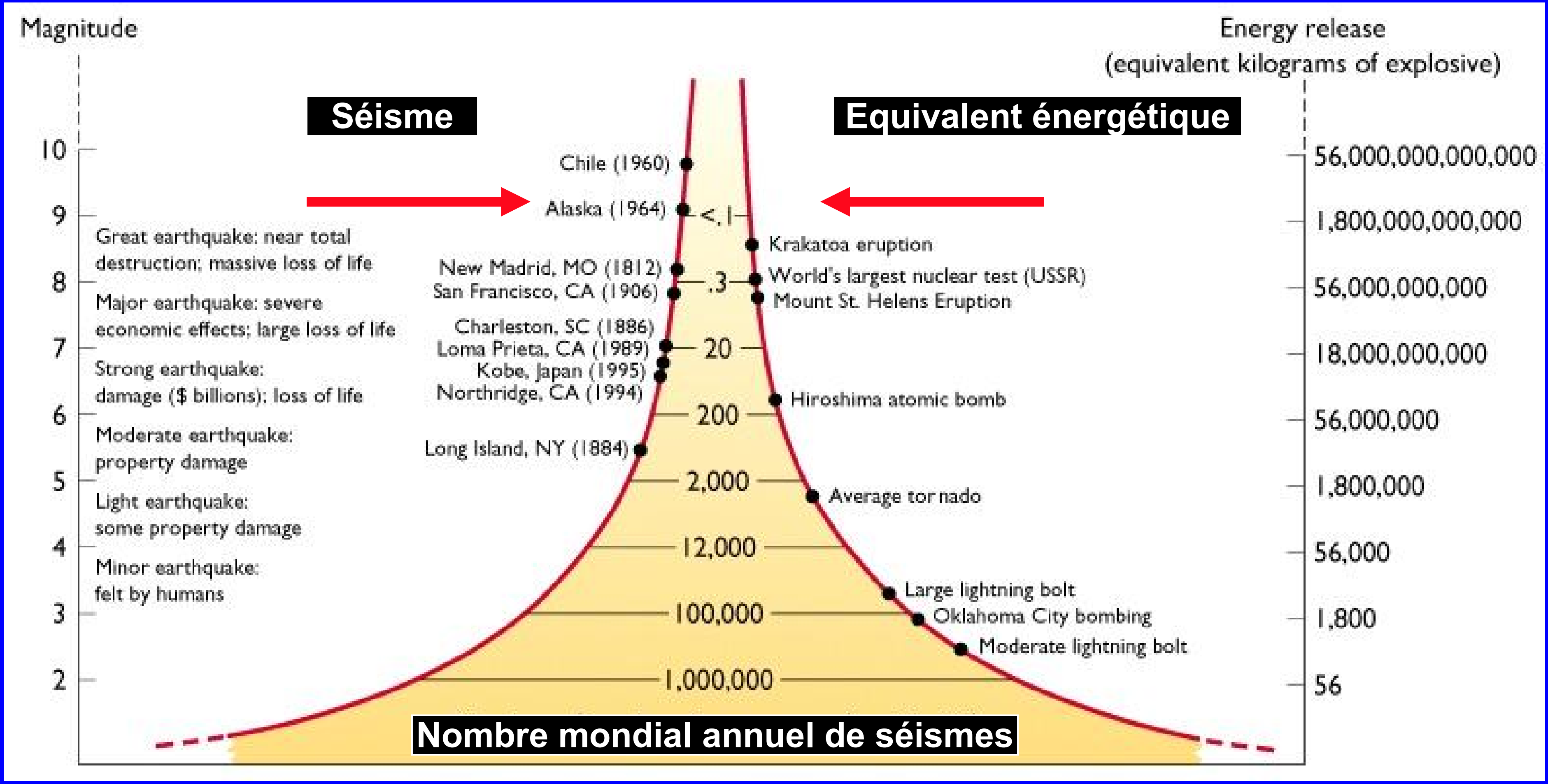
Déplacements sismiques observés en France



Vitesse du sol enregistrée par un STS2 à St Maur (rouge) et déplacement calculé (bleu).

Magnitude de Richter et énergie

Nombre annuel de séismes et énergie



Séisme

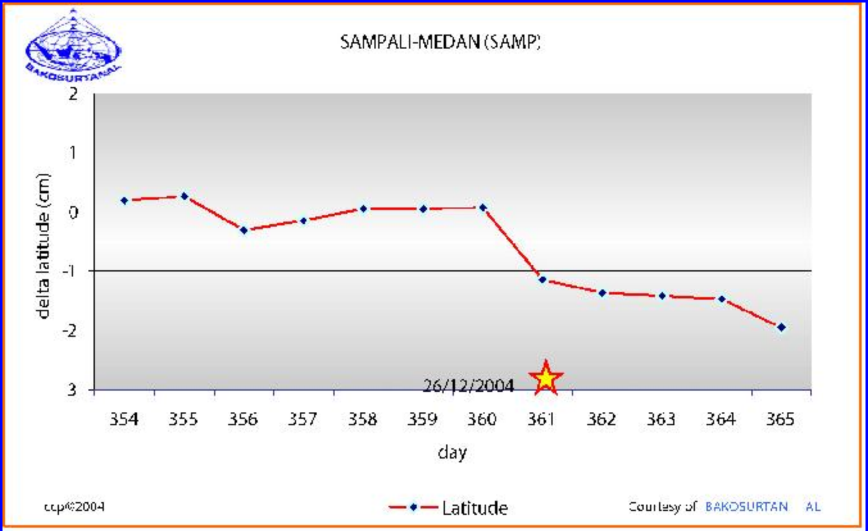
Equivalent énergétique

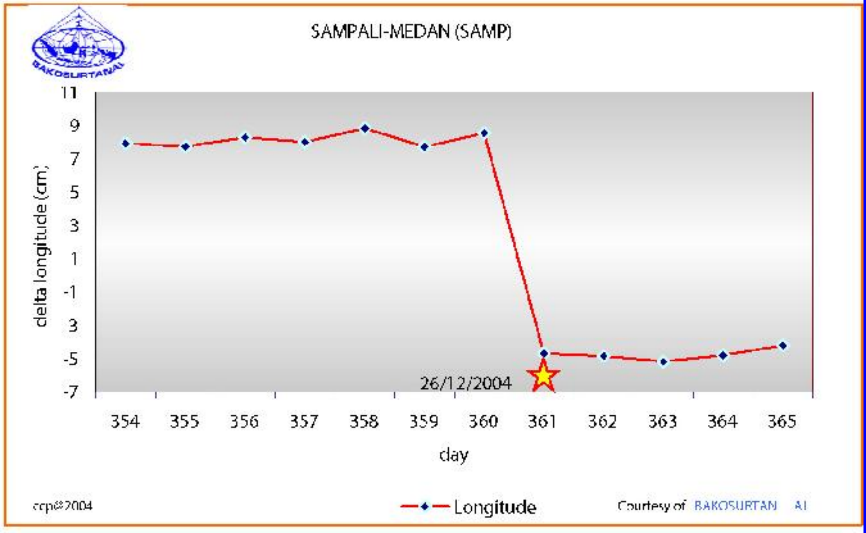
Nombre mondial annuel de séismes

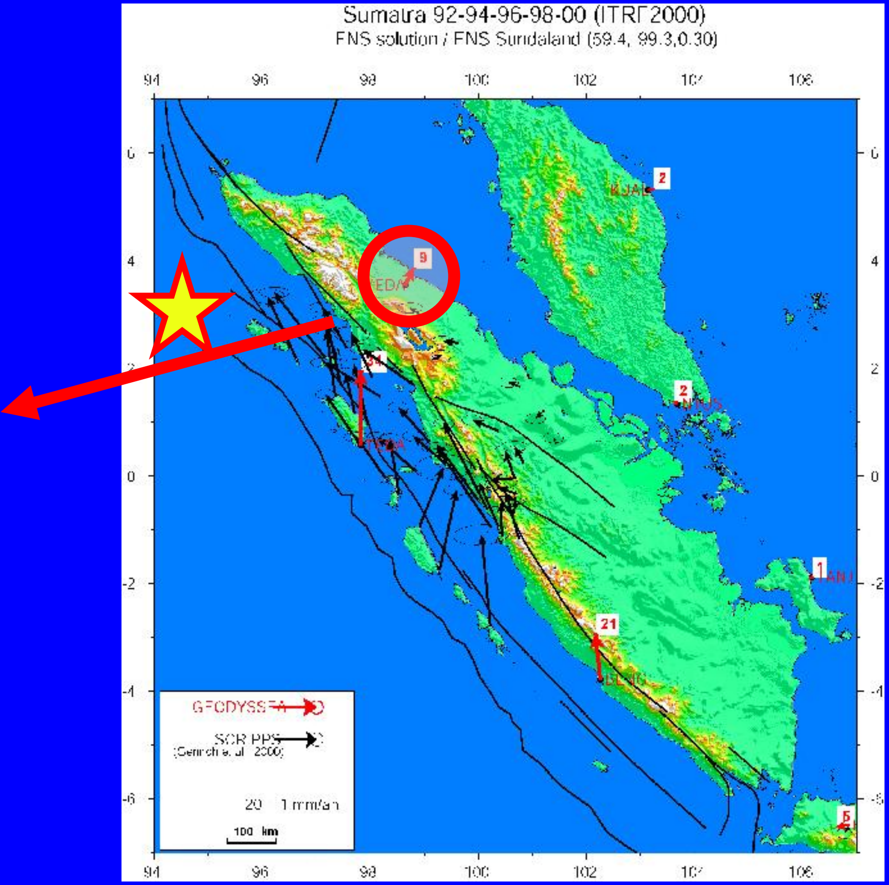
(1 mégatonne (Mt) = 10^9kg)

Le tsunami

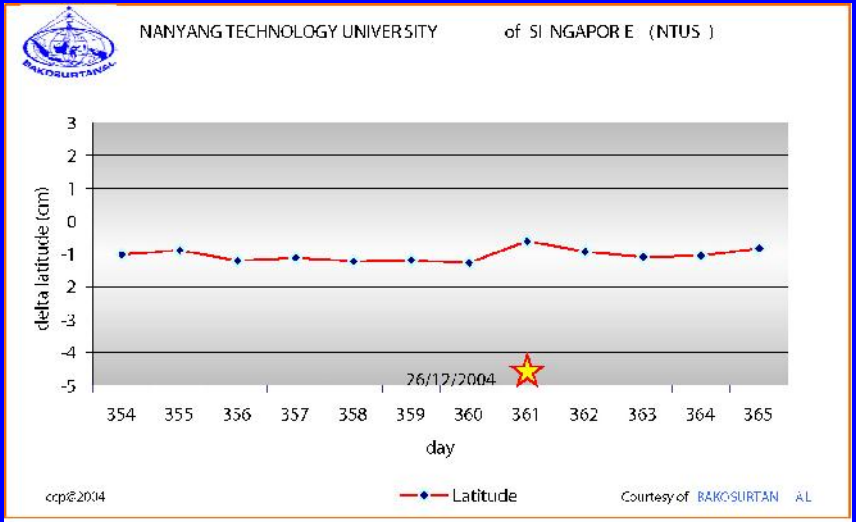
Déplacement cosismique – Station SAMP

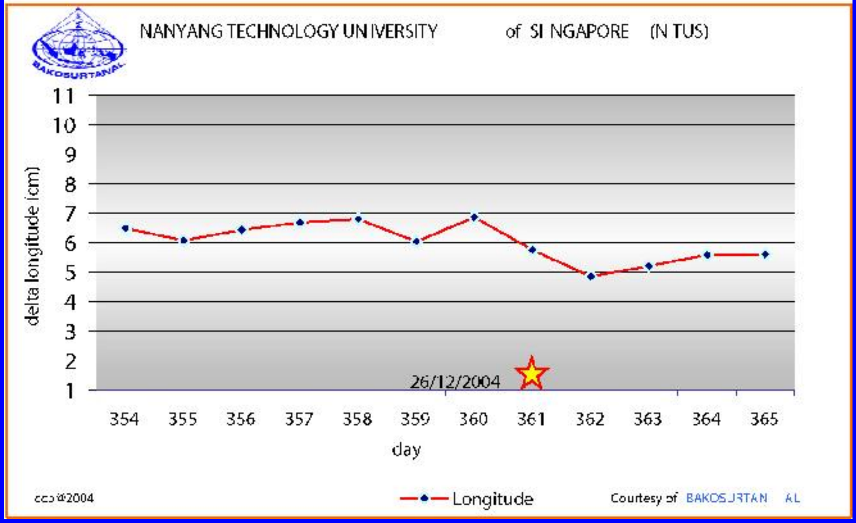


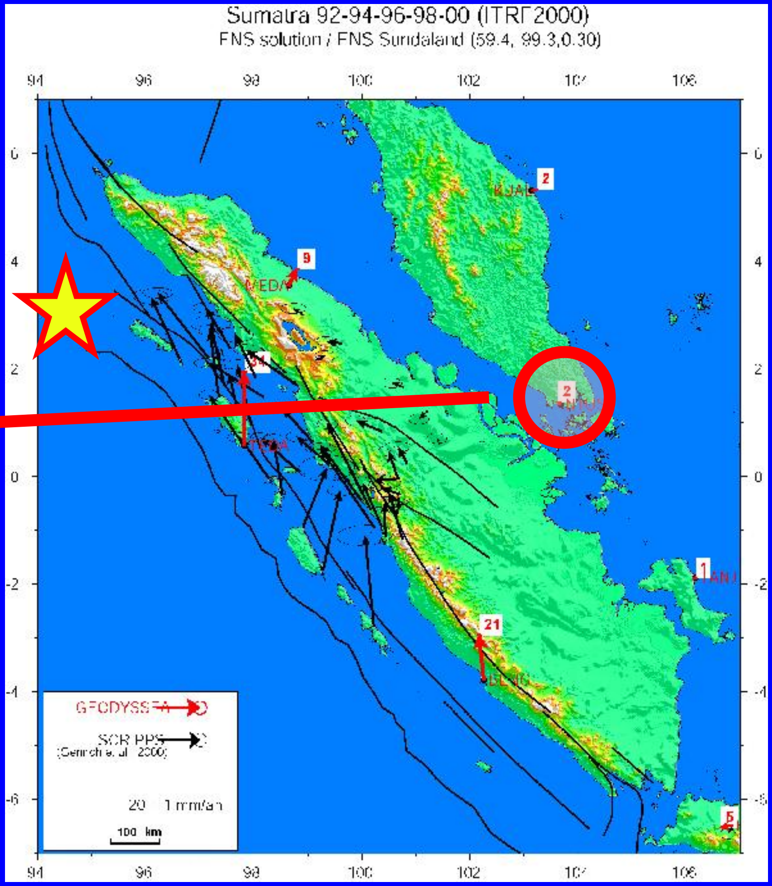



Sumatra 92-94-96-98-00 (ITRF2000)
FNS solution / FNS Sundaland (59.4, 99.3,0.30)
94
96
98
100
102
104
106
6
4
2
0
-2
-4
-6
9
MEDA
31
TEDA
2
KUAL
2
NTUS
1
21
BENG
5
GEODYSSEA
SCR PPS
(Genrich et al. 2000)
20 ± 1 mm/an
100 km

Déplacement cosismique - Singapour

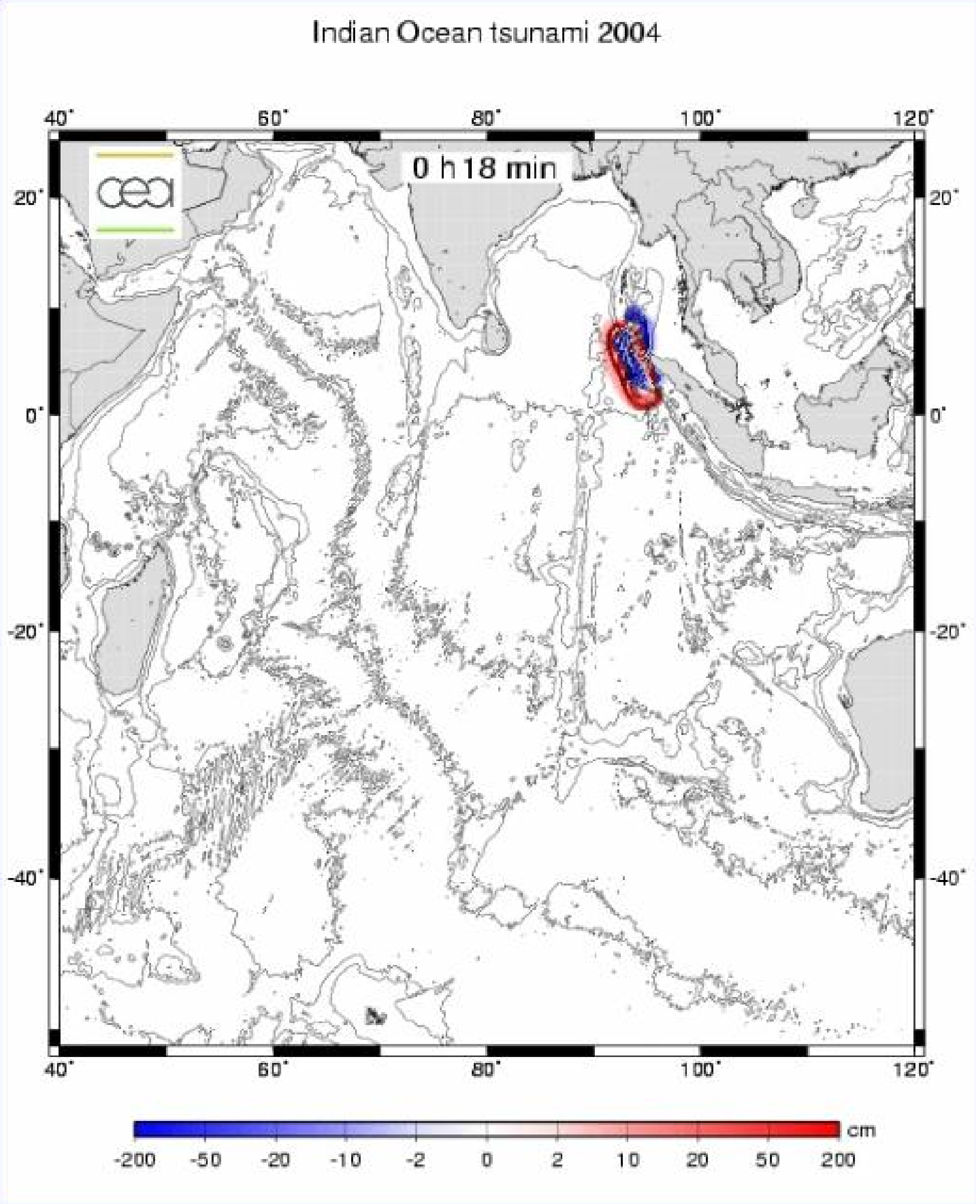





Sumatra 92-94-96-98-00 (ITRF2000)
FNS solution / FNS Sundaland (59.4, 99.3,0.30)
94
96
98
100
102
104
106
6
4
2
0
-2
-4
-6
2
KUAL
9
MEDA
31
TEDA
2
NTUS
1
ANI
21
BENG
5
GEODYSSEA
SCR PPS
(Genrich et al. 2000)
20 ± 1 mm/an
100 km

Modélisation:

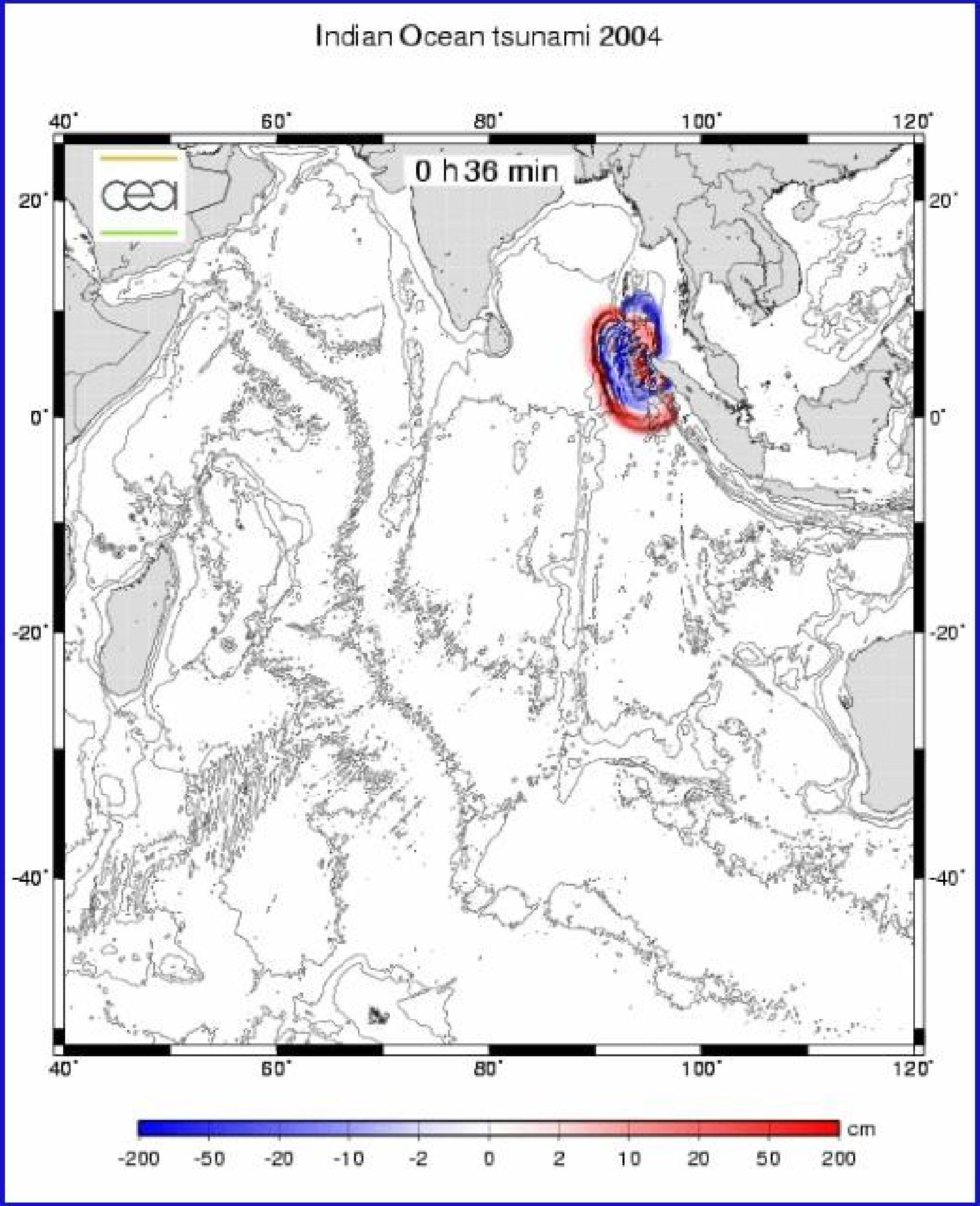
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
0 h 18 min
cea
40˚
60˚
80˚
100˚
120˚
20˚
0˚
-20˚
-40˚
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

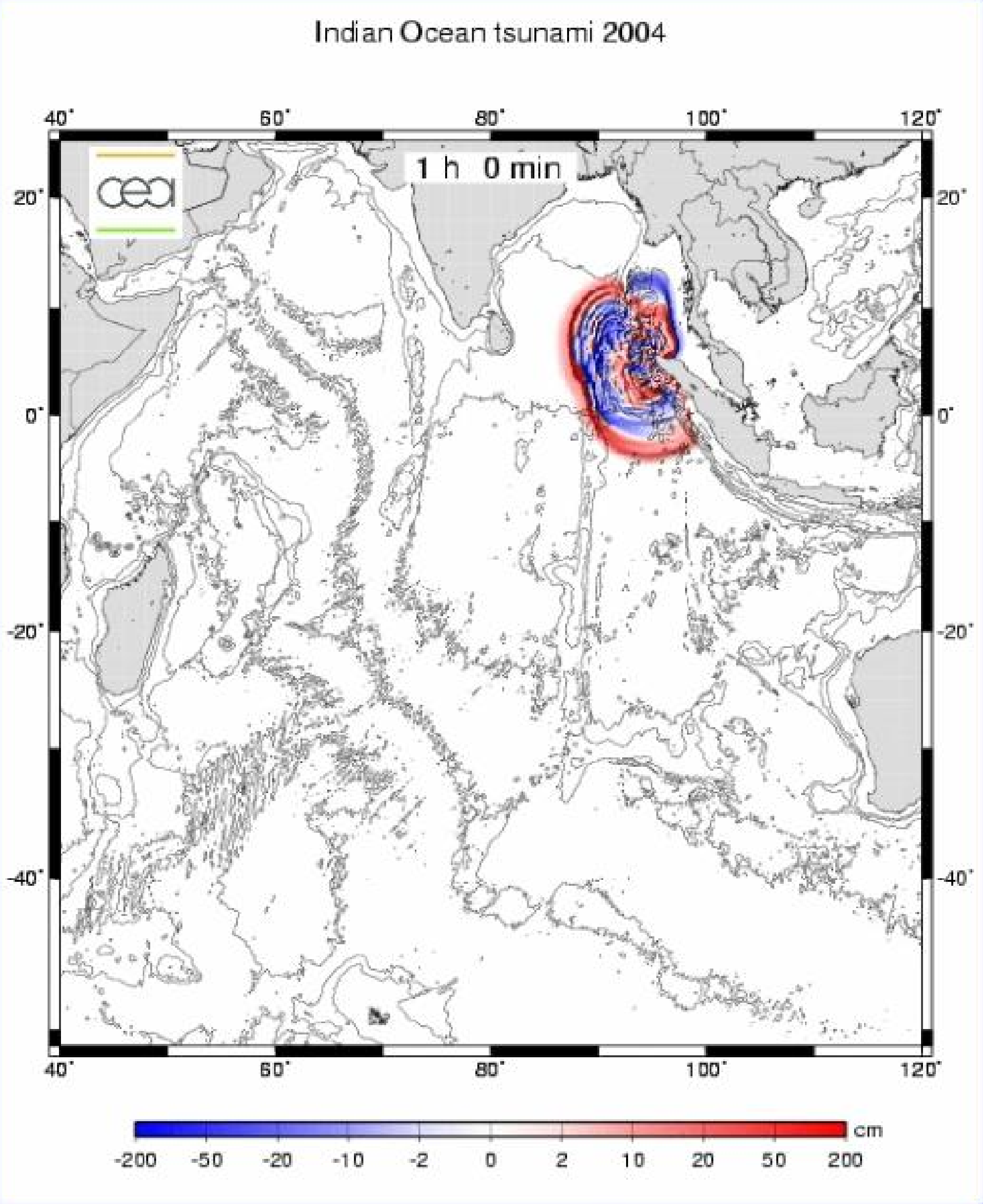
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
0 h 36 min
cea
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

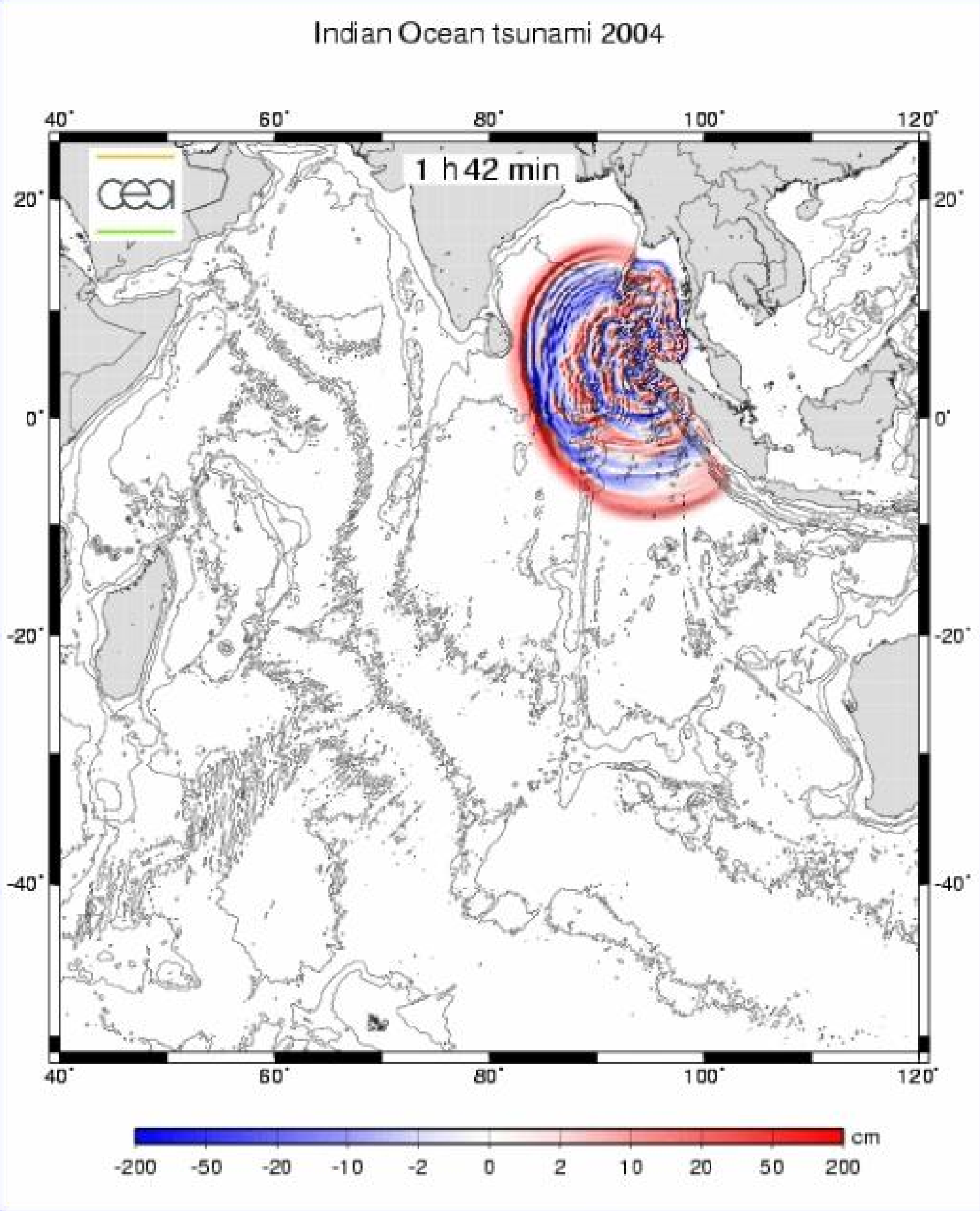
D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
1 h 0 min
cea
40˚
60˚
80˚
100˚
120˚
20˚
0˚
-20˚
-40˚
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

-2 m Hauteur d’eau 2 m

Modélisation:

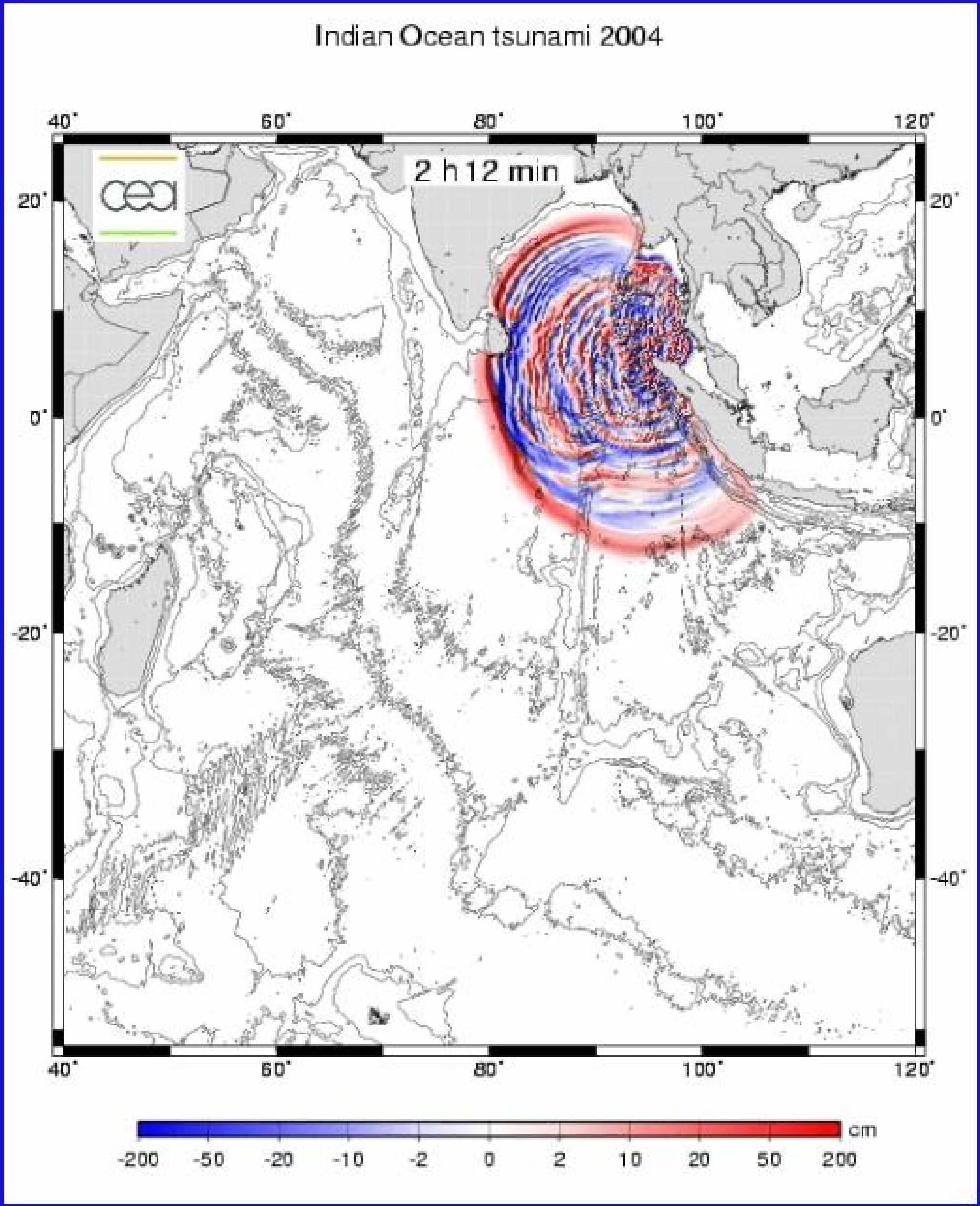
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
1 h42 min
cea
40° 60° 80° 100° 120°
20° 0° -20° -40°
-200 -50 -20 -10 -2 0 2 10 20 50 200
cm

-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

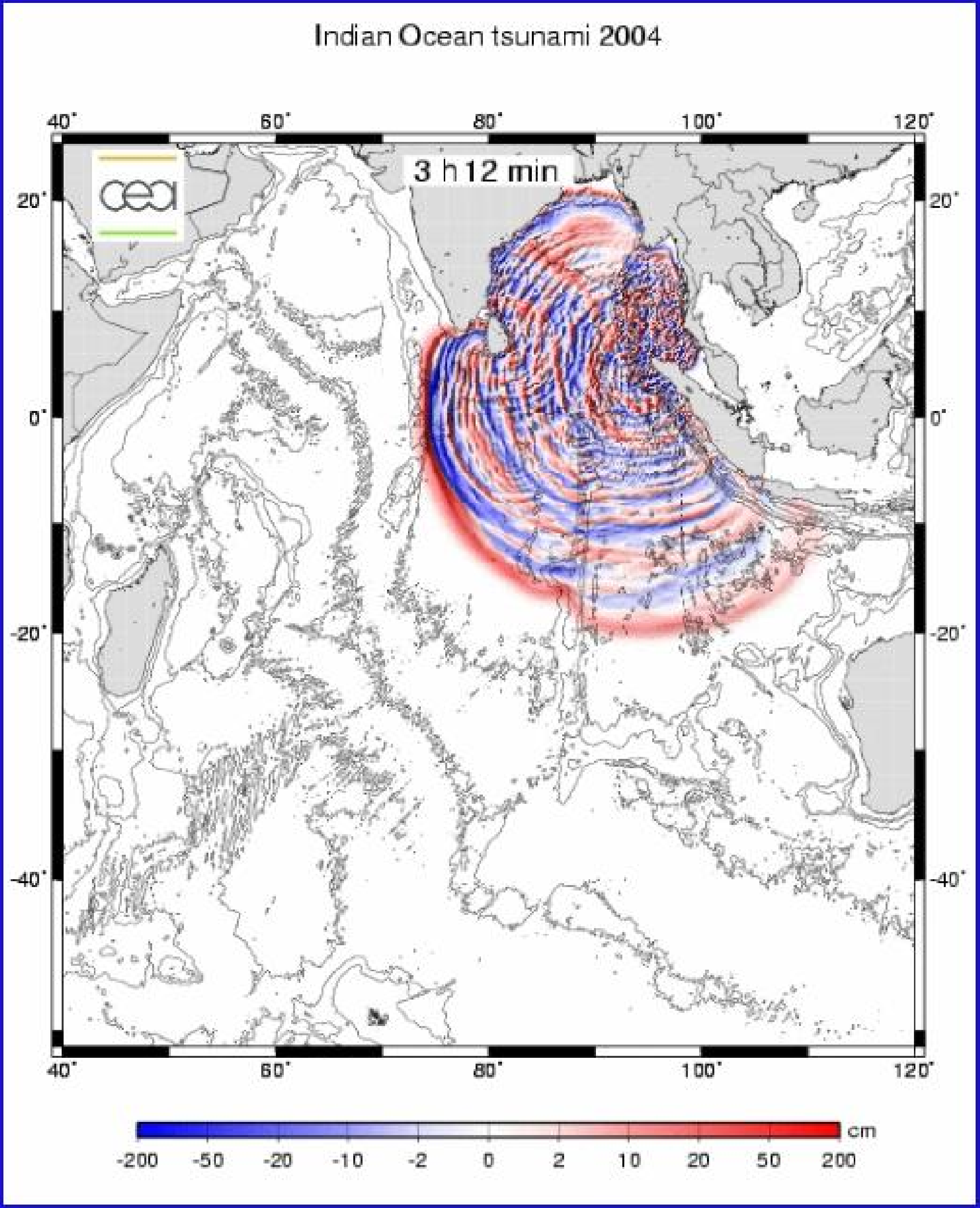
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
2 h 12 min
cea
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

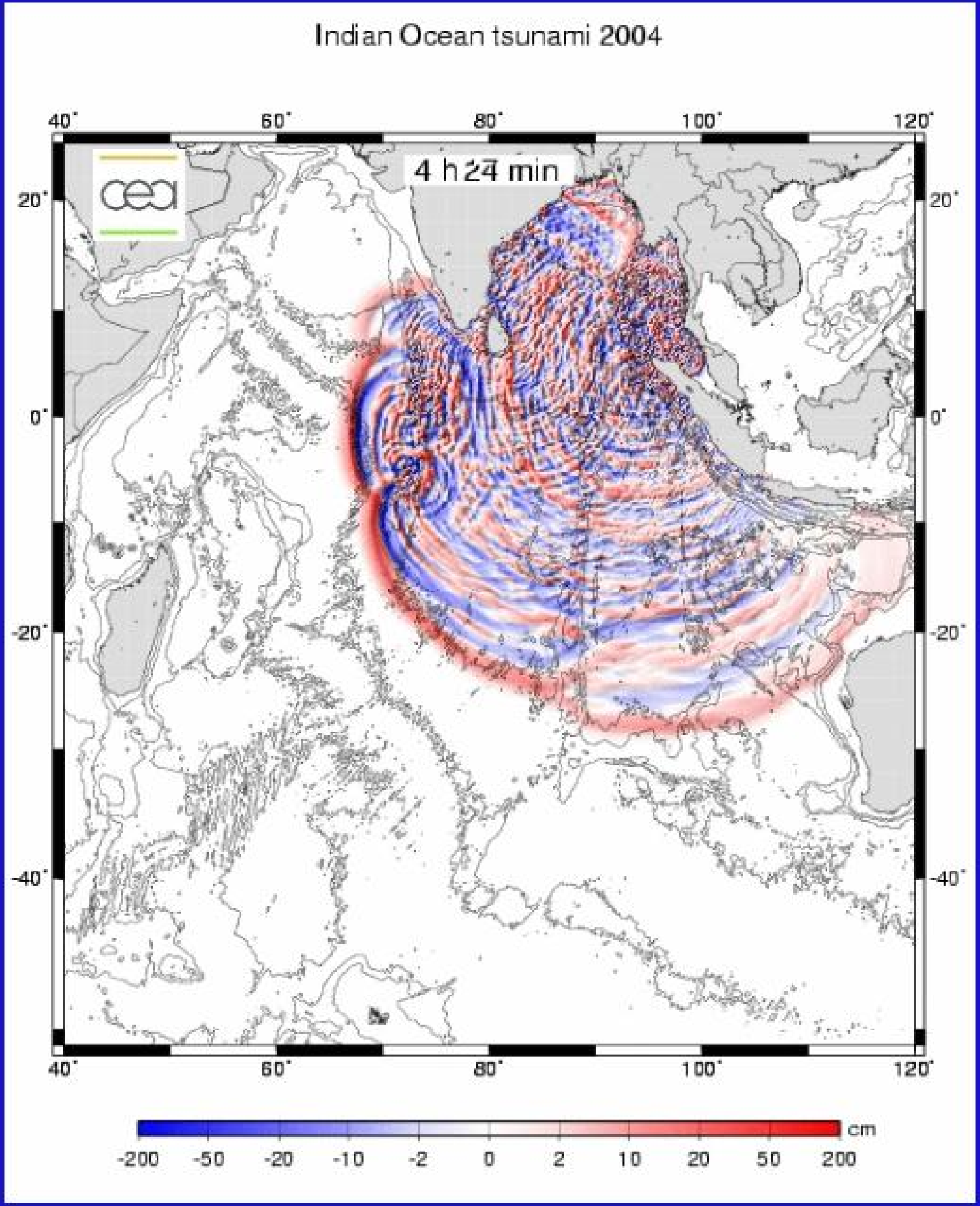
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
3 h 12 min
cea
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

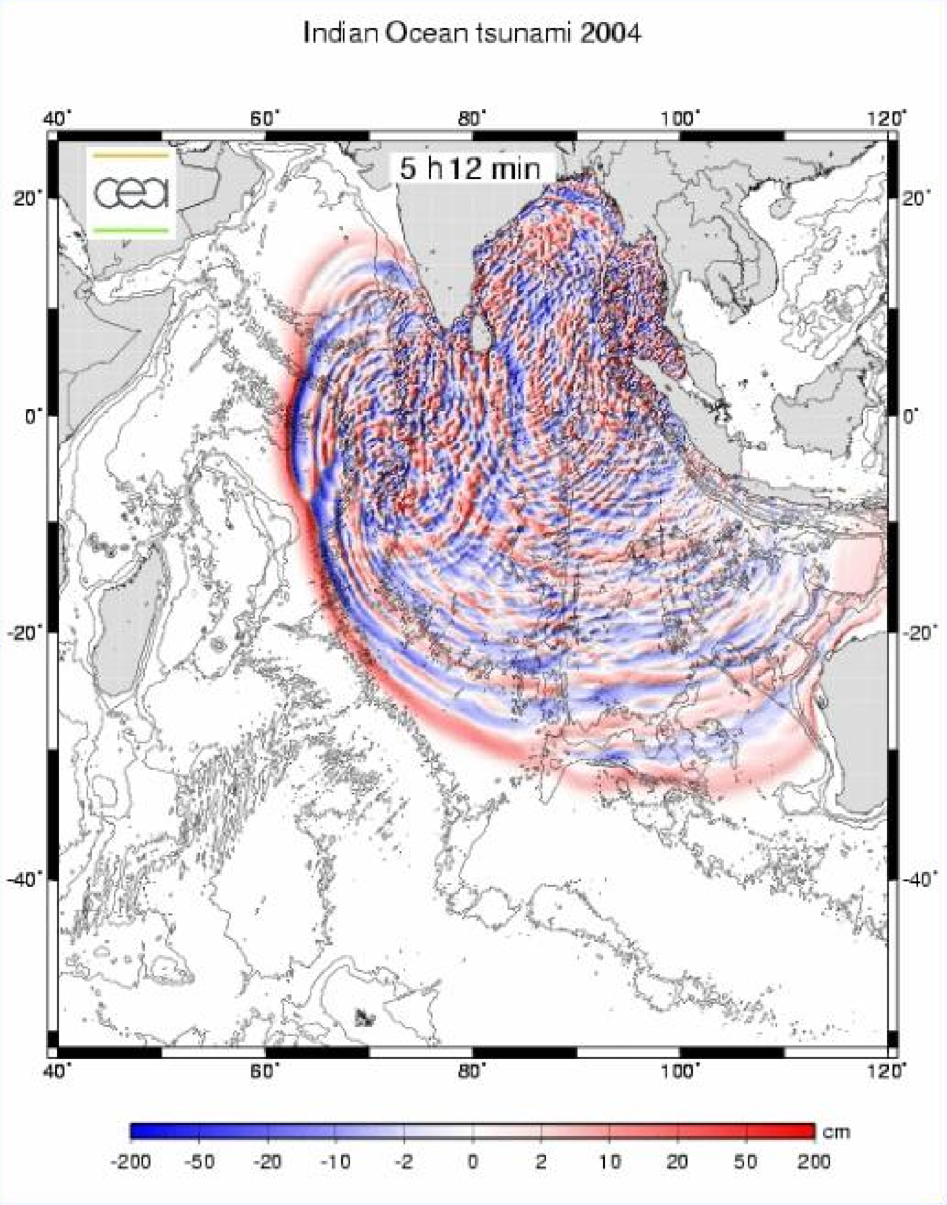
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
4 h 24 min
cea
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

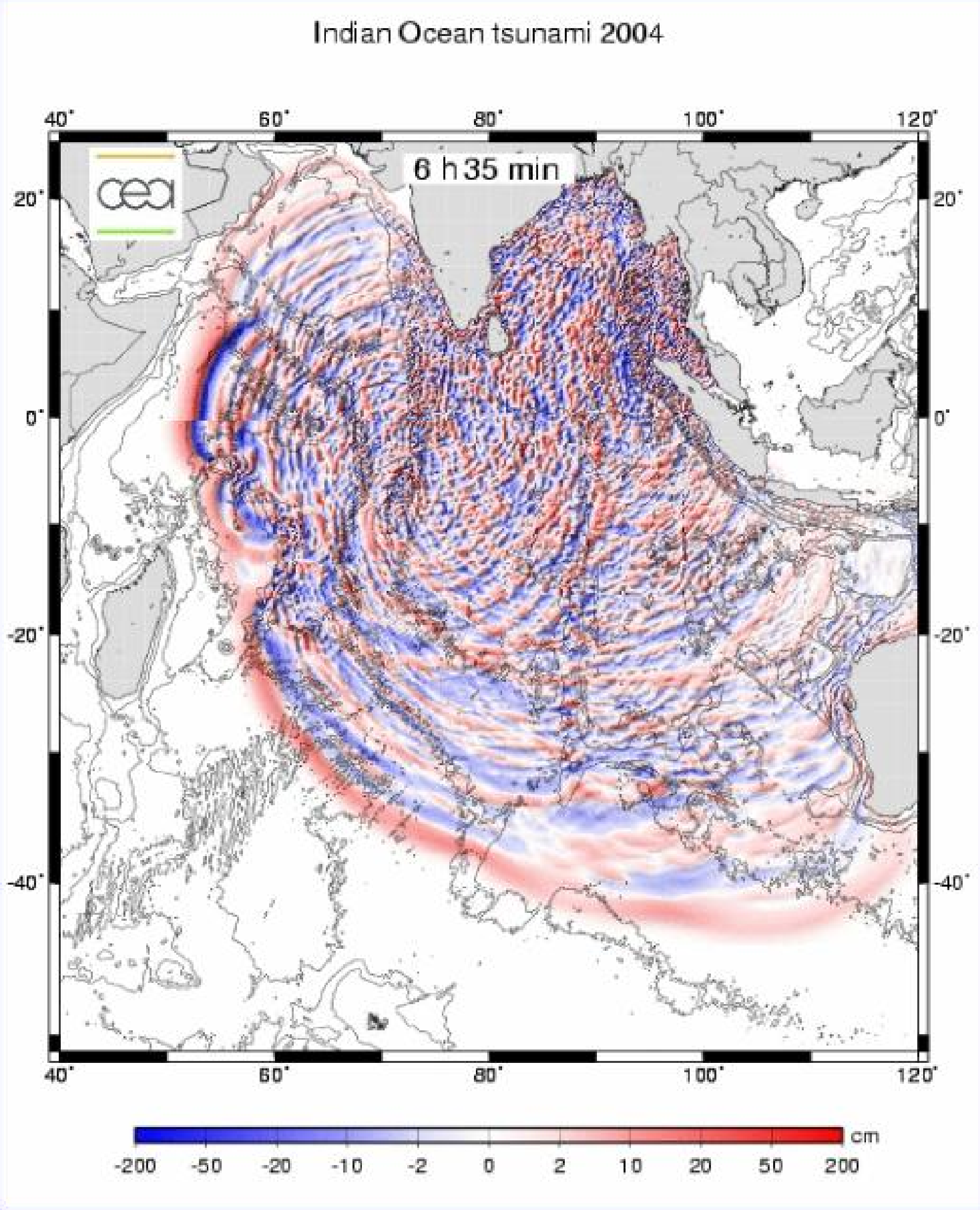
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
5 h 12 min
cea
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

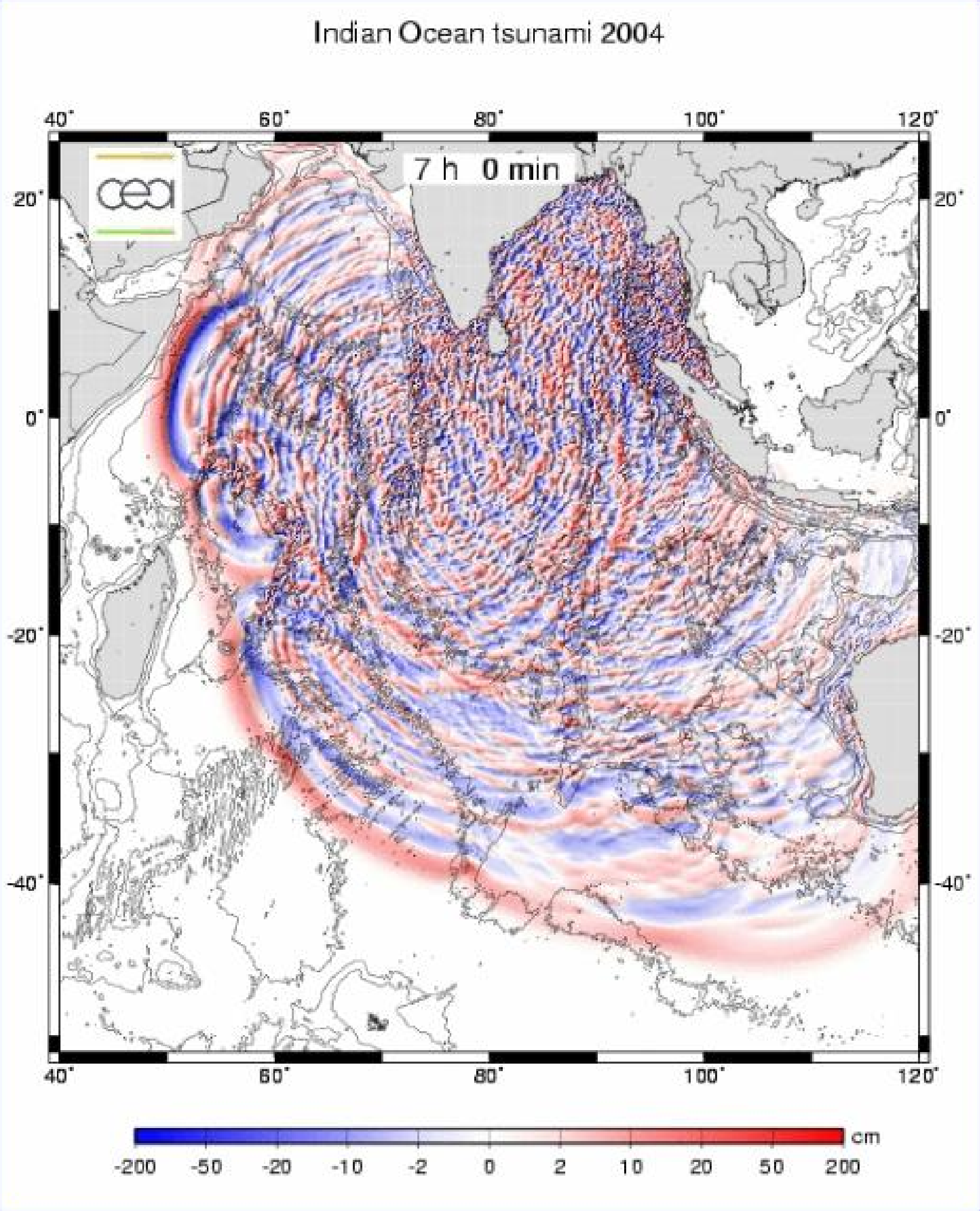
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
6 h 35 min
cea
40˚
60˚
80˚
100˚
120˚
20˚
0˚
-20˚
-40˚
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

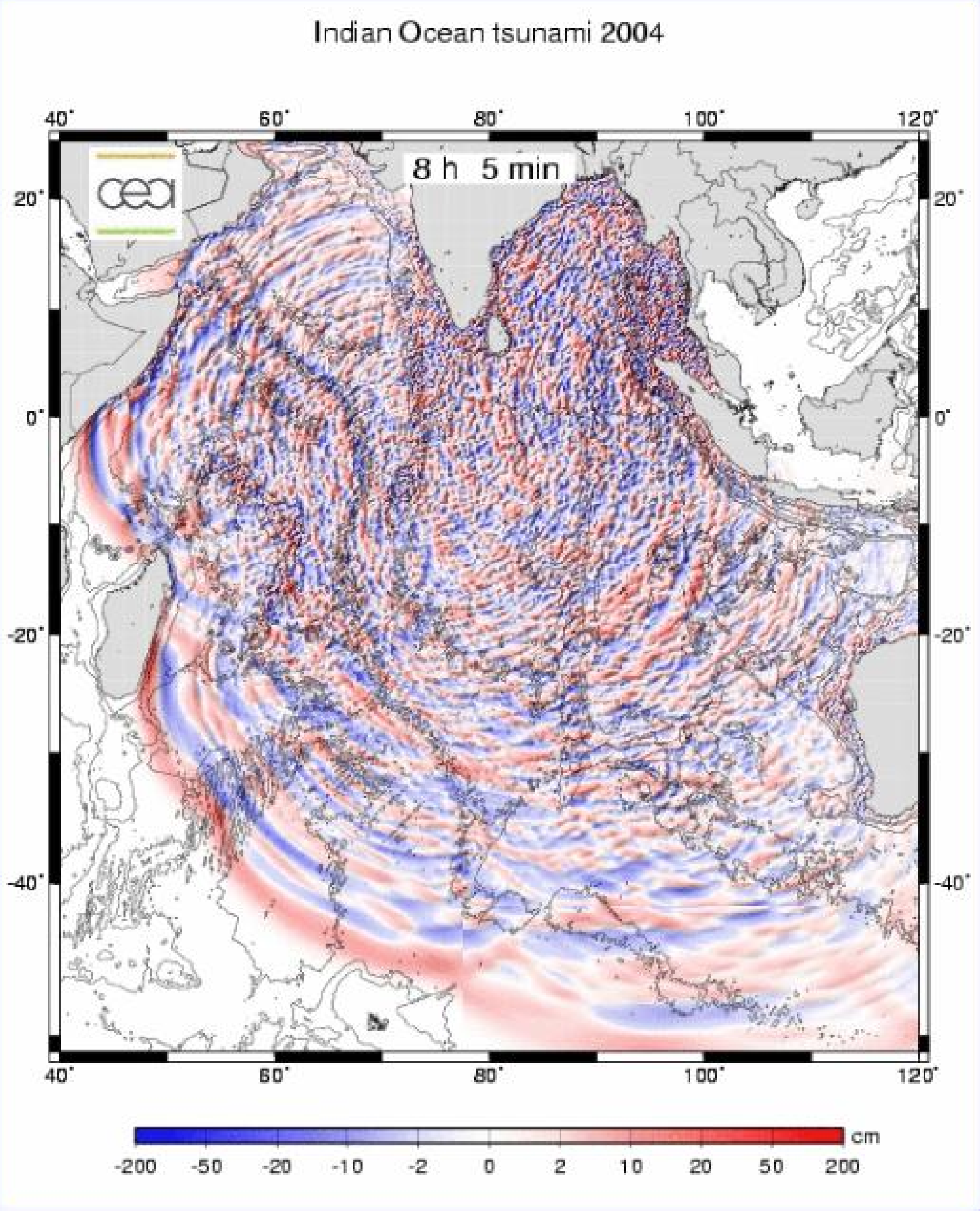
D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
7 h 0 min
cea
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200
cm

-2 m Hauteur d’eau 2 m

Modélisation:

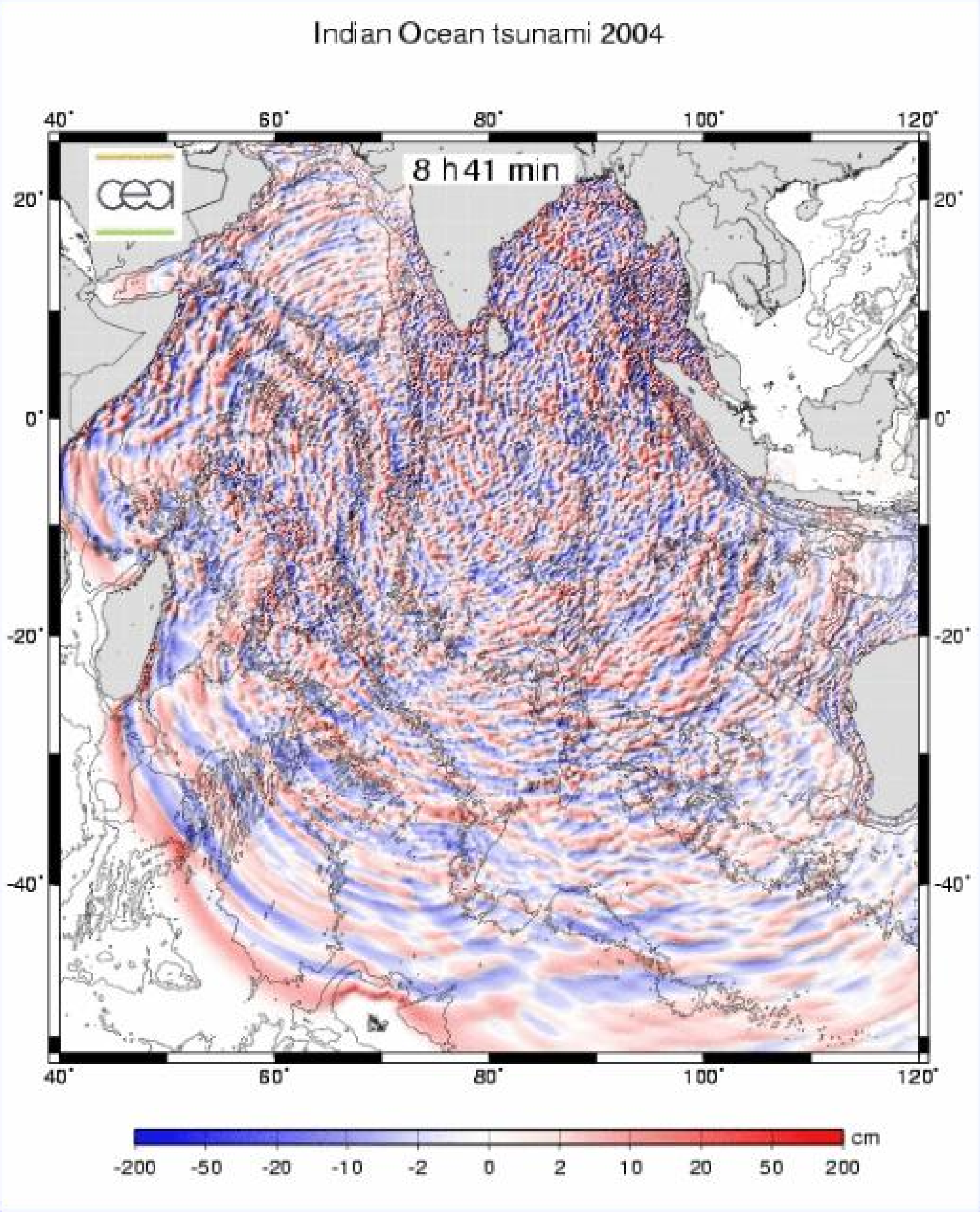
D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
8 h 5 min
cea
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

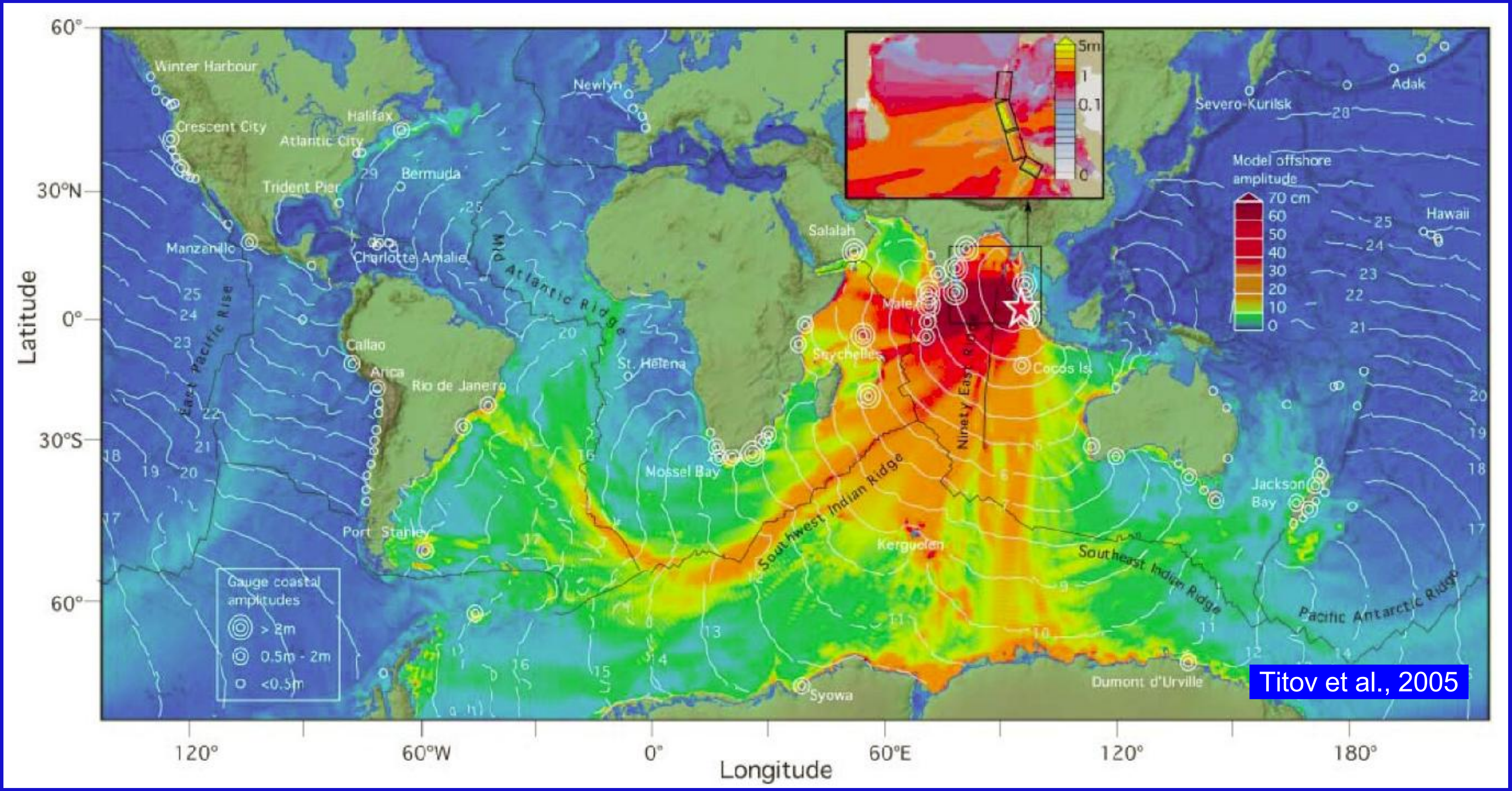
-2 m Hauteur d'eau 2 m

Modélisation:

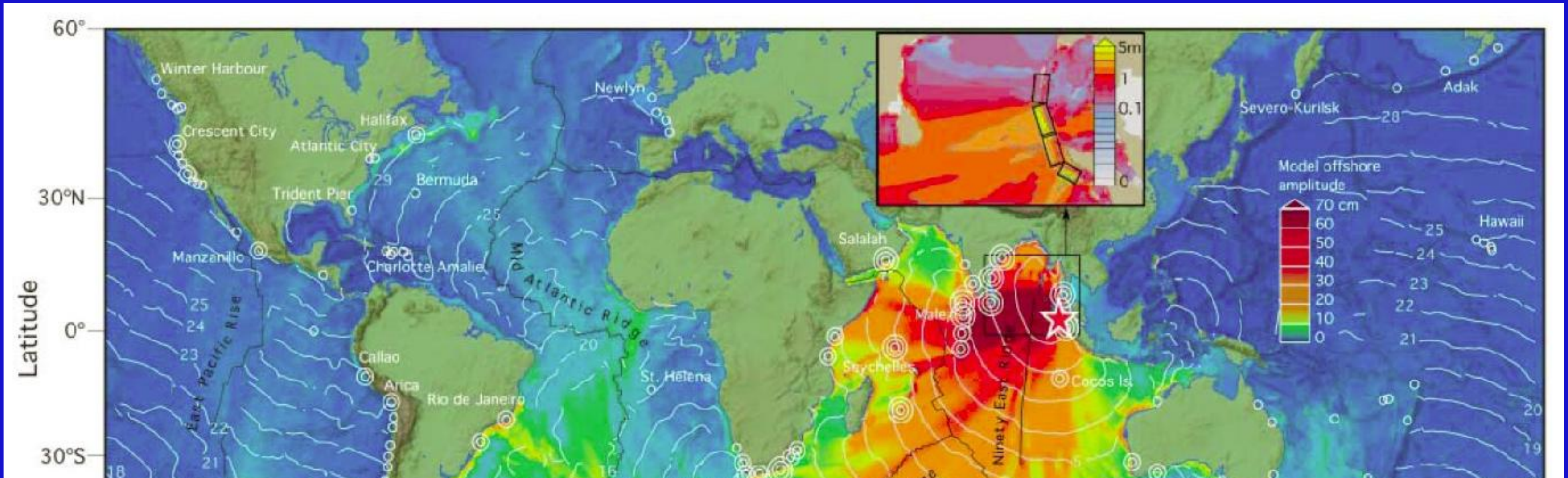
D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE


Indian Ocean tsunami 2004
8 h41 min
cea
40˚
60˚
80˚
100˚
120˚
20˚
0˚
-20˚
-40˚
cm
-200
-50
-20
-10
-2
0
2
10
20
50
200

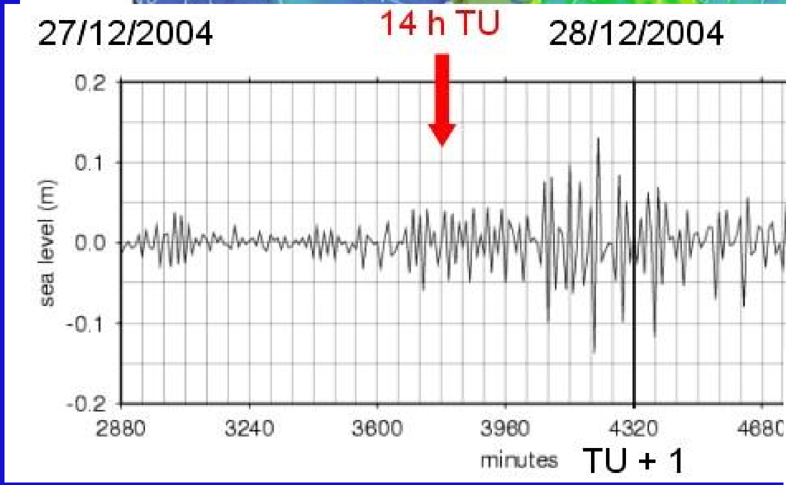
-2 m Hauteur d’eau 2 m


Latitude
Longitude
60°
30°N
0°
30°S
60°
120°
60°W
0°
60°E
120°
180°
Winter Harbour
Crescent City
Halifax
Atlantic City
Newlyn
Bermuda
Trident Pier
Manzanillo
Charlotte Amalie
Mid Atlantic Ridge
East Pacific Rise
Callao
Arica
Rio de Janeiro
St. Helena
Salalah
Male
Seychelles
Cocos Is.
Ninety East Ridge
Mossel Bay
Port Stanley
Southwest Indian Ridge
Kerguelen
Southeast Indian Ridge
Pacific Antarctic Ridge
Syowa
Dumont d'Urville
Jackson Bay
Severo-Kurilsk
Adak
Hawaii
Model offshore amplitude
70 cm
60
50
40
30
20
10
0
5m
1
0.1
0
Gauge coastal amplitudes
> 2m
0.5m - 2m
<0.5m

Titov et al., 2005


60°
30°N
0°
30°S
Latitude
60°E
120°
180°
Winter Harbour
Crescent City
Halifax
Atlantic City
Newlyn
Bermuda
Trident Pier
Manzanillo
Charlotte Amalie
Mid Atlantic Ridge
East Pacific Rise
Callao
Arica
Rio de Janeiro
St. Helena
Salalah
Male
Seychelles
Cocos Is.
Ninety East Ridge
Kerguelen
Southeast Indian Ridge
Pacific Antarctic Ridge
Dumont d'Urville
Jackson Bay
Hawaii
Severo-Kurilsk
Adak
Model offshore amplitude
70 cm
60
50
40
30
20
10
0
5m
1
0.1
0

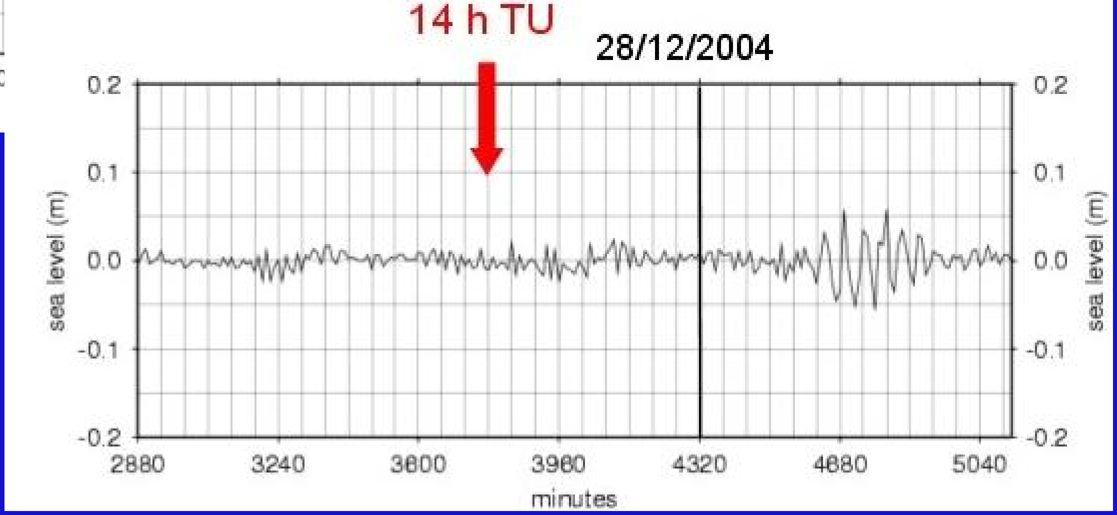
Titov et al., 2005



Concarneau ~ 20 cm

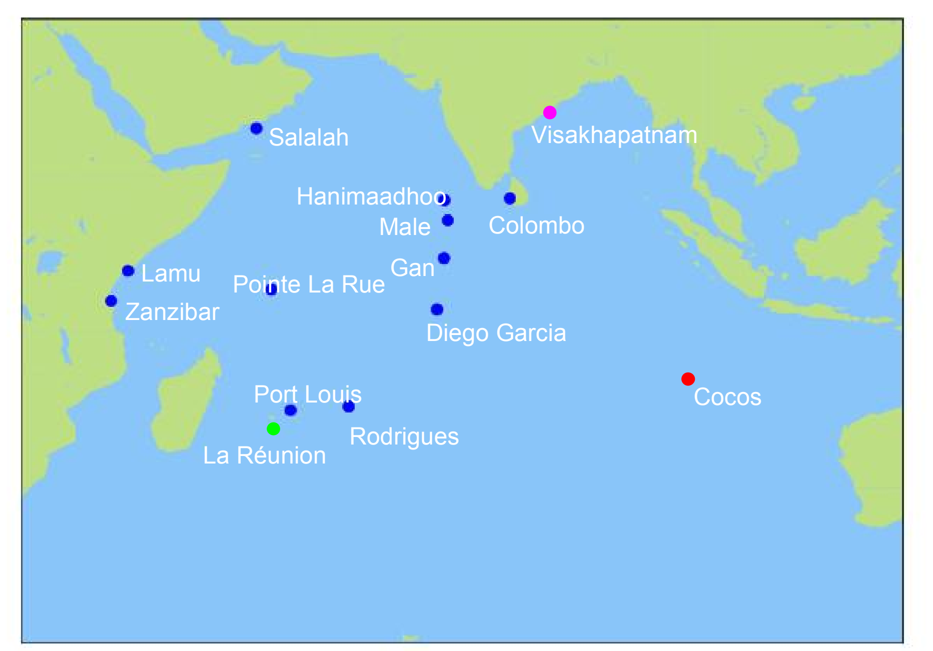
données SHOM

Le Havre ~ 10 cm



Evénement humain et scientifique majeur

- Une catastrophe humanitaire majeure 284100 décès et 14100 disparus
- La somme et la répartition de données recueillies est **sans précédent**
  - marégrammes

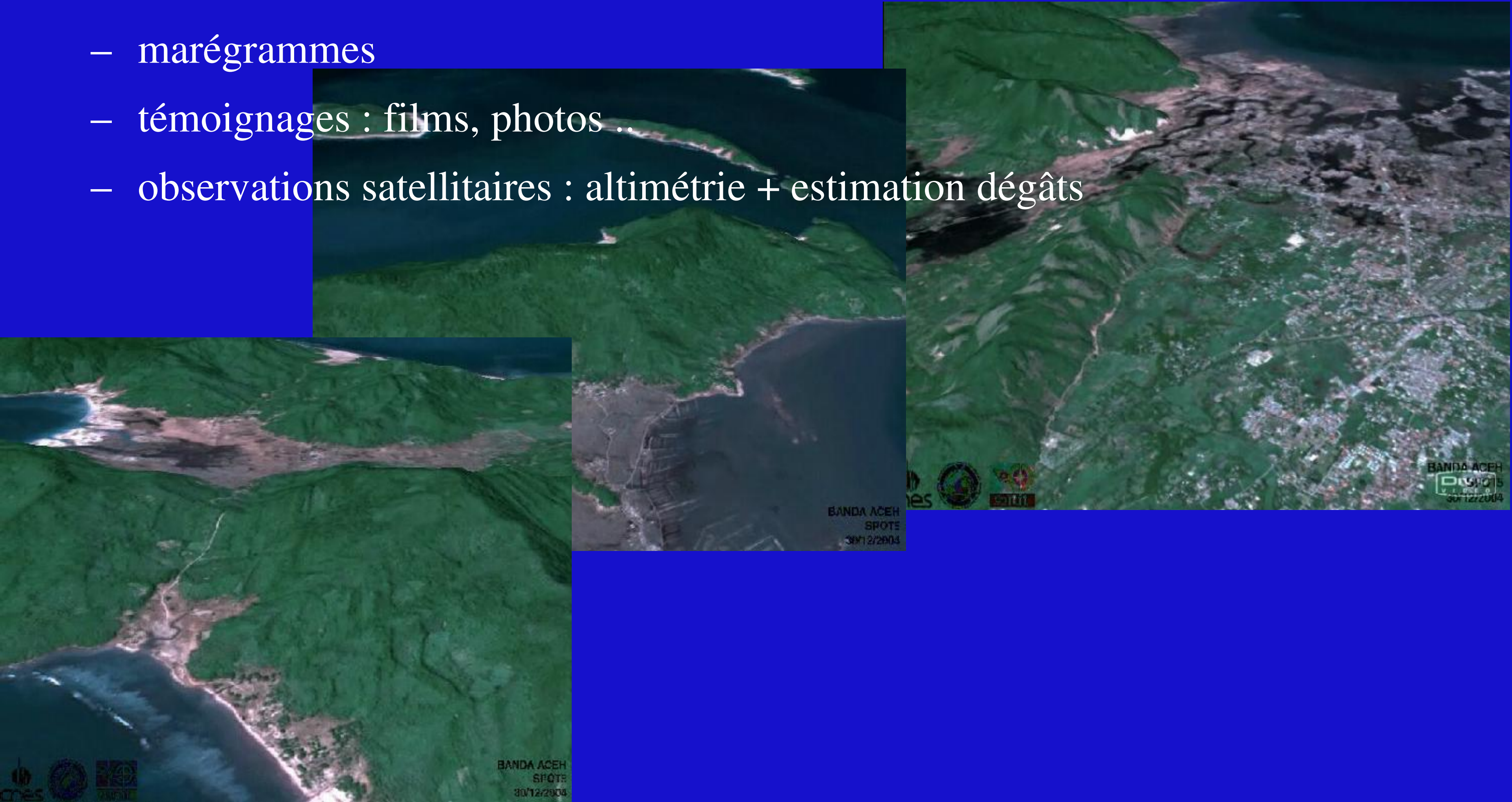

Salalah
Visakhapatnam
Hanimaadhoo
Male
Colombo
Lamu
Pointe La Rue
Gan
Zanzibar
Diego Garcia
Port Louis
Cocos
Rodrigues
La Réunion

Evénement humain et scientifique majeur

- Une catastrophe humanitaire majeure 284100 décès et 14100 disparus
- La somme et la répartition de données recueillies est **sans précédent**
  - marégrammes
  - témoignages : films, photos ..

Evénement humain et scientifique majeur

- Une catastrophe humanitaire majeure 284100 décès et 14100 disparus
- La somme et la répartition de données recueillies est **sans précédent**
    - marégrammes
    - témoignages : films, photos ..
    - observations satellitaires : altimétrie + estimation dégâts


BANDA ACEH
SPOT5
30/12/2004
BANDA ACEH
SPOT5
30/12/2004
BANDA ACEH
SPOT5
30/12/2004
cnes

Une histoire de tsunamis en indonésie…

Une région de forts séismes et éruptions volcaniques,
donc beaucoup de tsunami:

- 1797: 300 morts à Padang
- 1833: nombreux morts à l’ouest de Sumatra
- 1843: île de Nias, nombreuses victimes
- 1861: des milliers de morts

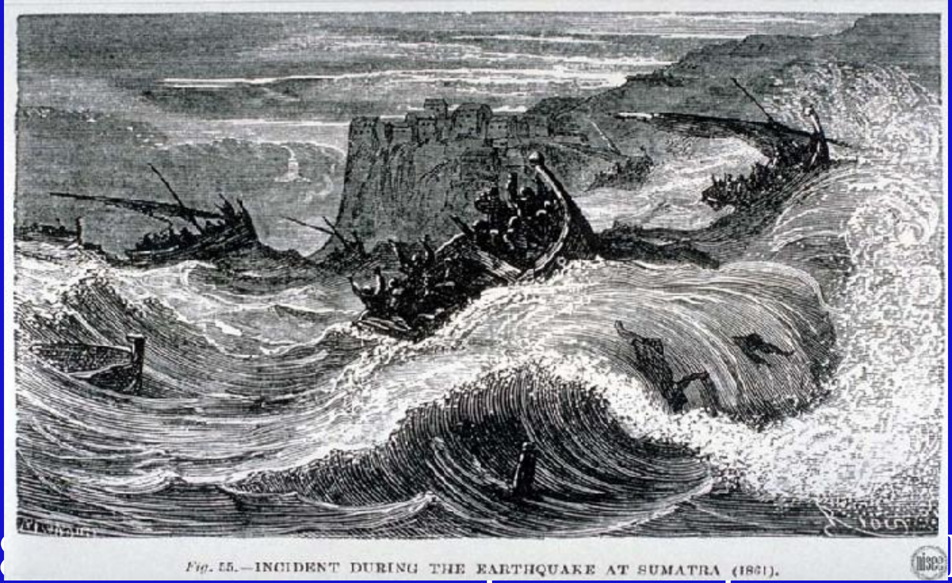
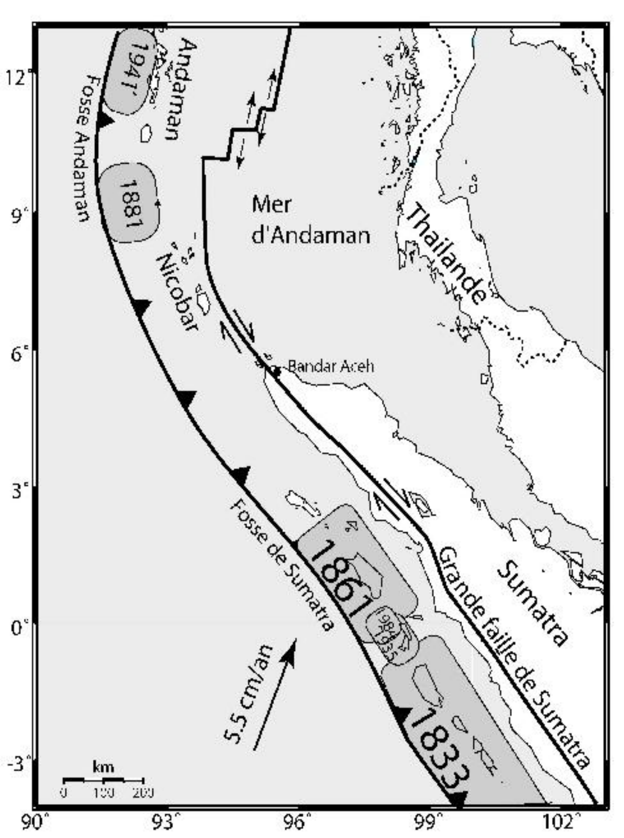


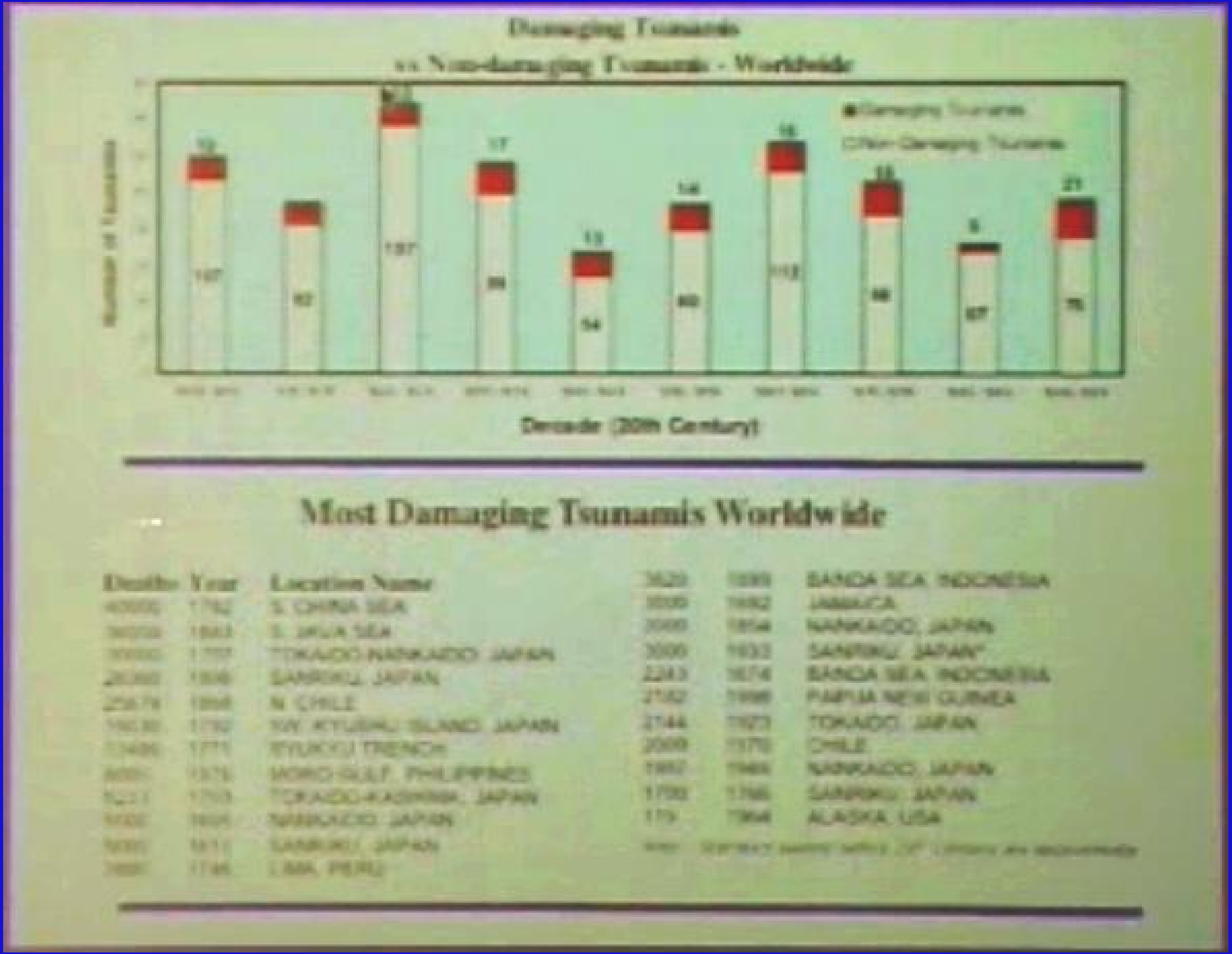
Fig. 55.—INCIDENT DURING THE EARTHQUAKE AT SUMATRA (1861).

- 18 Krakatoa


12°
9°
6°
3°
0°
-3°
90°
93°
96°
99°
102°
Fosse Andaman
Andaman
1941
1881
Nicobar
Mer d'Andaman
Thaïlande
Bandar Aceh
Fosse de Sumatra
1861
1833
Sumatra
Grande faille de Sumatra
5.5 cm/an
km
0
100
200

D’après le site du CEA-DASE

Historique des tsunami



Damaging Tsunamis
vs Non-damaging Tsunamis - Worldwide

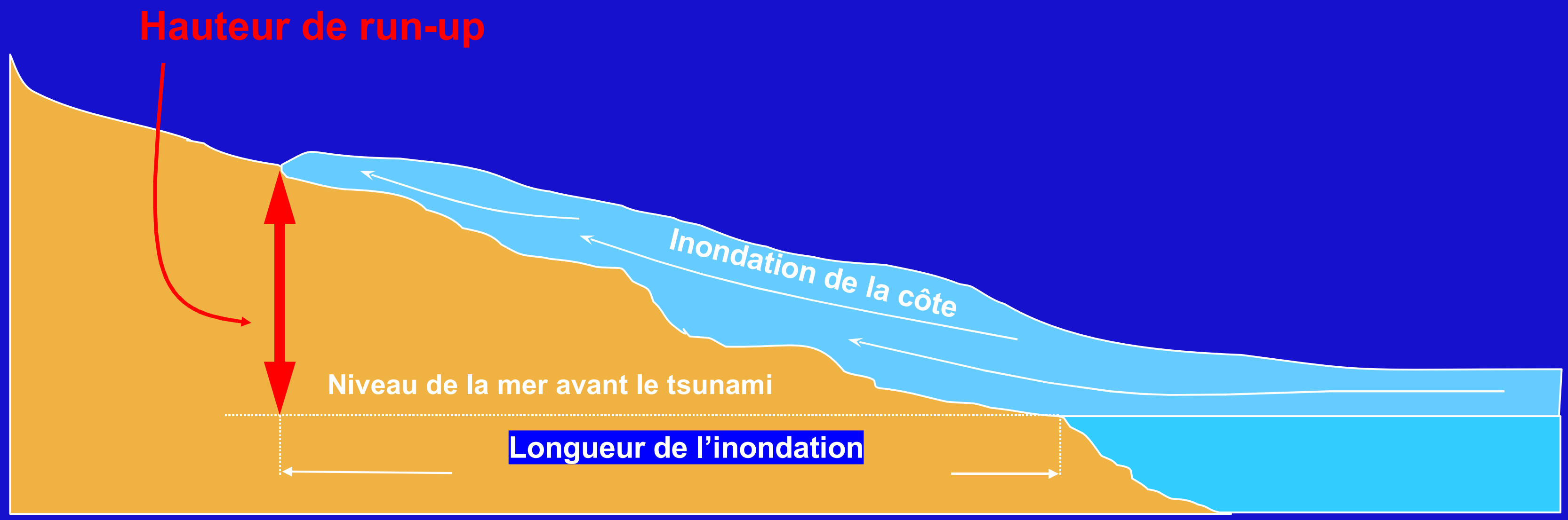
Most Damaging Tsunamis Worldwide

Deaths	Year	Location Name
40000	1782	S. CHINA SEA
36000	1883	S. JAVA SEA
30000	1707	TOKAIDO-NANKAIDO, JAPAN
26360	1896	SANRIKU, JAPAN
25674	1868	N. CHILE
15030	1792	SW. KYUSHU ISLAND, JAPAN
13486	1771	RYUKYU TRENCH
8000	1976	MORO GULF, PHILIPPINES
5233	1703	TOKAIDO-KASHIMA, JAPAN
5000	1605	NANKAIDO, JAPAN
5000	1611	SANRIKU, JAPAN
3800	1746	LIMA, PERU
3620	1899	BANDA SEA, INDONESIA
3000	1692	JAMAICA
3000	1854	NANKAIDO, JAPAN
3000	1933	SANRIKU, JAPAN*
2243	1674	BANDA SEA, INDONESIA
2182	1998	PAPUA NEW GUINEA
2144	1923	TOKAIDO, JAPAN
2000	1570	CHILE
1997	1946	NANKAIDO, JAPAN
1700	1766	SANRIKU, JAPAN
119	1964	ALASKA, USA

[illegible]

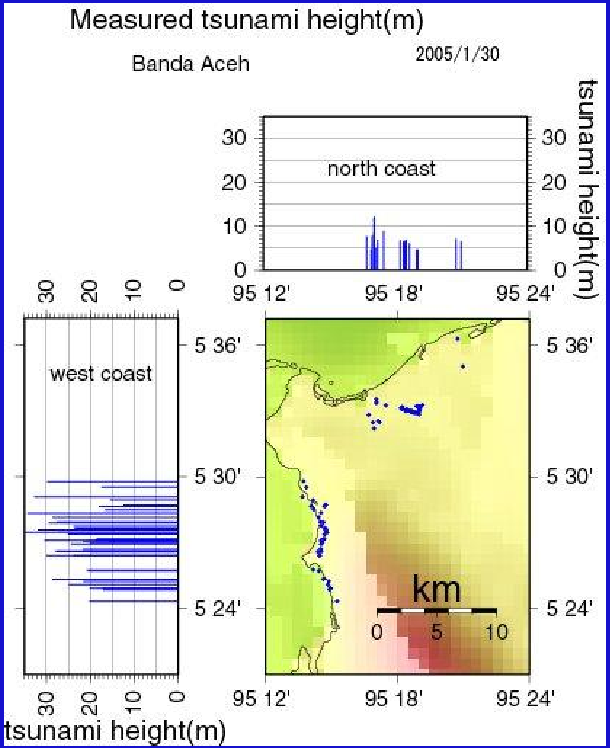
Run-up

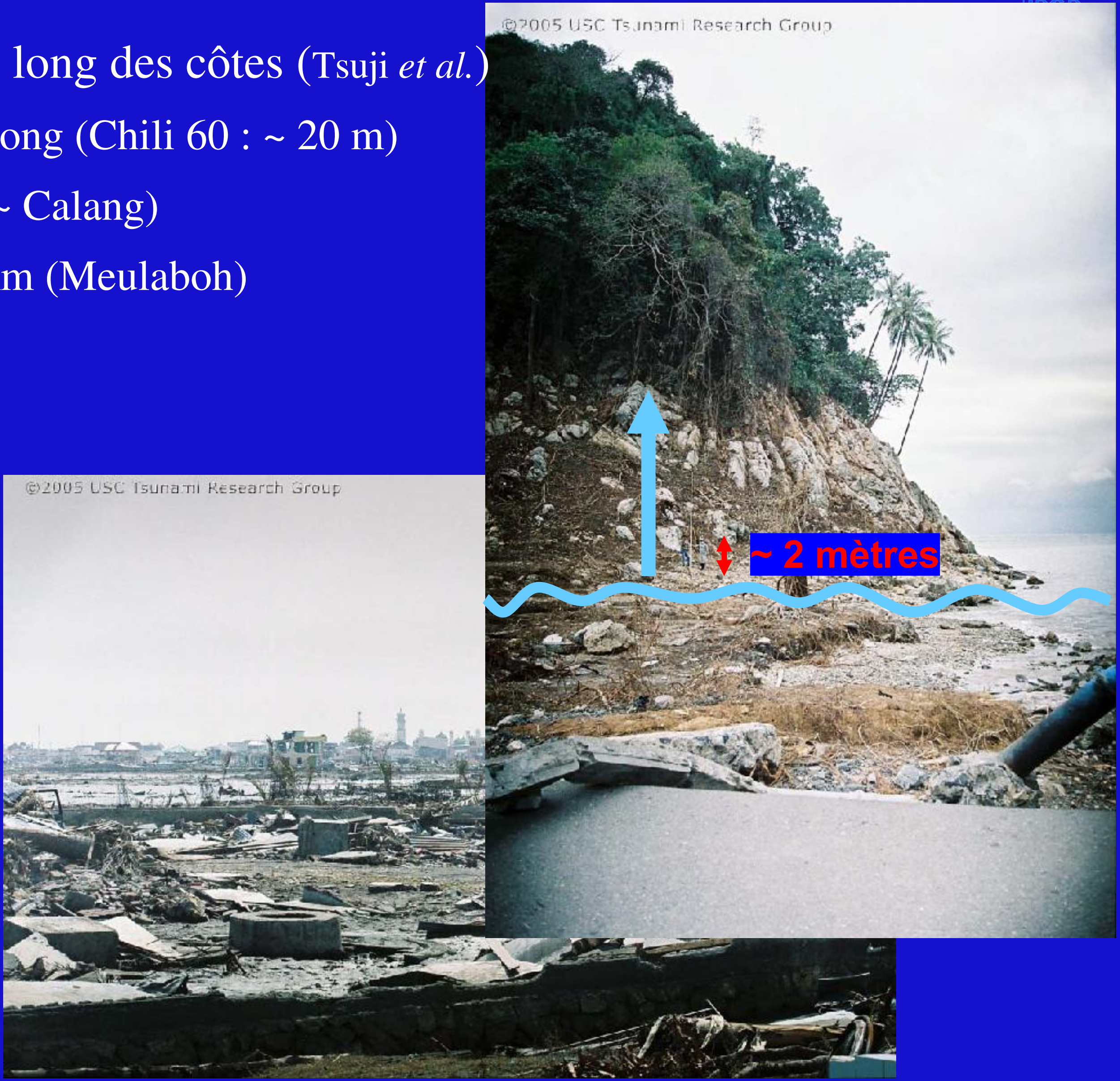
- Données d'amplitude : hauteurs d'inondation (**run-up**)
  - plus qualitatif
  - peu de contraintes temporelles


Hauteur de run-up
Inondation de la côte
Niveau de la mer avant le tsunami
Longueur de l'inondation

Observations locales

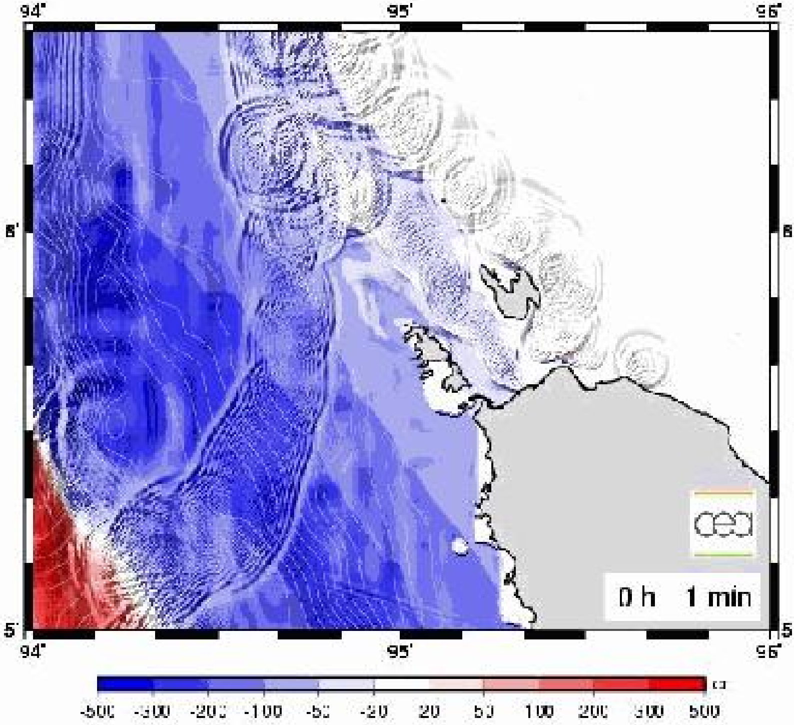
- Distribution des run-up le long des côtes (Tsuji *et al.*)
  - –20-35 m sur 10 km de long (Chili 60 : ~ 20 m)
  - –30 m à 50 km au Sud (~ Calang)
  - –20 m probables à 100 km (Meulaboh)

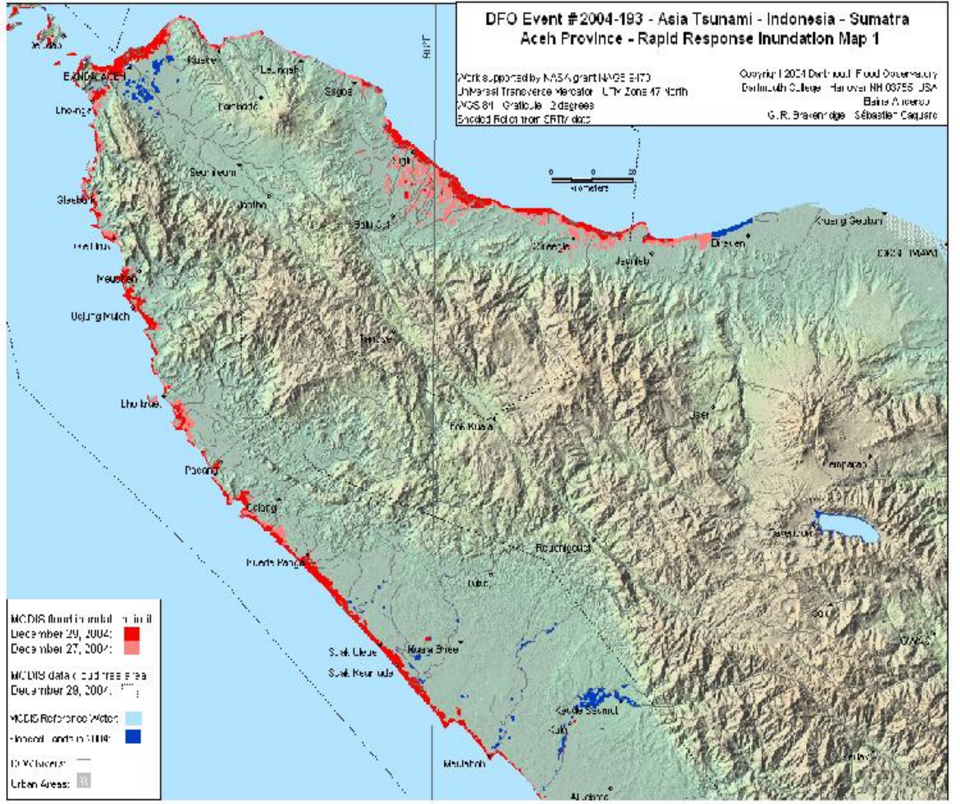



©2005 USC Tsunami Research Group
©2005 USC Tsunami Research Group
~ 2 mètres

région de Banda Aceh - clichés JC Borrero - USC

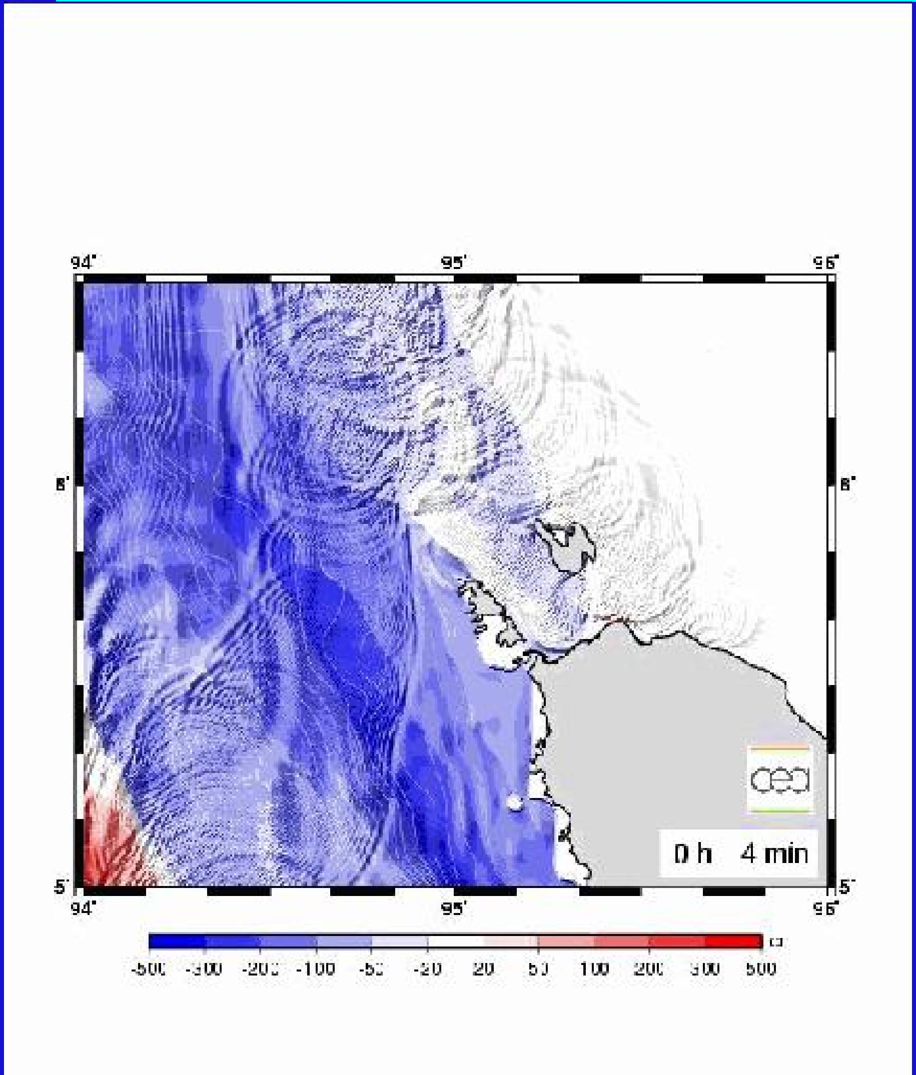
Premiers modèles


94°
95°
96°
6°
5°
cea
0 h 1 min
cm
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500

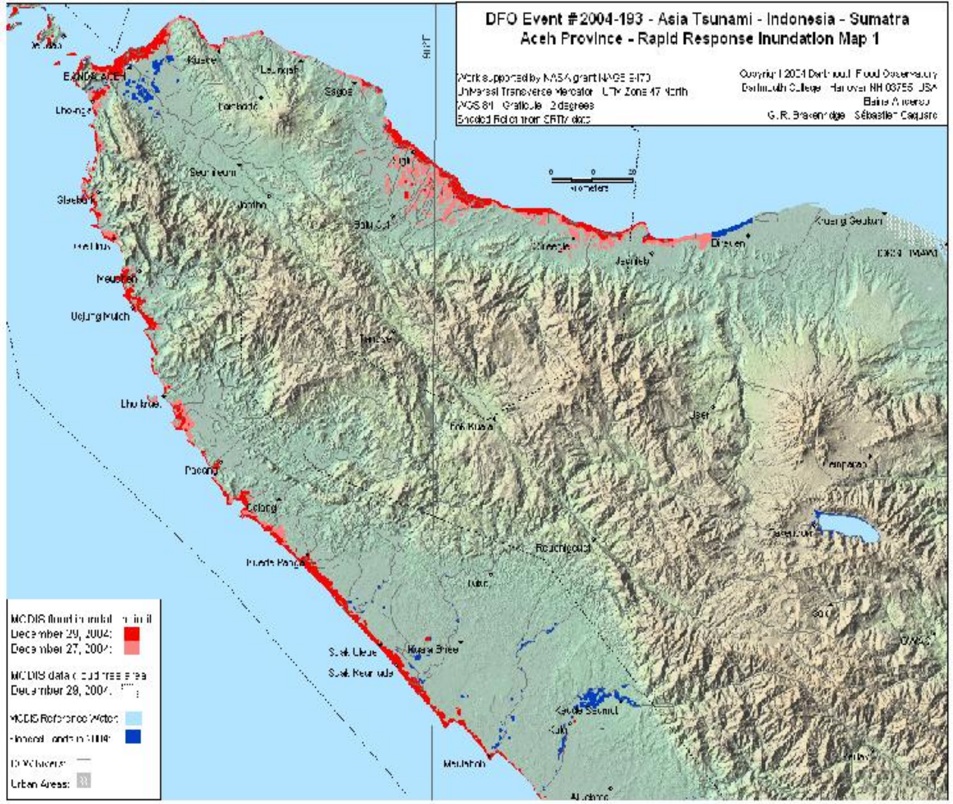

DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
December 29, 2004:
December 27, 2004:
Urban Areas:

D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE

Premiers modèles



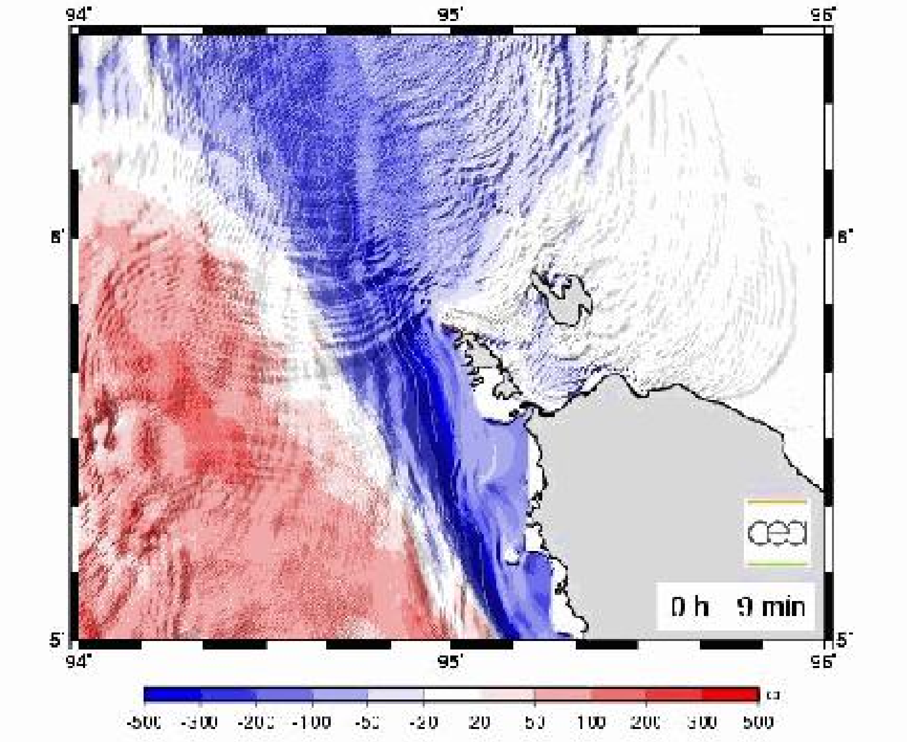
94°
95°
96°
6°
5°
0 h 4 min
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm

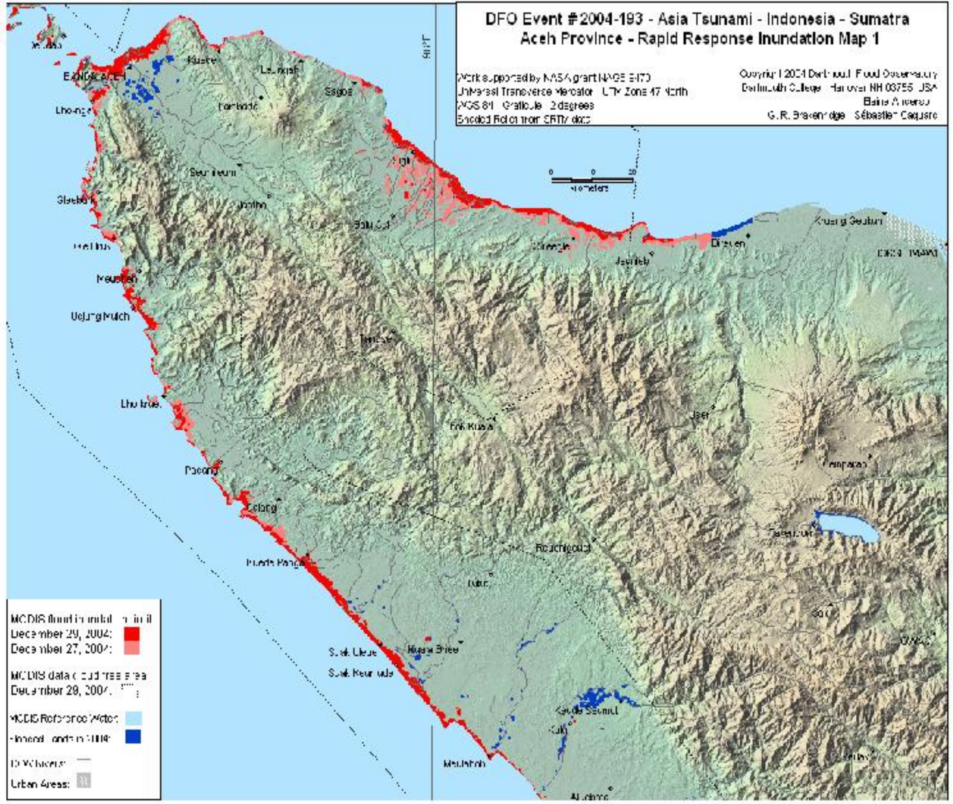


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Banda Aceh
Meulaboh
MODIS flood inundation limit
December 29, 2004:
December 27, 2004:
MODIS data cloud free area
December 29, 2004:
MODIS Reference Water:
Flooded lands in 2004:
Urban Areas:

D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE

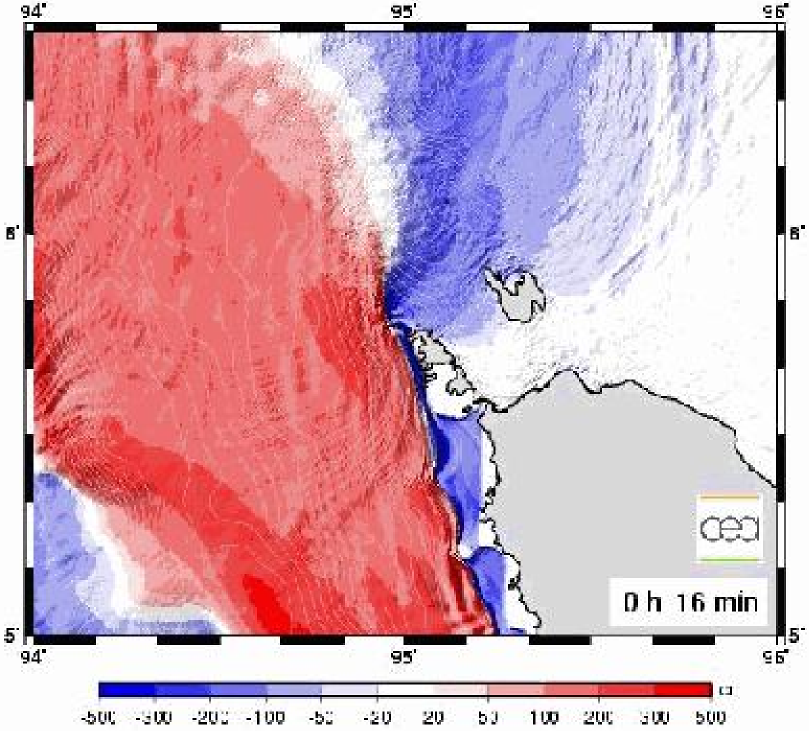
Premiers modèles

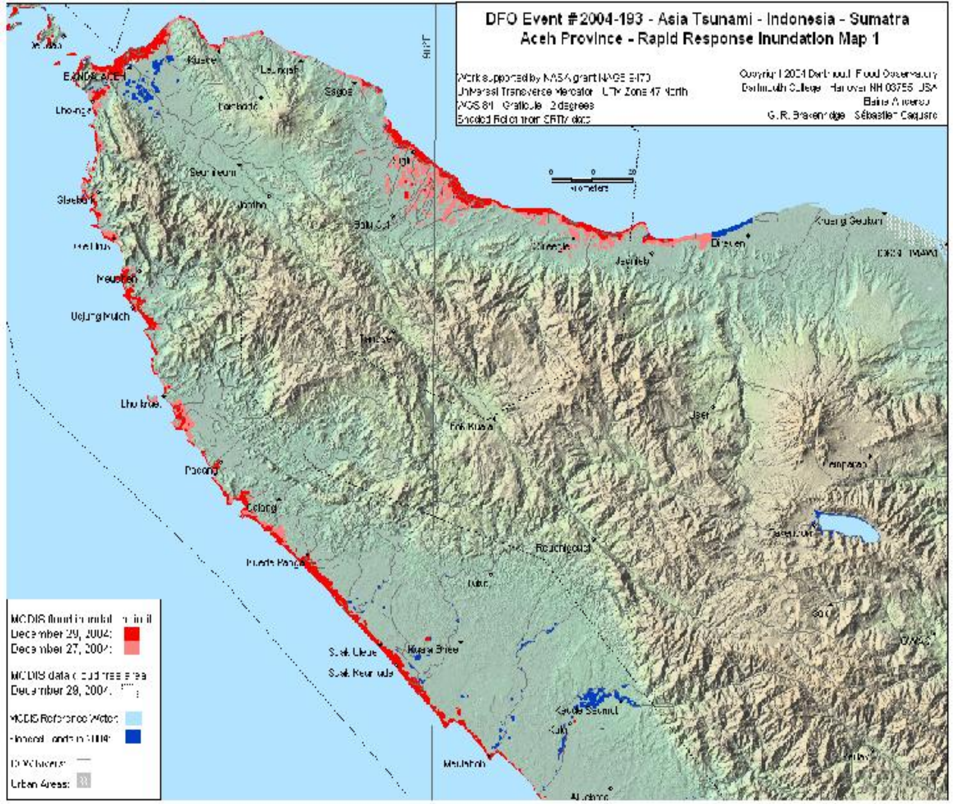

94°
95°
96°
6°
5°
cea
0 h 9 min
-500 -300 -200 -100 -50 -20 20 50 100 200 300 500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Work supported by NASA grant NAG5-8470
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
WGS 84 Graticule 2 degrees
Shaded Relief from SRTM data
Copyright 2004 Dartmouth Flood Observatory
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
Elaine Anderson
G. R. Brakenridge Sébastien Caquard
kilometers
BANDA ACEH
Meulaboh
MODIS flood inundation limit
December 29, 2004:
December 27, 2004:
MODIS data cloud free area
December 29, 2004:
MODIS Reference Water:
Flooded Lands in 2004:
DCW Rivers:
Urban Areas:

D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE

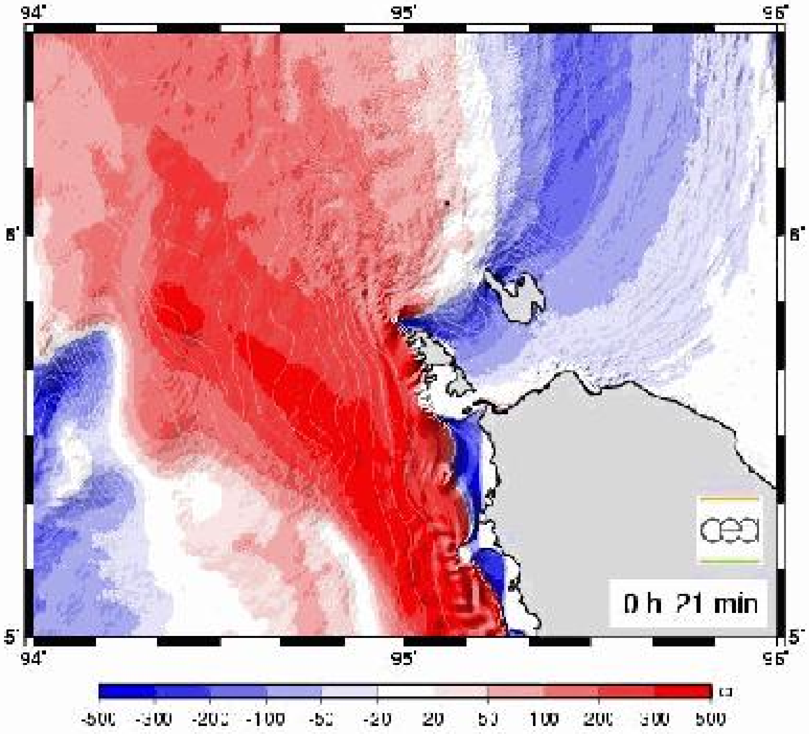
Premiers modèles

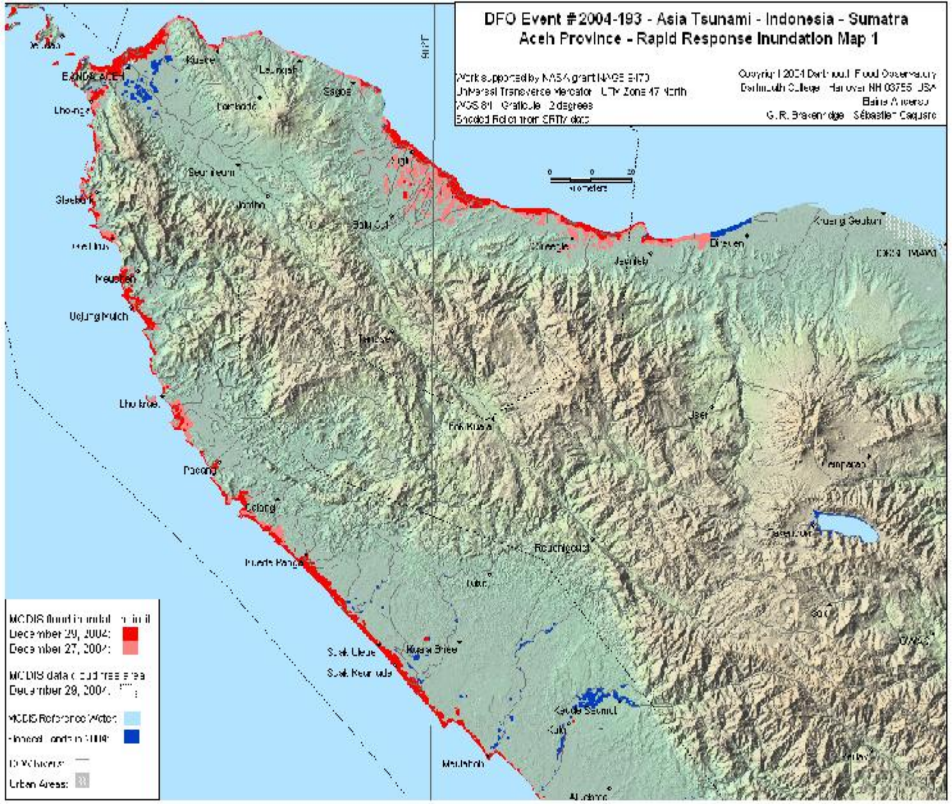

94°
95°
96°
6°
5°
0 h 16 min
cea
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
December 29, 2004:
December 27, 2004:
December 29, 2004:
Urban Areas:

D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE

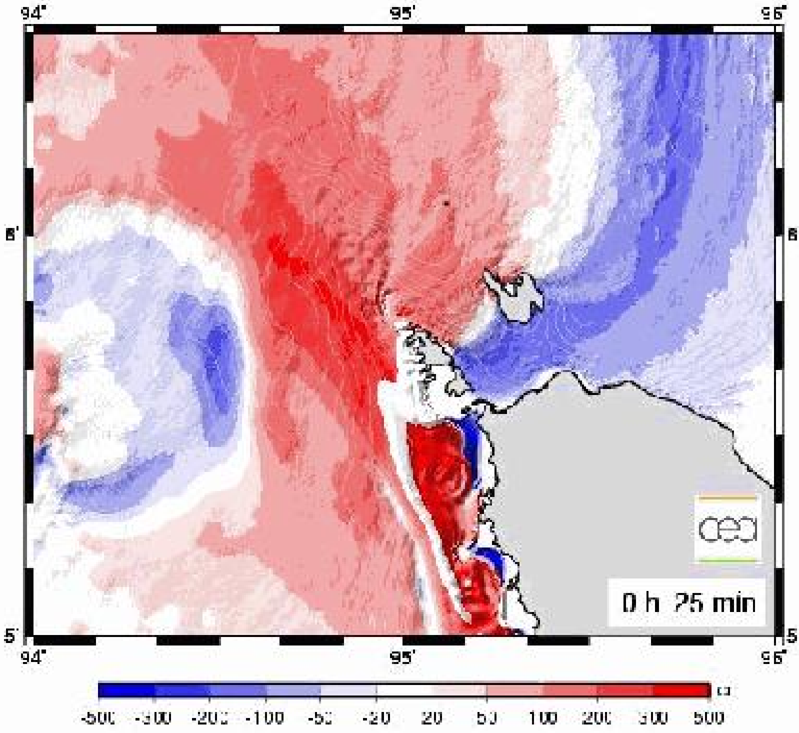
Premiers modèles

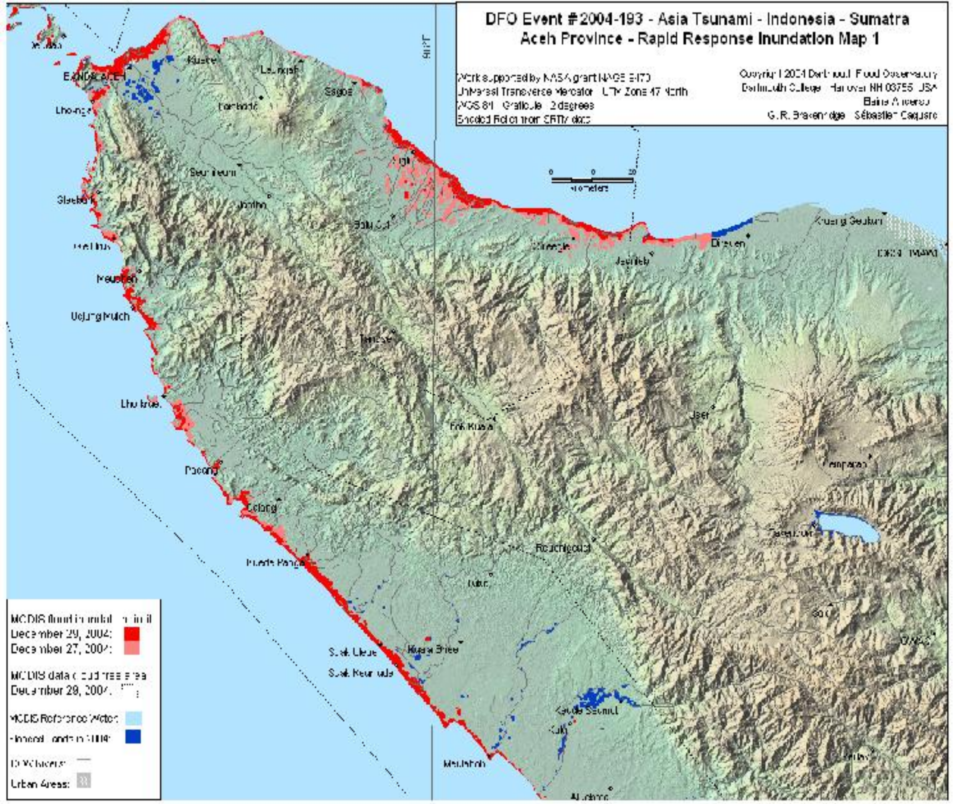

94°
95°
96°
6°
5°
0 h 21 min
cea
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
BANDA ACEH
Lhoknga
Meulaboh
MODIS flood inundation
December 29, 2004:
December 27, 2004:
MODIS Reference Water
Urban Areas

D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE

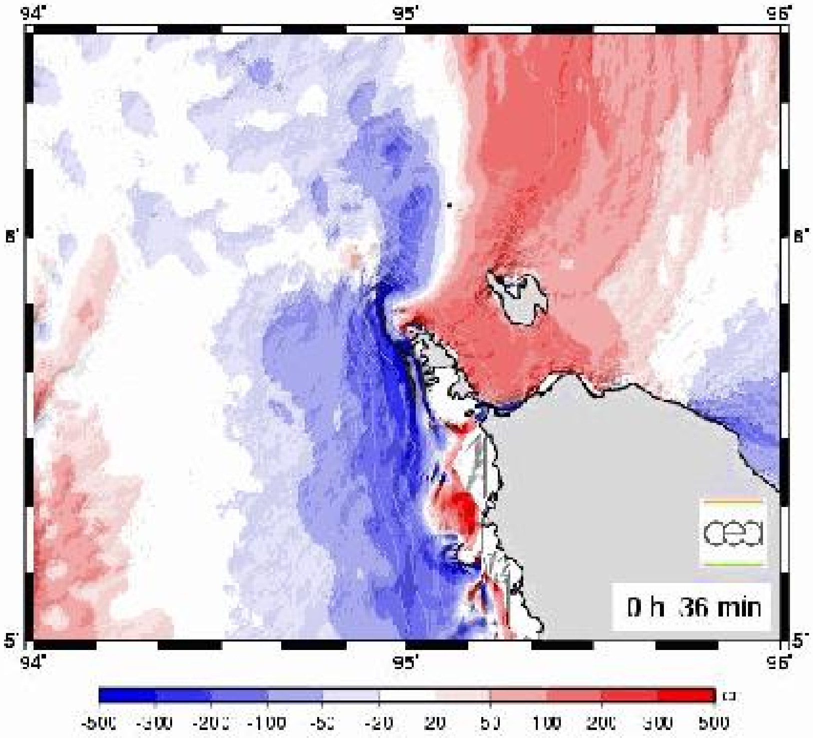
Premiers modèles

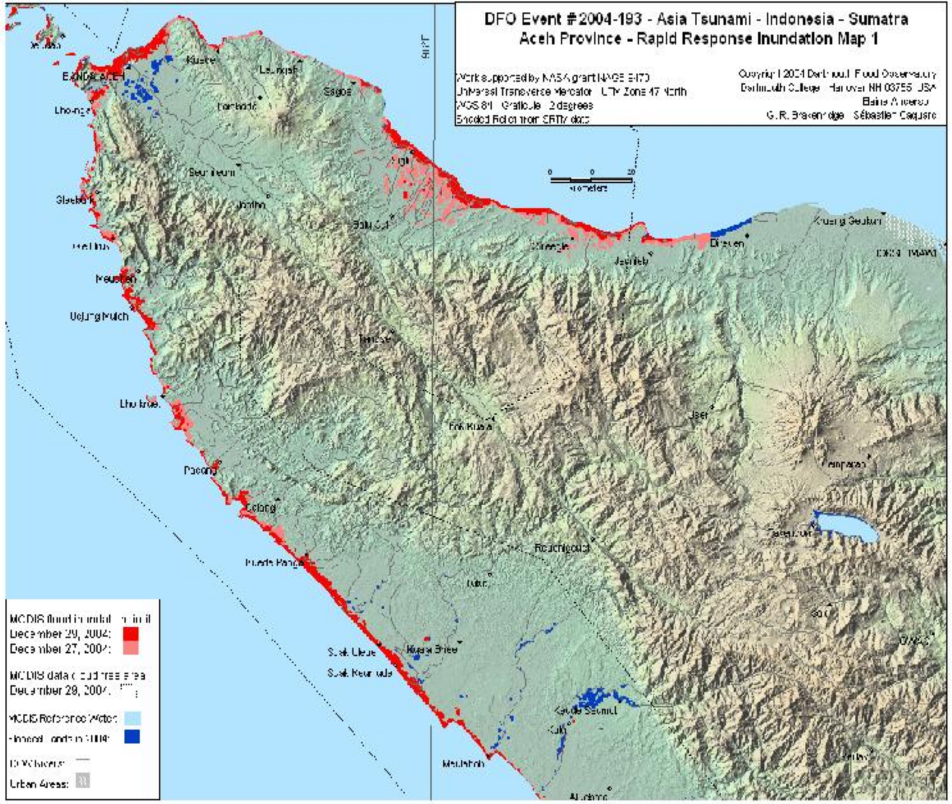

94°
95°
96°
6°
5°
0 h 25 min
cea
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Work supported by NASA grant NAG5 8170
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
WGS 84 Graticule 2 degrees
Shaded Relief from SRTM data
Copyright 2004 Dartmouth Flood Observatory
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
G.R. Brakenridge Sébastien Caquard
Banda Aceh
Lhoknga
Meulaboh
Kilometers
MODIS flood inundation limit
December 29, 2004:
December 27, 2004:
MODIS Reference Water
Urban Areas:

D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE

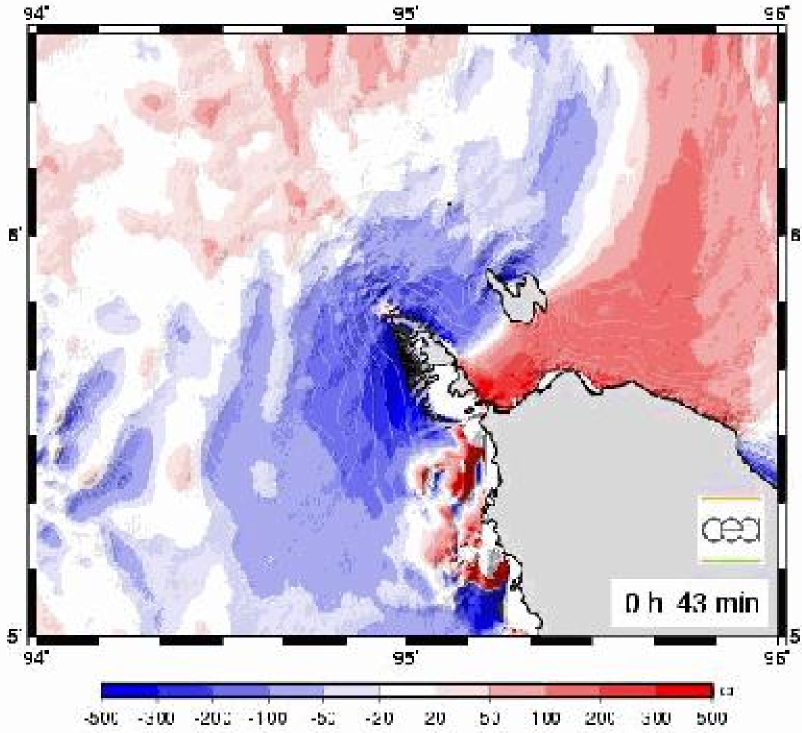
Premiers modèles

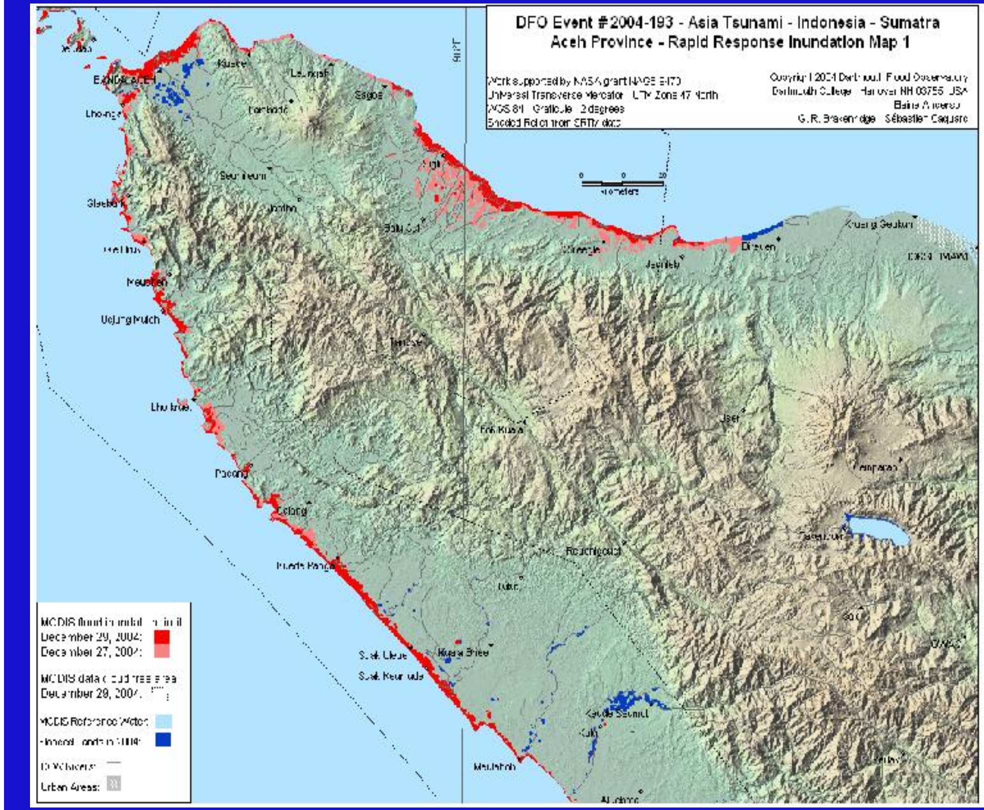

94°
95°
96°
6°
5°
cea
0 h 36 min
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
G. R. Brakenridge Sébastien Caquard
BANDA ACEH
MODIS flood inundation limit
December 29, 2004:
December 27, 2004:
December 28, 2004:
Urban Areas:

D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE

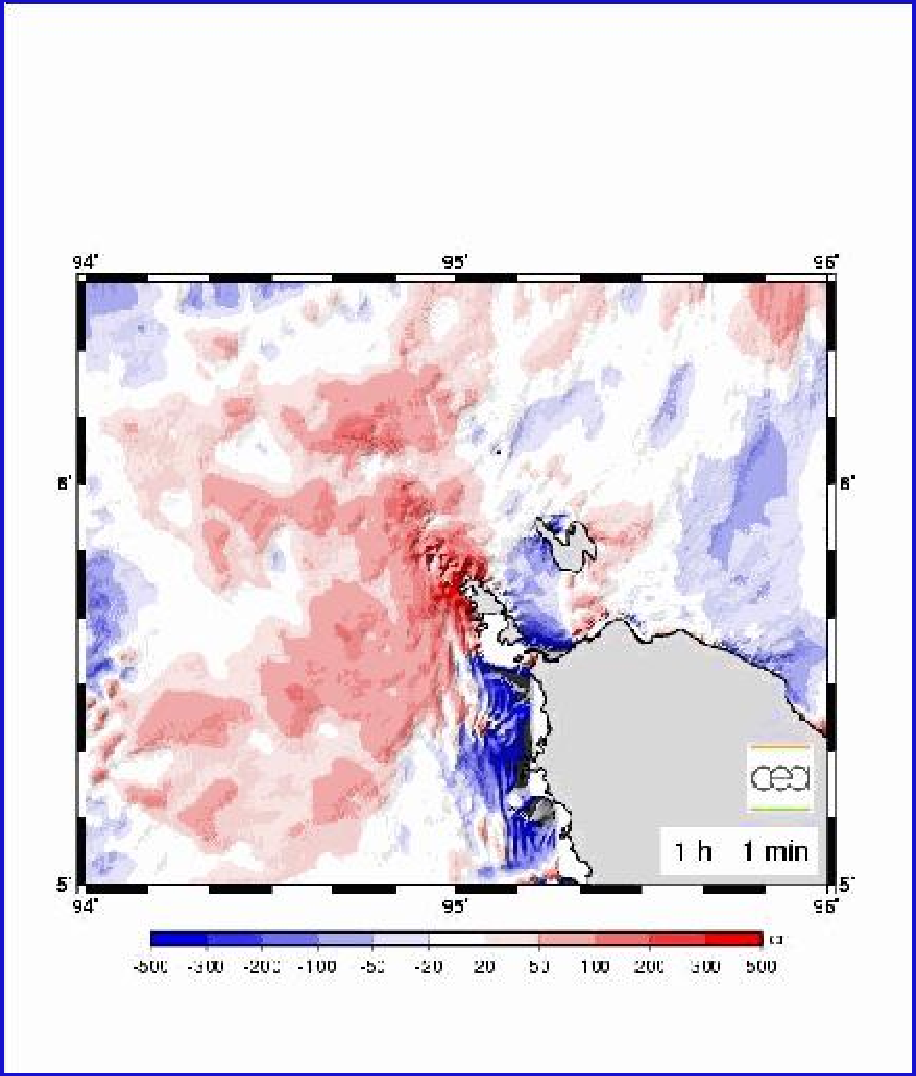
Premiers modèles

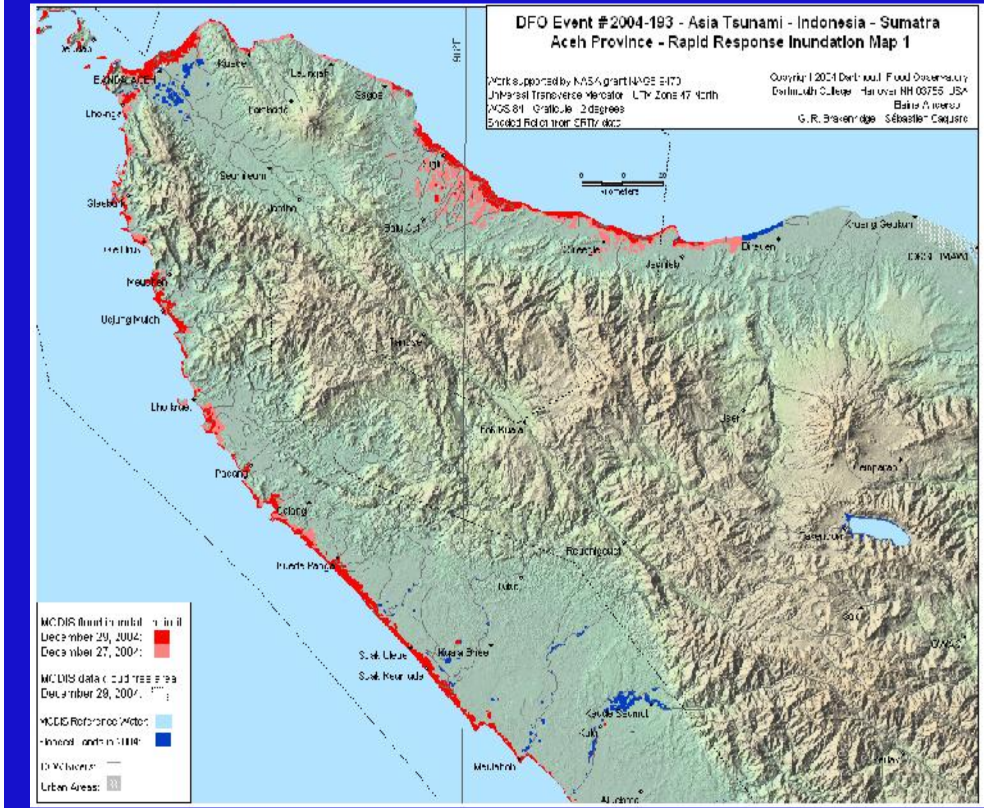

94°
95°
96°
6°
5°
cea
0 h 43 min
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
G. R. Brakenridge
Sébastien Caquard
December 29, 2004:
December 27, 2004:
December 28, 2004:
Urban Areas:
BANDA ACEH

D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE

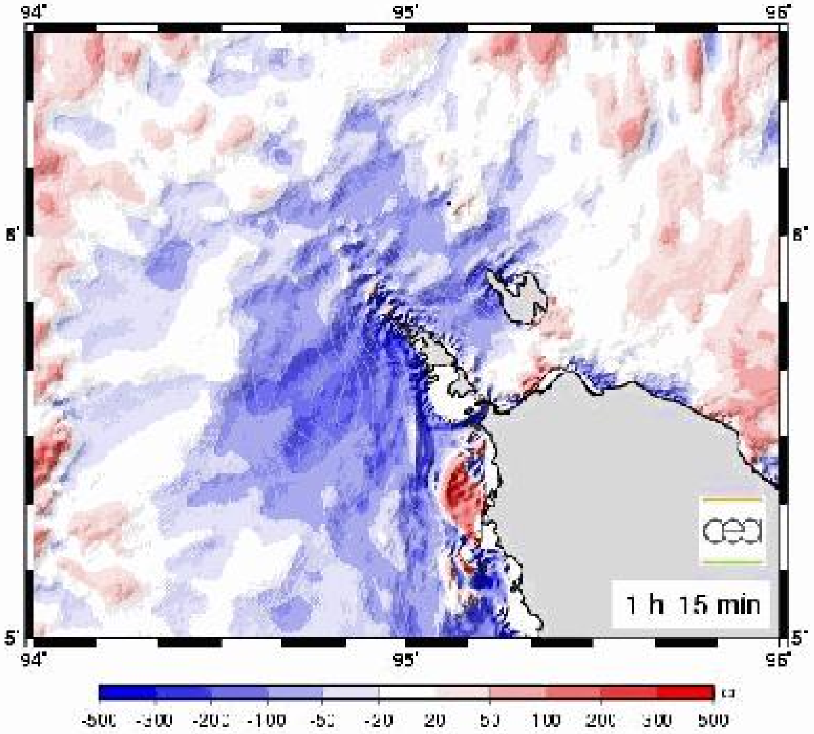
Premiers modèles

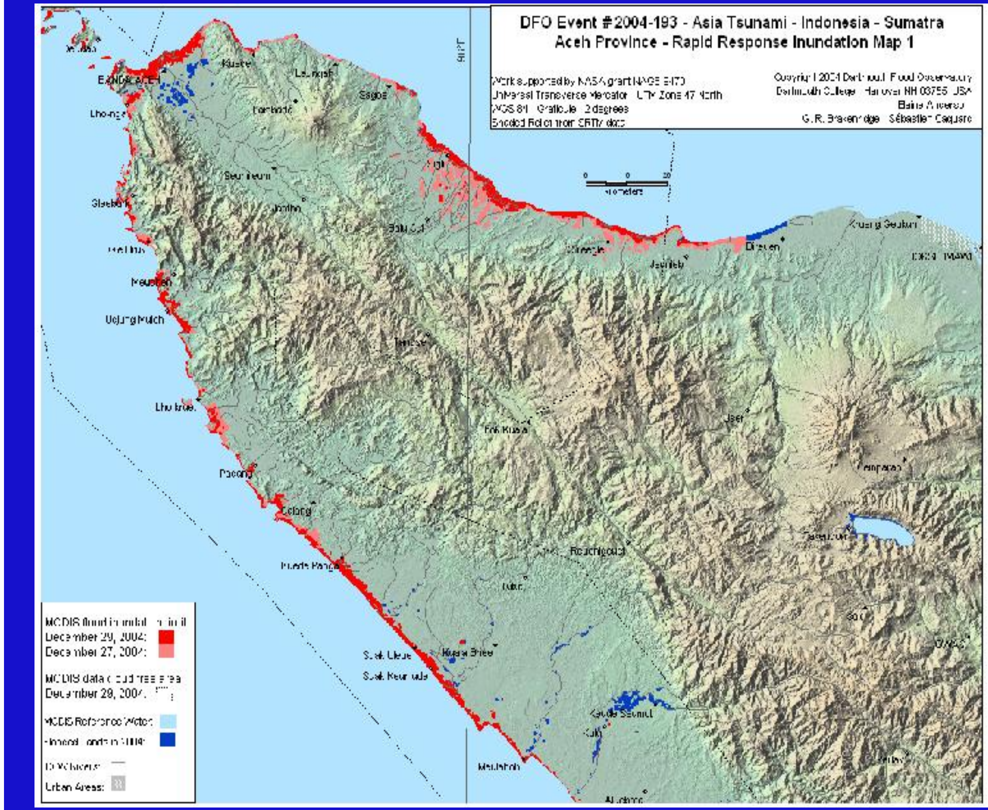

94°
95°
96°
6°
5°
1 h 1 min
cea
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
G. R. Brakenridge Sébastien Caquard
Kilometers
BANDA ACEH
Lhoknga
Ujung Mulch
Meulaboh
MODIS flood inundation limit
December 29, 2004: 🟥
December 27, 2004: 🟥
MODIS data cloud free area
December 29, 2004:
MODIS Reference Water: 🟦
Urban Areas: ▨

D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE

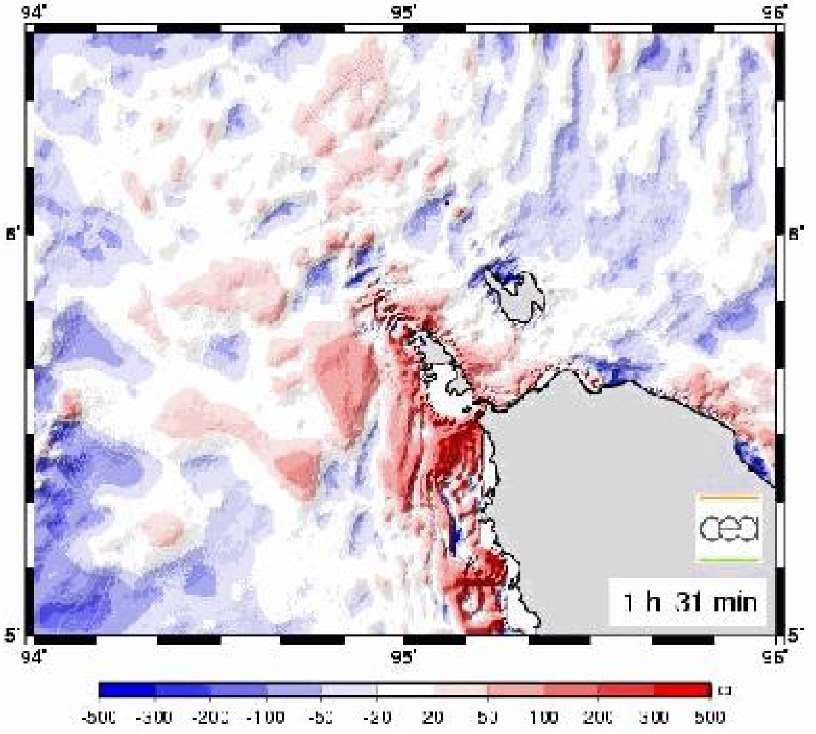
Premiers modèles

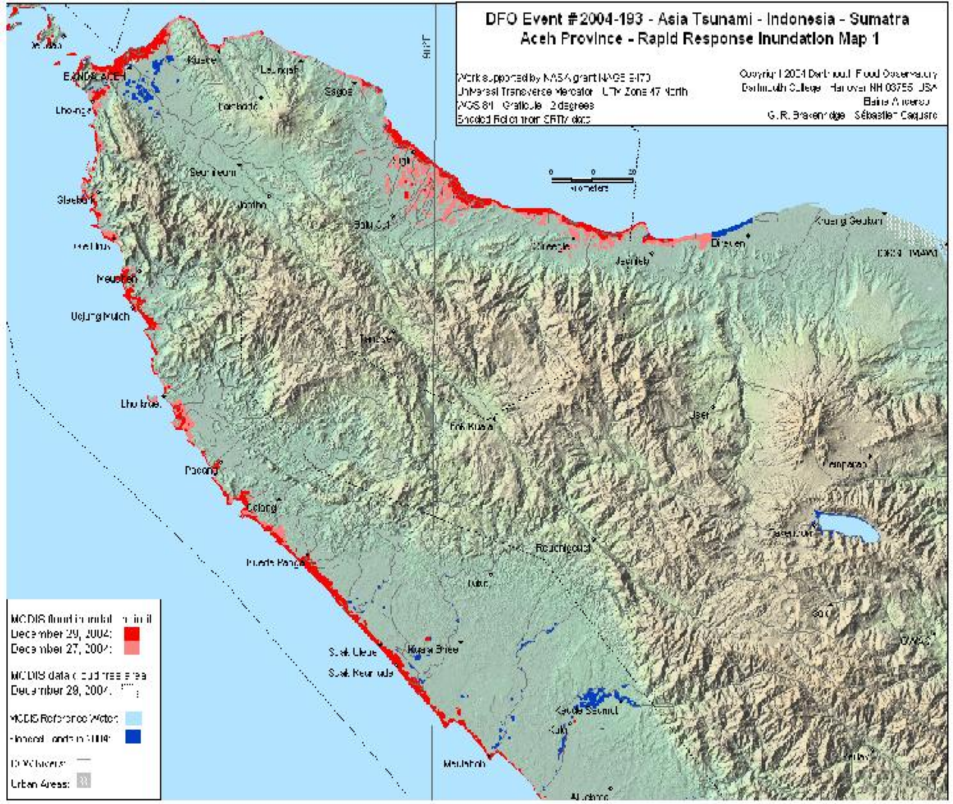

94°
95°
96°
6°
5°
cea
1 h 15 min
cm
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
G. R. Brakenridge Sébastien Caquard
Kilometers
BANDA ACEH
Sigli
Lhokseumawe
Ujung Muloh
Calang
Meulaboh
December 29, 2004:
December 27, 2004:
December 28, 2004:
Urban Areas:

D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE

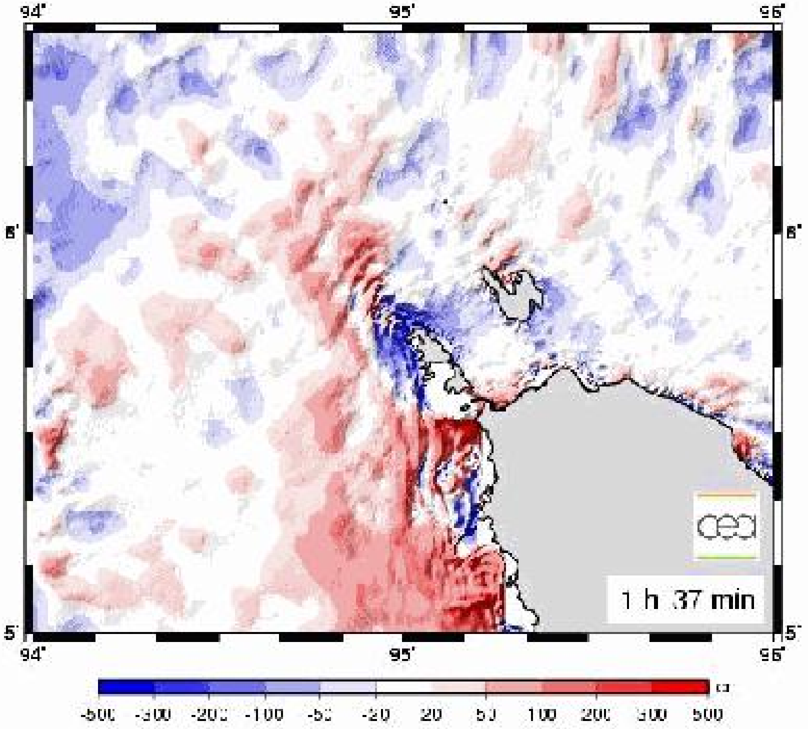
Premiers modèles

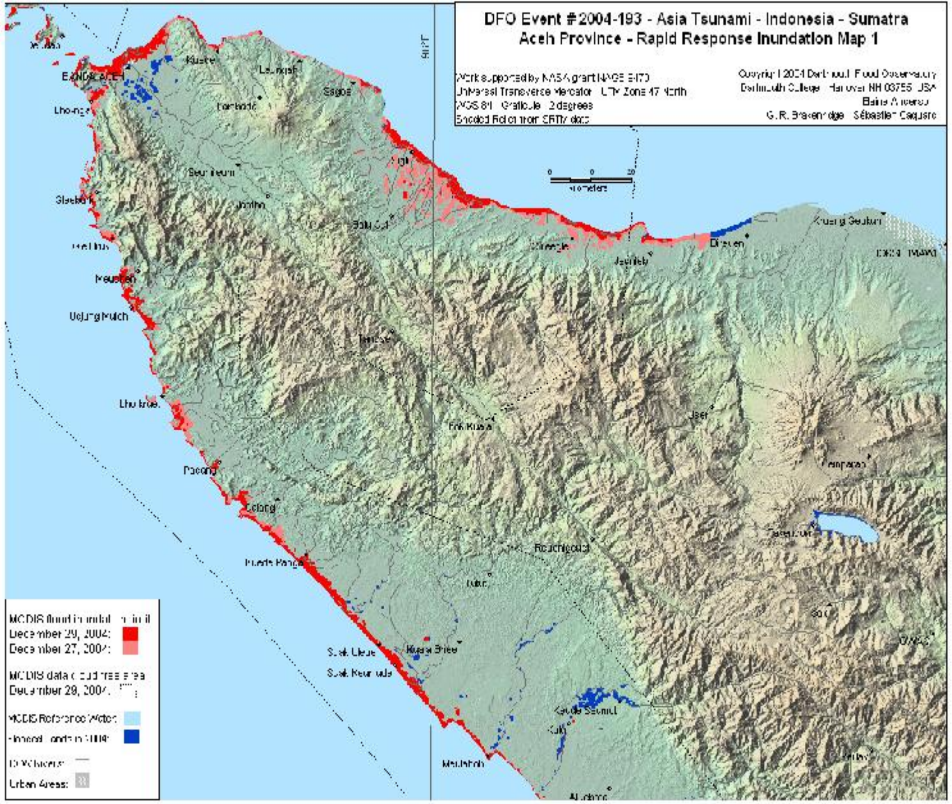

94°
95°
96°
6°
5°
cea
1 h 31 min
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Work supported by NASA grant NAG5 8470
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
WGS 84 Graticule 2 degrees
Shaded Relief from SRTM data
Copyright 2004 Dartmouth Flood Observatory
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
G. R. Brakenridge Sébastien Caquard
0
0
20
Kilometers
BANDA ACEH
MODIS flood inundation limit
December 29, 2004:
December 27, 2004:
MODIS data cloud free area
December 29, 2004:
MODIS Reference Water:
Urban Areas:

D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE

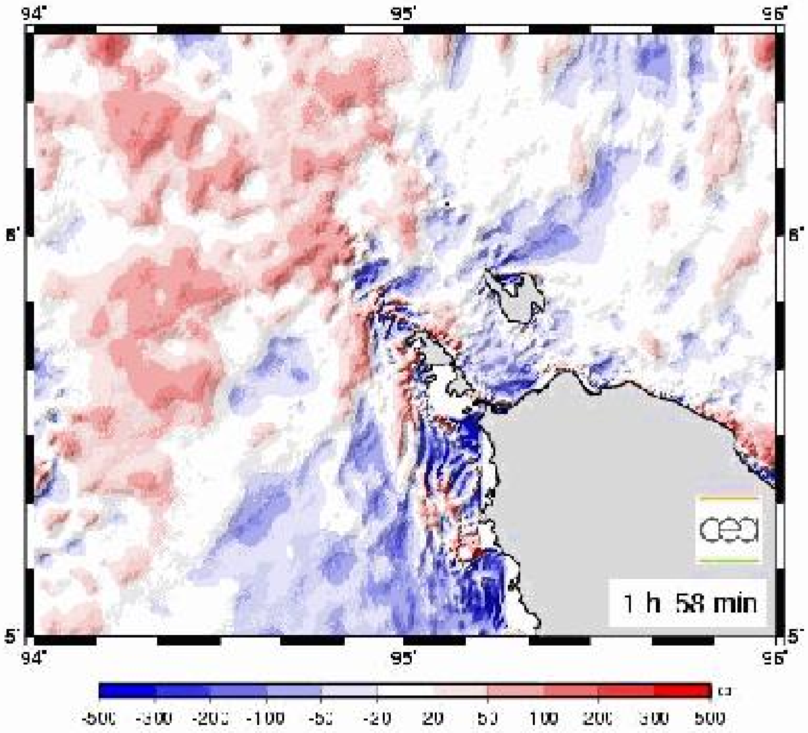
Premiers modèles

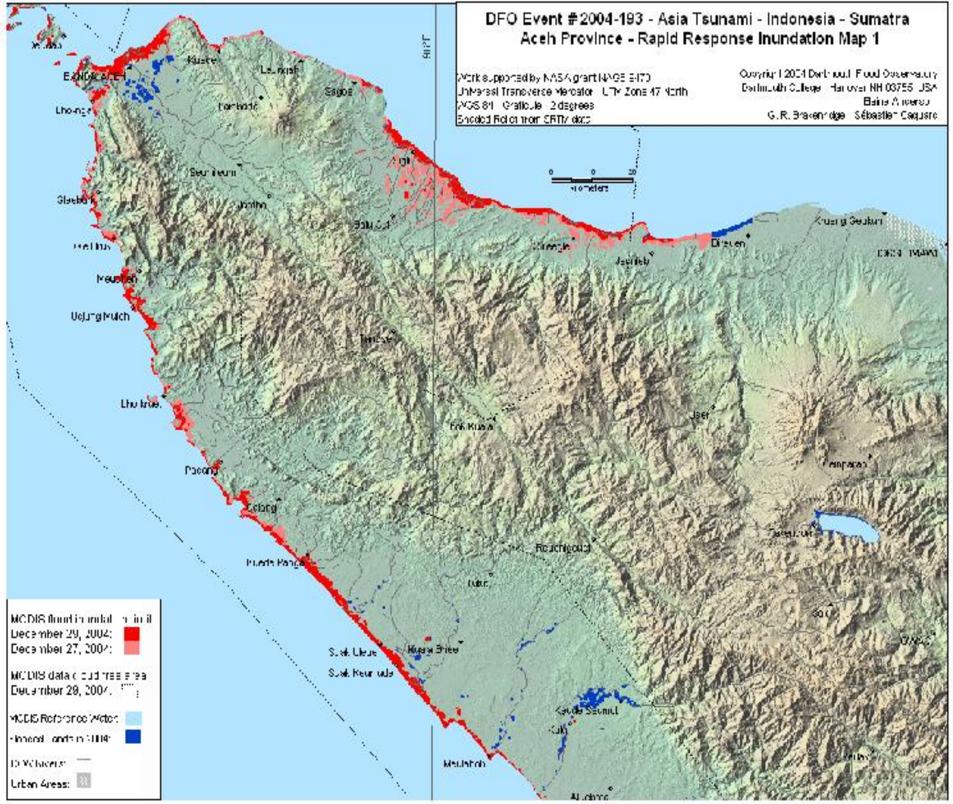

94°
95°
96°
6°
5°
1 h 37 min
cea
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
Kilometers
December 29, 2004:
December 27, 2004:
December 28, 2004:
Urban Areas:

D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE

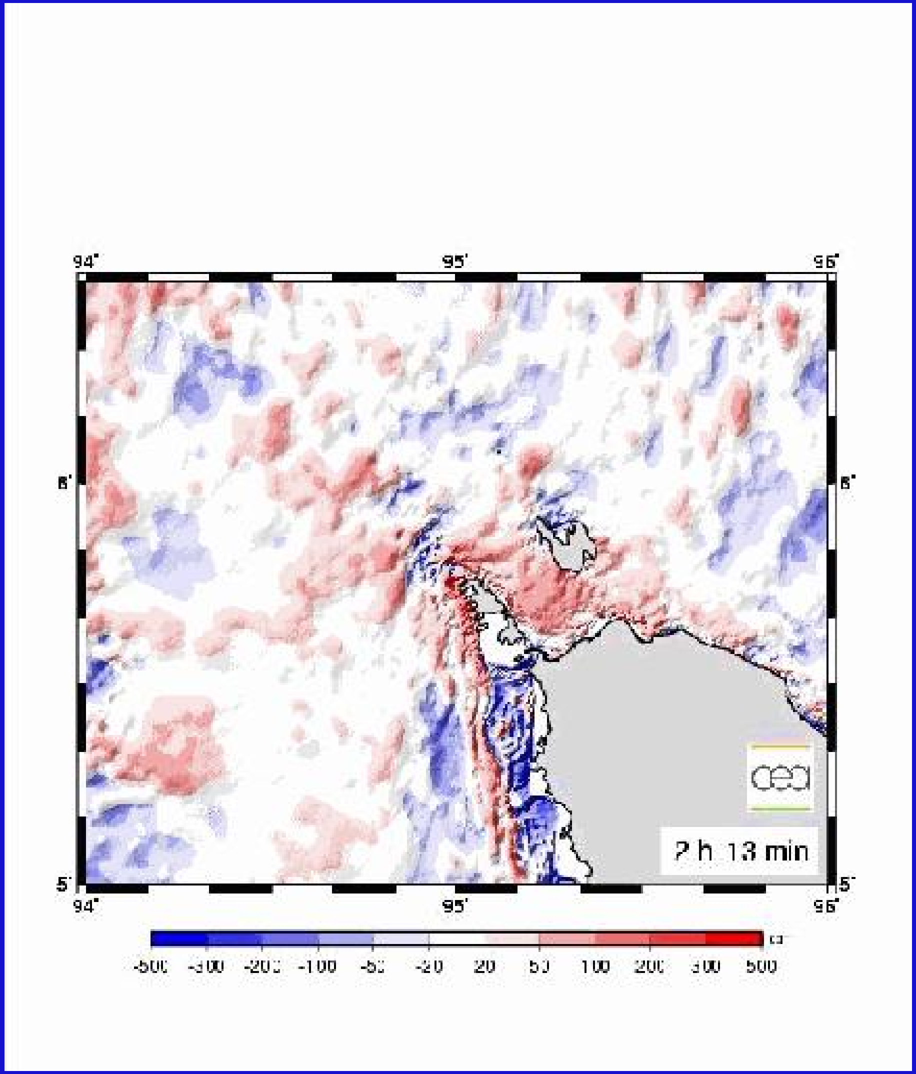
Premiers modèles

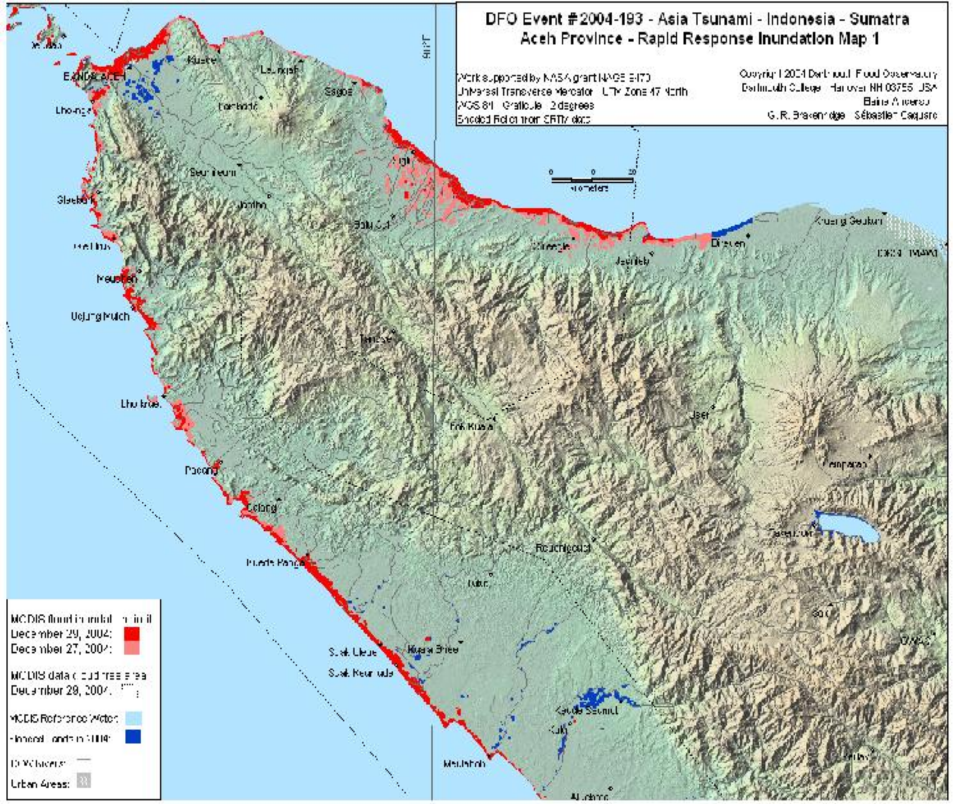

94°
95°
96°
6°
5°
cea
1 h 58 min
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Work supported by NASA grant
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
WGS 84 Graticule 2 degrees
Shaded Relief from SRTM data
Copyright 2004 Dartmouth Flood Observatory
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
G. R. Brakenridge Sébastien Caquard
kilometers
MODIS flood inundation
December 29, 2004:
December 27, 2004:
MODIS data cloud free area
December 28, 2004:
MODIS Reference Water:
Urban Areas:
Kuala Simpang
Banda Aceh
Lhoknga
Seulimeum
Sigli
Calang
Meulaboh

D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE

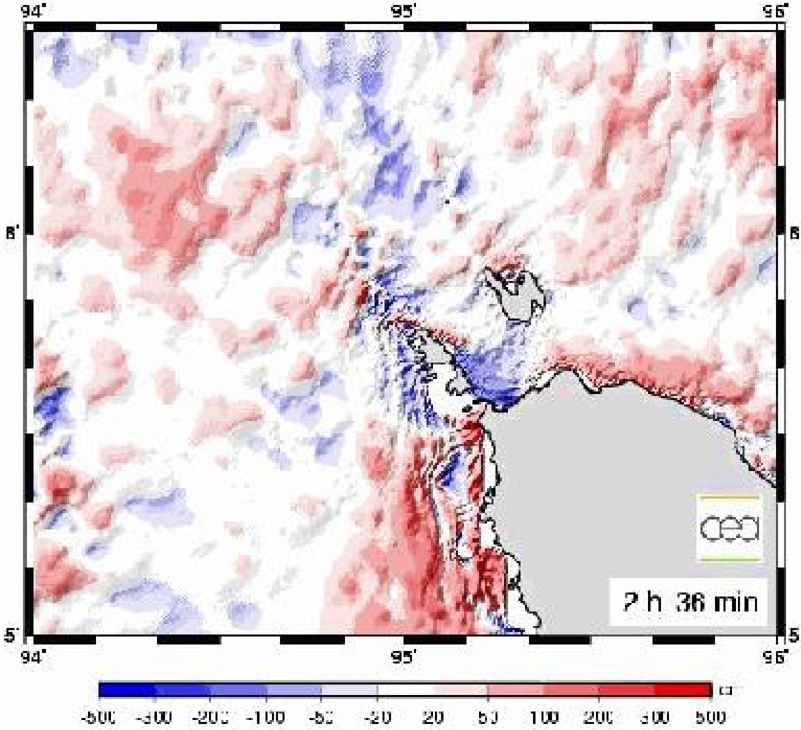
Premiers modèles

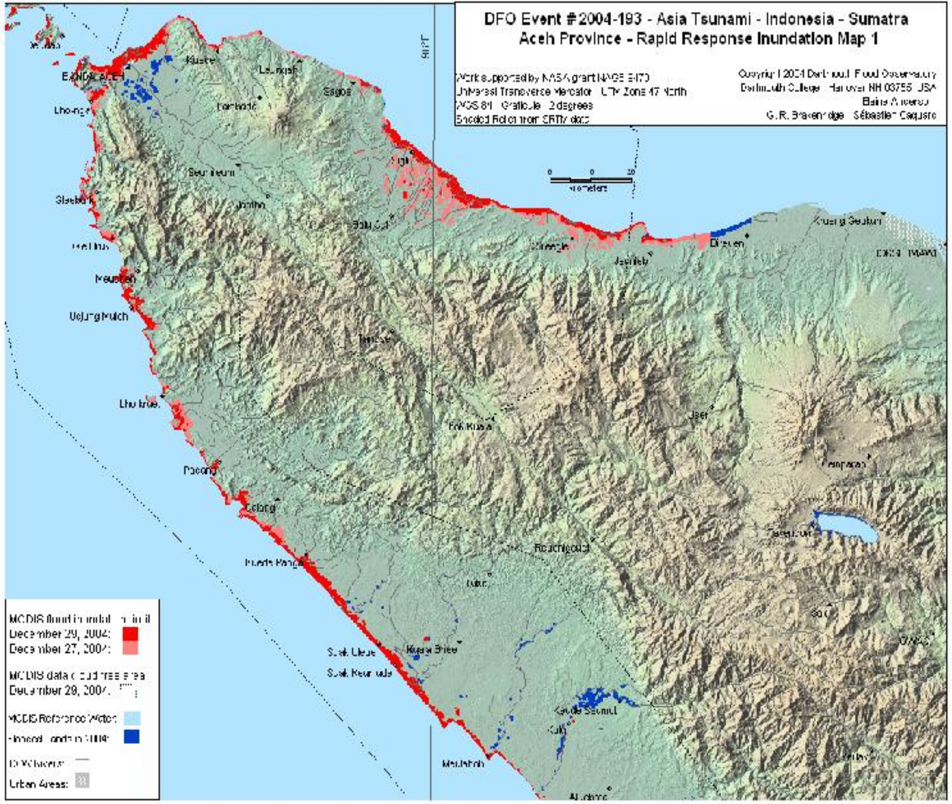

94°
95°
96°
6°
5°
cea
2 h 13 min
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
G. R. Brakenridge Sébastien Caquard
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
Kilometers
BANDA ACEH
Lhoknga
Calang
Meulaboh
Lhokseumawe
December 29, 2004:
December 27, 2004:
December 29, 2004:
Urban Areas:

D’après
Hélène Hebert
CEA - DASE

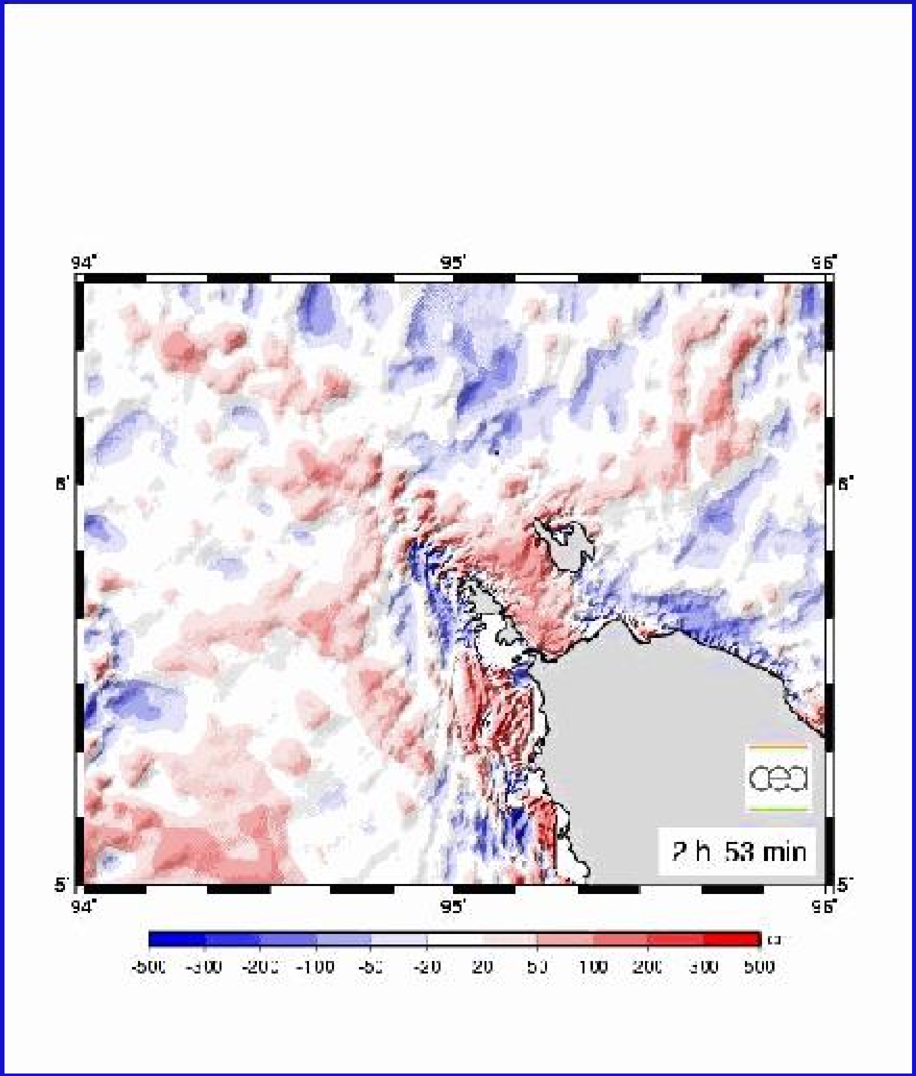
Premiers modèles

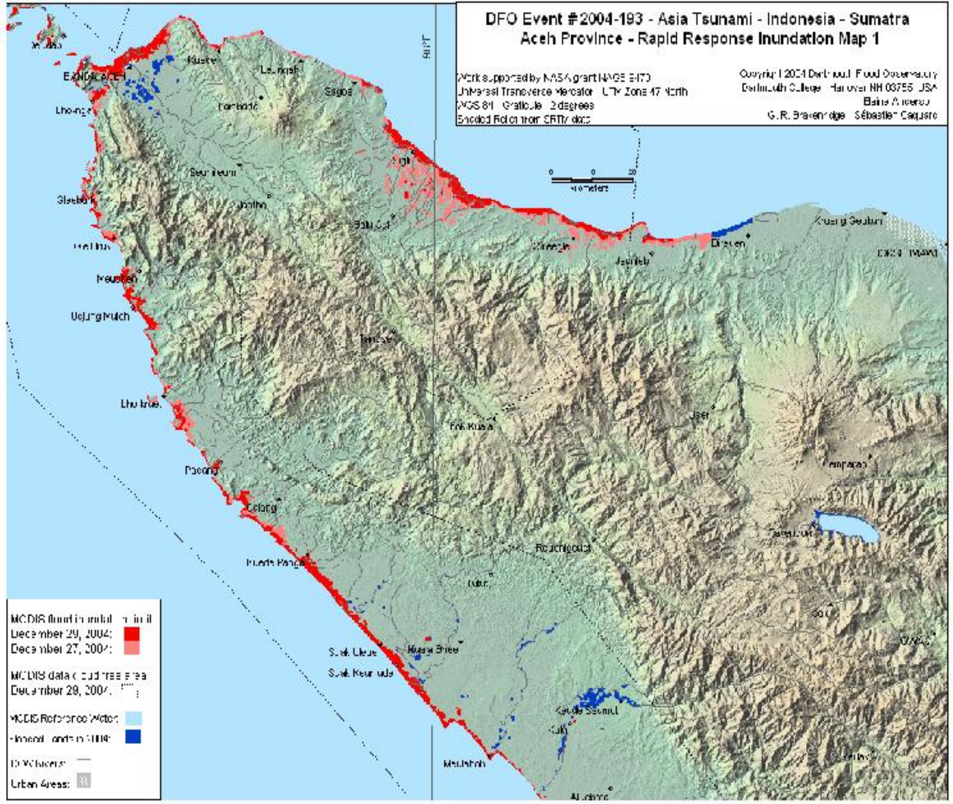

94°
95°
96°
6°
5°
cea
2 h 36 min
-500
-300
-200
-100
-50
-20
20
50
100
200
300
500
cm


DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Work supported by NASA grant NAG5 ...
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
WGS 84 Graticule 2 degrees
Shaded Relief from SRTM data
Copyright 2004 Dartmouth Flood Observatory
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
G. R. Brakenridge Sébastien Caquard
Kilometers
BANDA ACEH
Uejung Mulch
MODIS flood inundation
December 29, 2004: 🟥
December 27, 2004: 🟥
MODIS data cloud free area
December 29, 2004:
MODIS Reference Water: 🟦
Flooded Lands in 2004: 🟦
Urban Areas: ▨

D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE

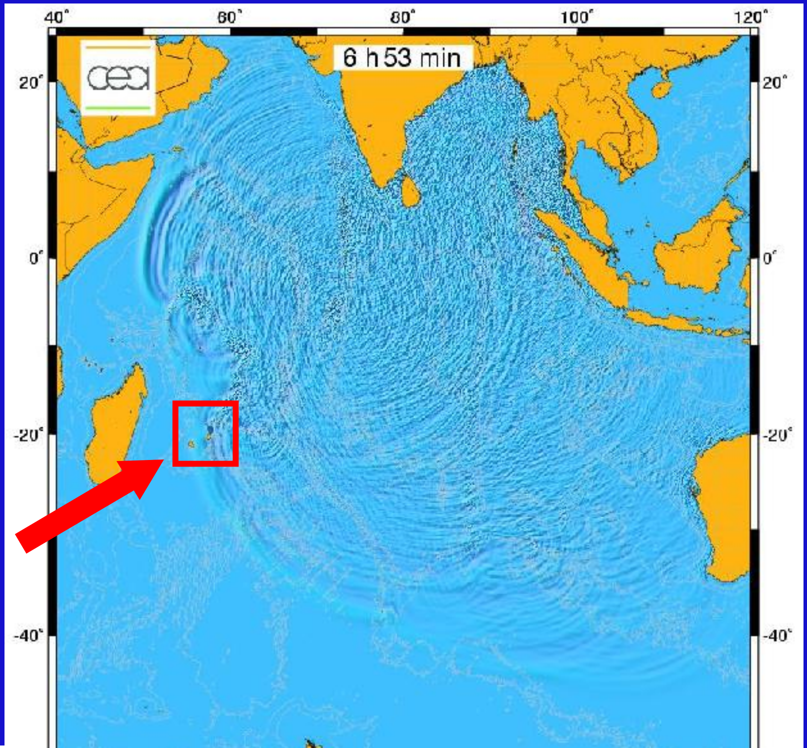
Premiers modèles

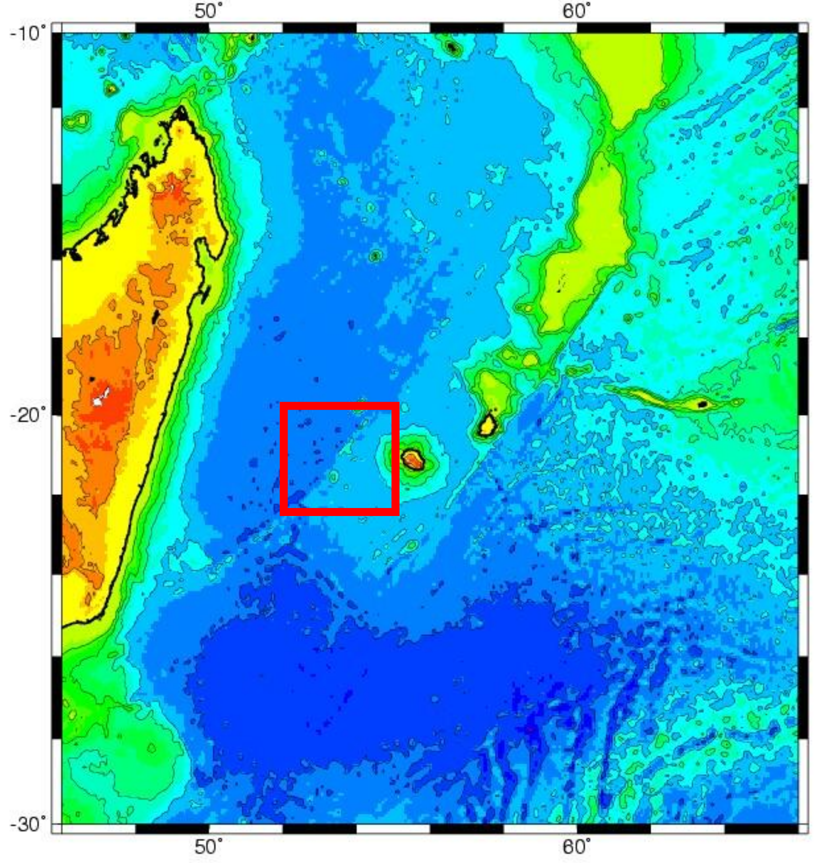

94°
95°
96°
6°
5°
2 h 53 min
cea
-500 -300 -200 -100 -50 -20 20 50 100 200 300 500
cm

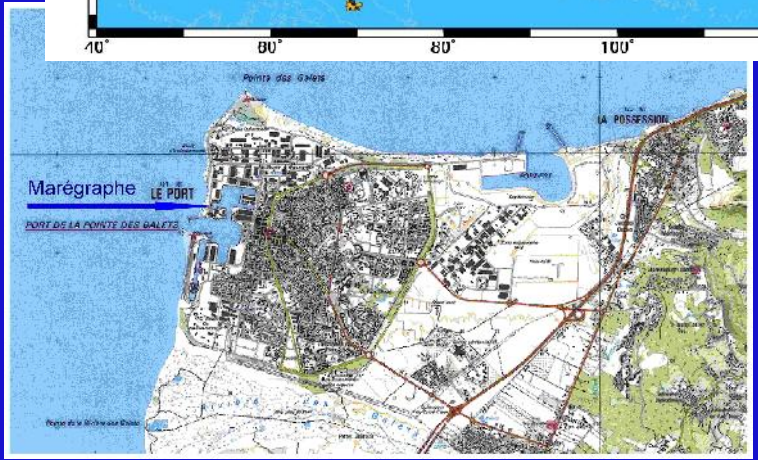

DFO Event #2004-193 - Asia Tsunami - Indonesia - Sumatra
Aceh Province - Rapid Response Inundation Map 1
Universal Transverse Mercator UTM Zone 47 North
Graticule 2 degrees
Dartmouth College Hanover NH 03755 USA
G.R. Brakenridge Sébastien Caquard
0 0 20
Kilometers
BANDA ACEH
Meulaboh
MODIS flood inundation
December 29, 2004: 🟥
December 27, 2004: 🟥
MODIS data cloud free area
December 29, 2004:
MODIS Reference Water: 🟦
Urban Areas: ▨

D'après
Hélène Hebert
CEA - DASE

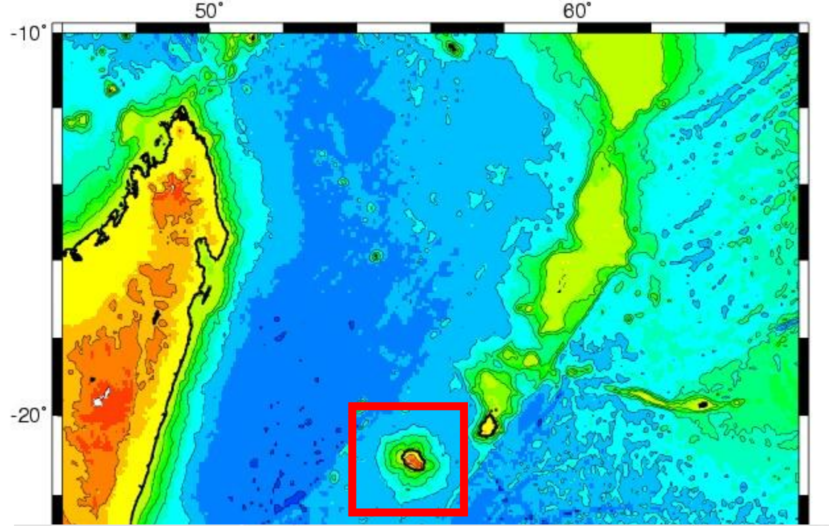
La Réunion

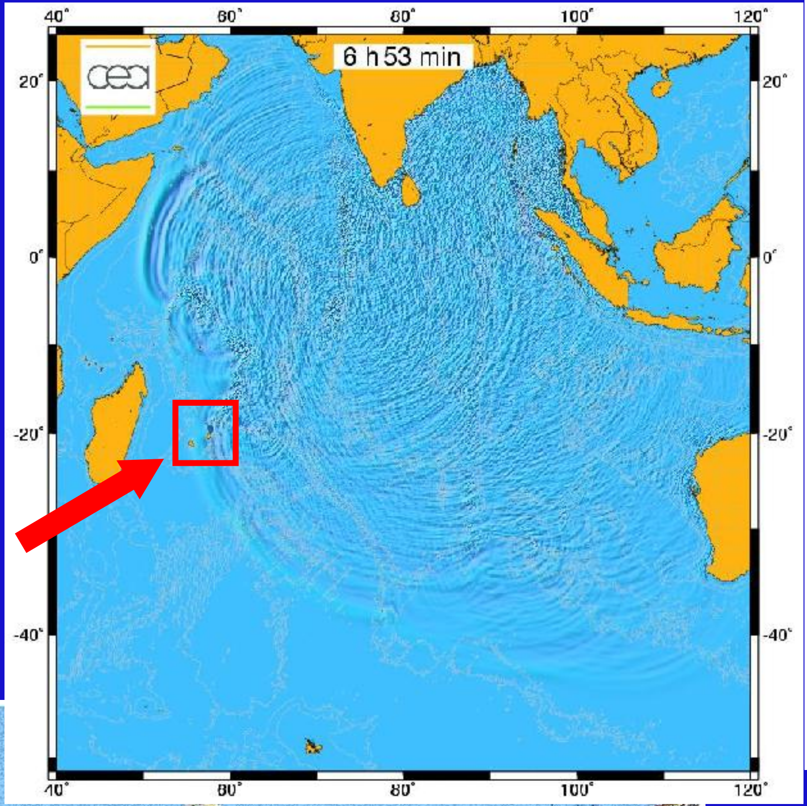

6 h 53 min
cea
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°

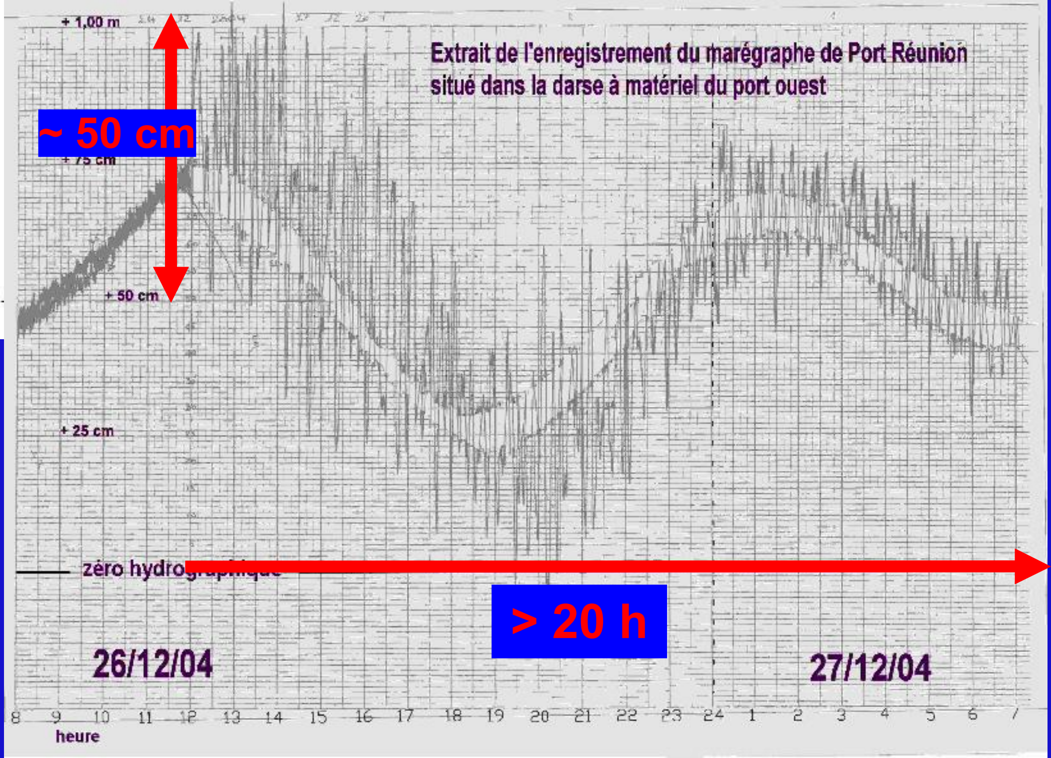

50°
60°
-10°
-20°
-30°


Pointe des Galets
LA POSSESSION
Marégraphe
LE PORT
PORT DE LA POINTE DES GALETS

La Réunion




cea
6 h 53 min
40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°


Extrait de l'enregistrement du marégraphe de Port Réunion situé dans la darse à matériel du port ouest

Marégraphe
LE PORT
PORT DE LA POINTE DES GALETS
LA POSSESSION

Moyens d’observations et systèmes d’alertes

Les moyens d'observation

Moyens au sol:

- les sismomètres (mouvement du sol)
- les marégraphes (mouvement de la surface de l'eau)
- les capteurs de pression (mouvement de la hauteur d'eau)
- les mesures sur le terrain

Outils satellitaires:

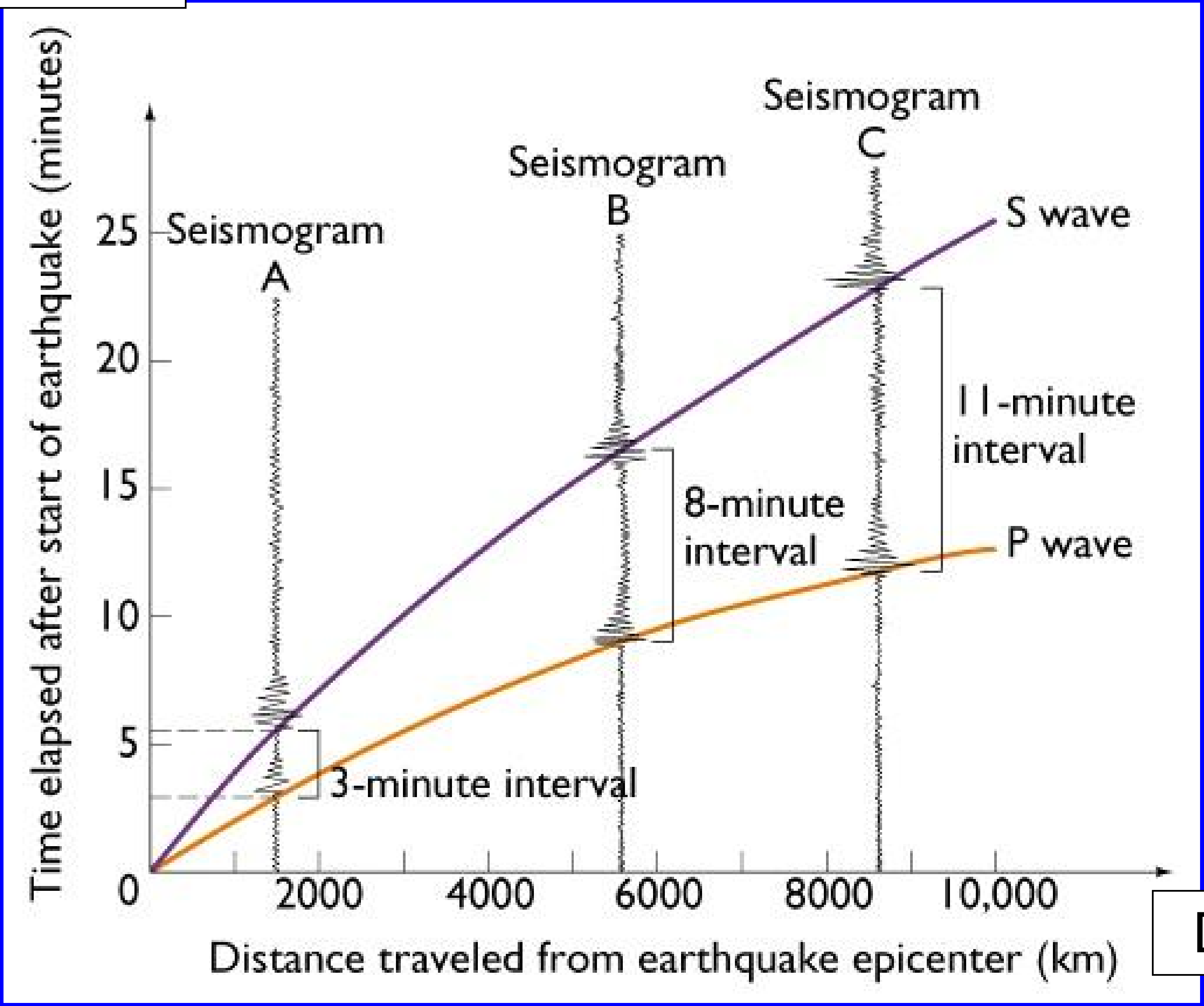
- les satellites imageurs (photos avant/après)
- les satellites altimétriques (mesure de la hauteur d'eau de l'océan)

Outils de demain:

- télédétection spatiale et radars

Courbes de temps de parcours des ondes P et S

Temps



Distance

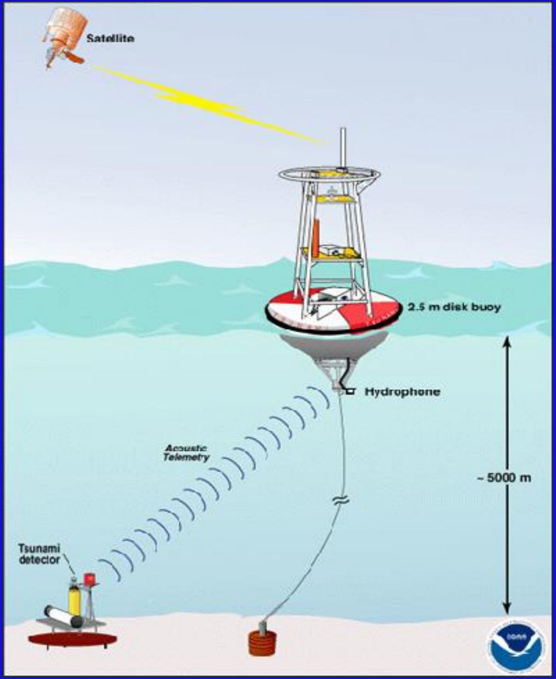
Marégraphes et capteurs de pression

Enregistrement de la hauteur d'eau:

Mesure des marées et des tsunamis

Marégraphe sur l'île de Kerguelen

Capteur de pression en fond de mer
et système de communication


Satellite
2.5 m disk buoy
Hydrophone
Acoustic Telemetry
~ 5000 m
Tsunami detector

⇒ Amélioration des modèles de prédiction de la marée

⇒ Localisation des sources de tsunami

⇒ Détermination de l'intensité des tsunamis

Les systèmes d’alerte

- Un seul système opérationnel avant décembre 2004 :

Le système d’alerte du Pacifique

- 40 nations contribuent dont la France pour la Polynésie Française

Les systèmes d’alerte

- Un seul système opérationnel avant décembre 2004 :
Le système d’alerte du Pacifique
- 40 nations contribuent dont la France pour la Polynésie Française

- Schéma de principe du dispositif d’alerte:

Réseaux de sismomètres

Localisation et intensité du séisme

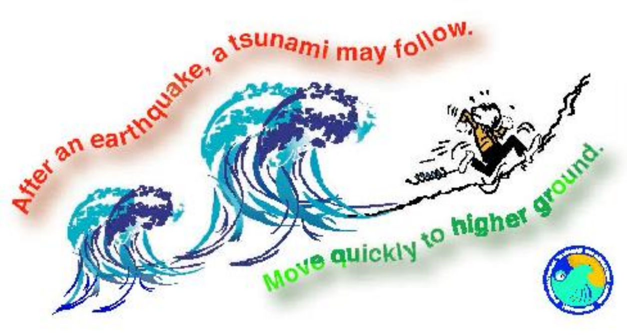
Emission d’une alerte tsunami

Marégraphes et capteurs de pression

Détection de l’onde de tsunami

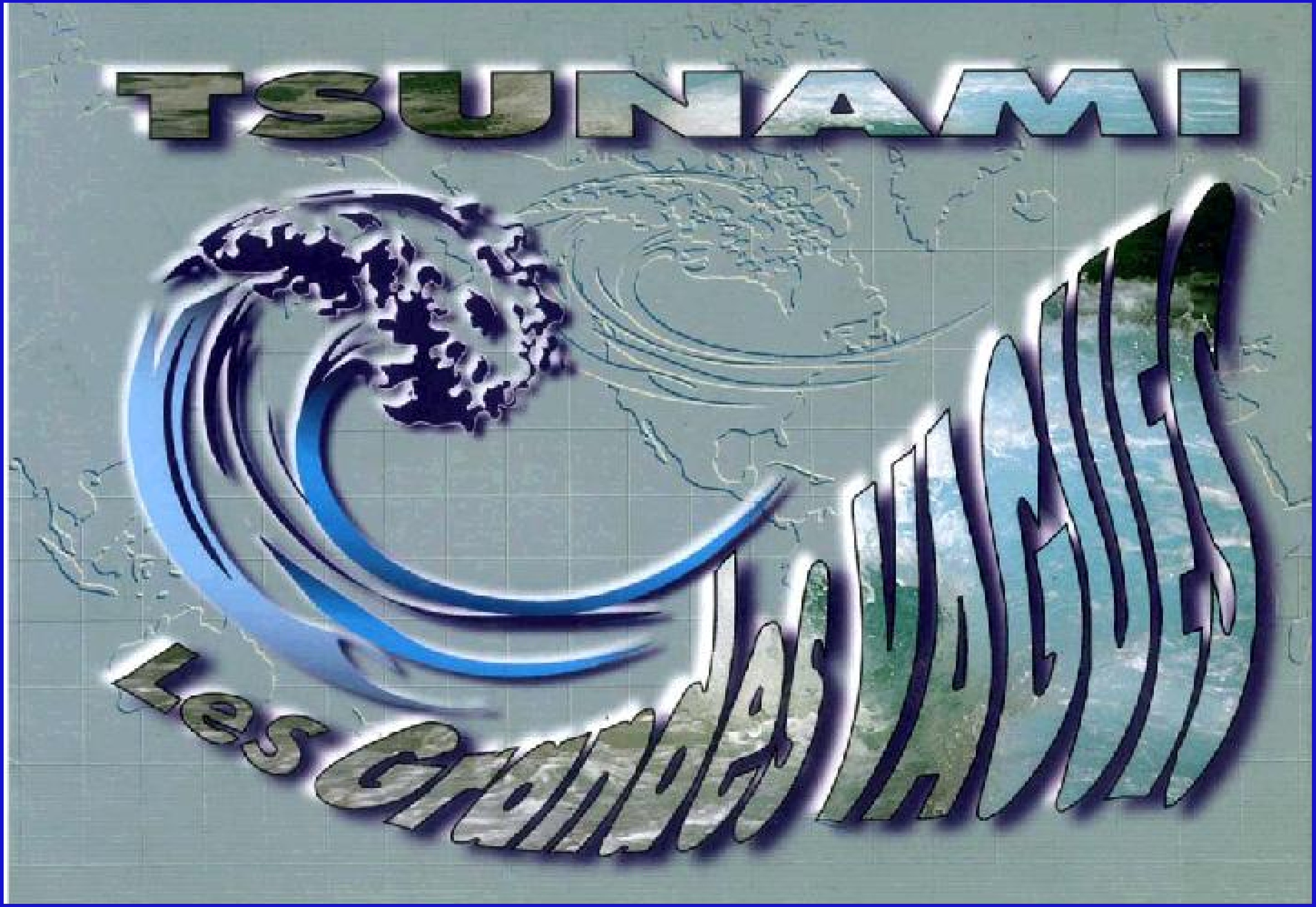
Validation de l’alerte

Diffusion de l’alerte par des réseaux locaux

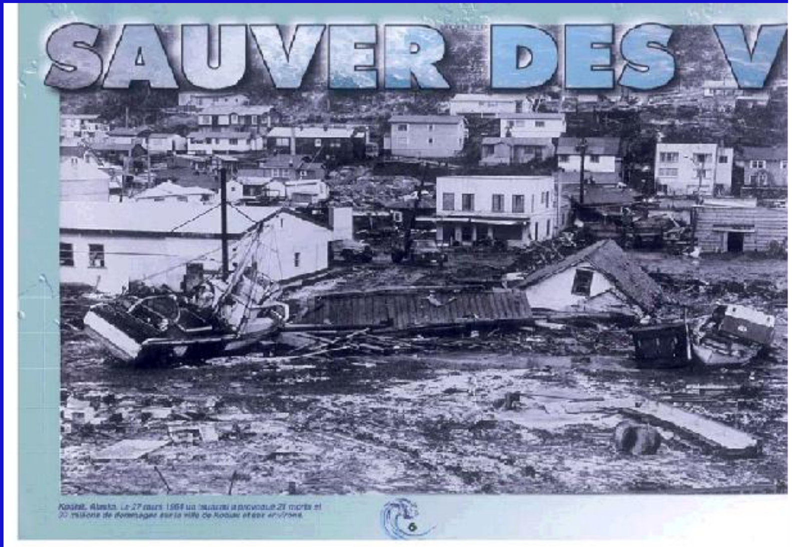
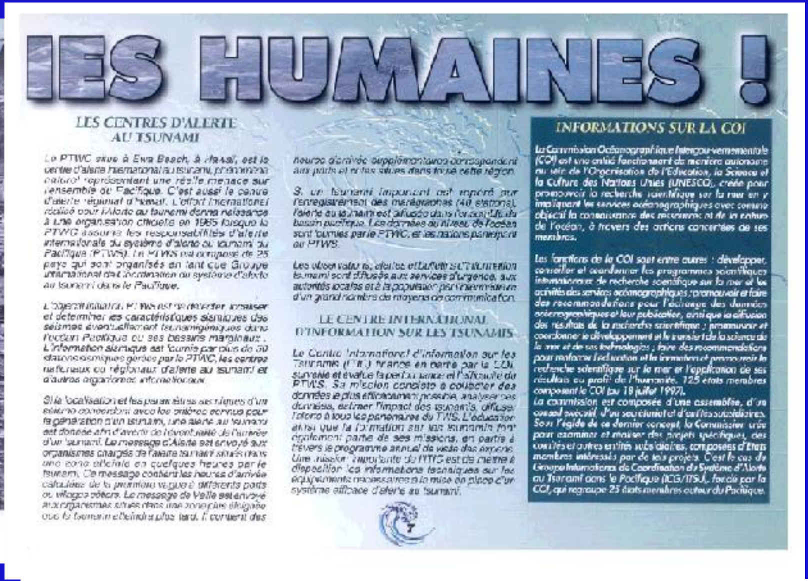

After an earthquake, a tsunami may follow.
Move quickly to higher ground.

La prévention des tsunamis

Brochure distribuée dans tout le pacifique en différentes langues


TSUNAMI
Les Grandes VAGUES

La prévention des tsunamis

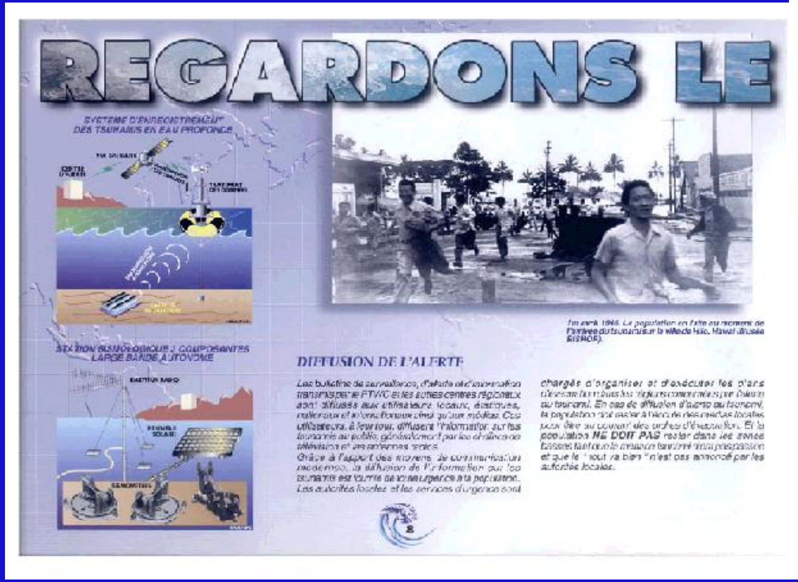
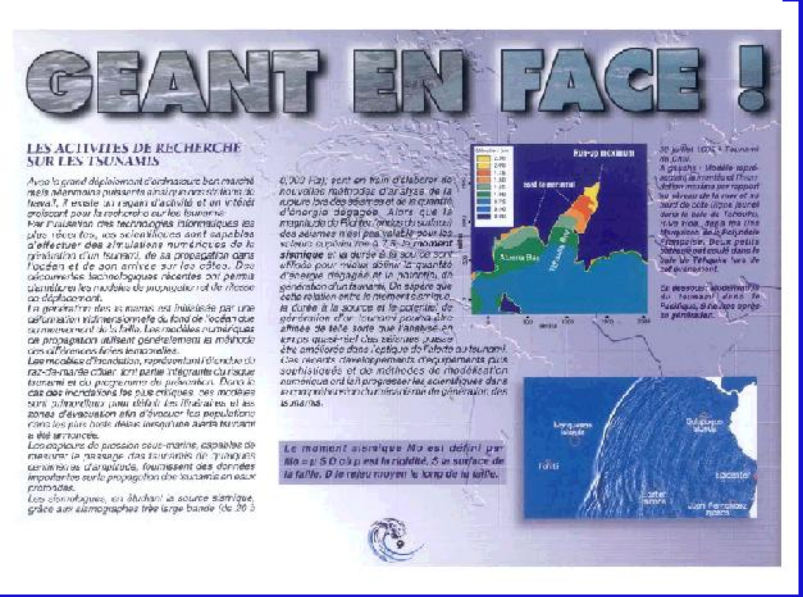



SAUVER DES VIES HUMAINES !

LES CENTRES D'ALERTE AU TSUNAMI

LE CENTRE INTERNATIONAL D'INFORMATION SUR LES TSUNAMIS

INFORMATIONS SUR LA COI

REGARDONS LE GEANT EN FACE !

SYSTEME D'ENREGISTREMENT DES TSUNAMIS EN EAU PROFONDE
STATION SISMOLOGIQUE 3 COMPOSANTES LARGE BANDE AUTONOME
Runup maximum

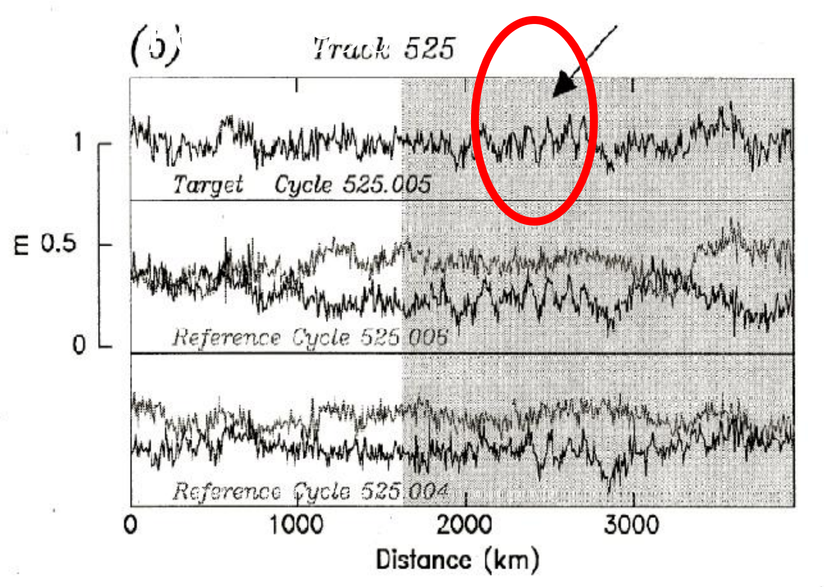
DIFFUSION DE L'ALERTE

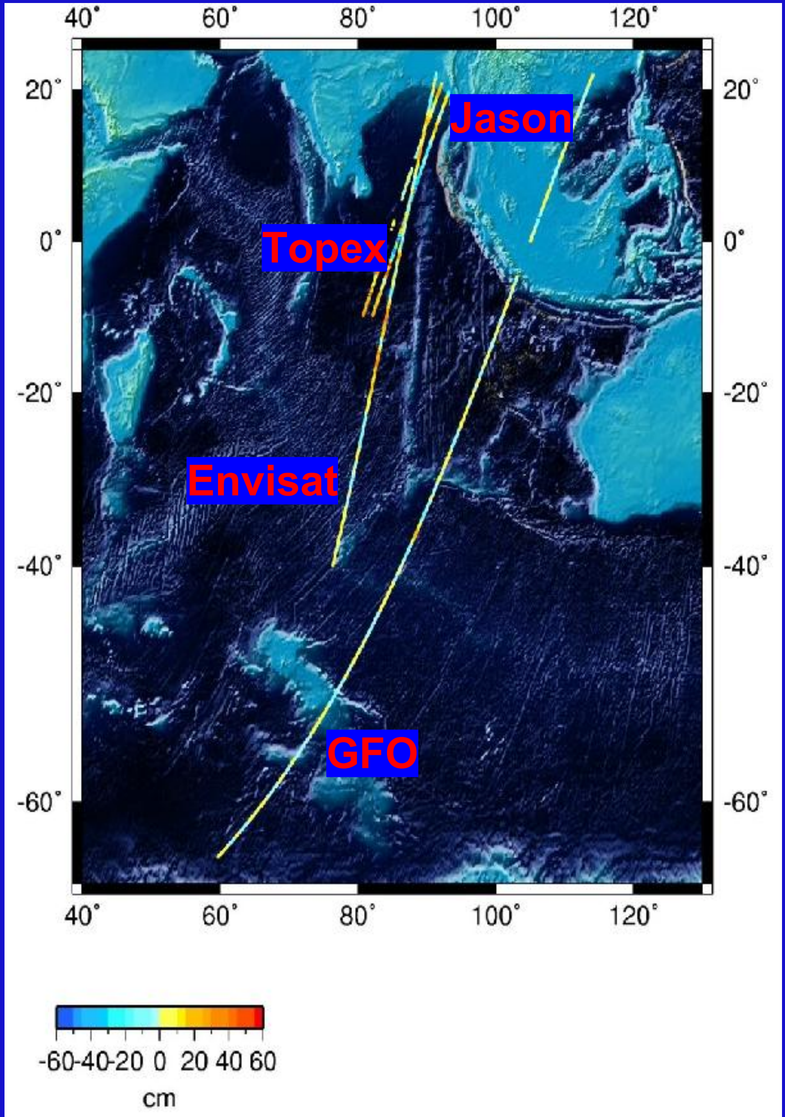
LES ACTIVITES DE RECHERCHE SUR LES TSUNAMIS

La dimension spatiale

Enregistrements altimétriques

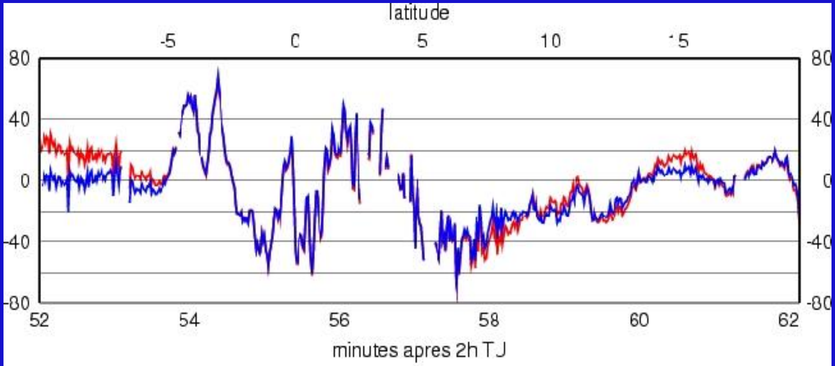
- Première observation d'un tsunami au large par des satellites altimétriques : Jason - Topex/Poseidon - Envisat - GFO
- Essai dans les années 90 sur ERS1 et Topex (Okal et al., 1999)
  - amplitude de 8 cm probablement détectée sur le tsunami du Nicaragua 1992
  - autres essais plus infructueux (Chili



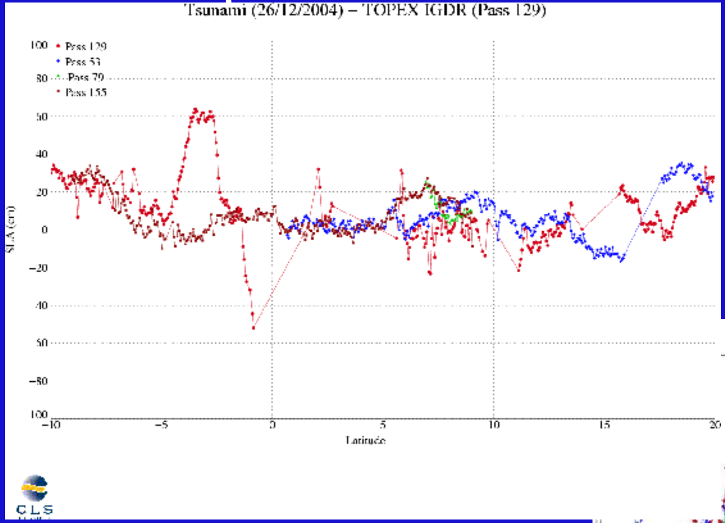

40°
60°
80°
100°
120°
20°
0°
-20°
-40°
-60°
Jason
Topex
Envisat
GFO
-60 -40 -20 0 20 40 60
cm

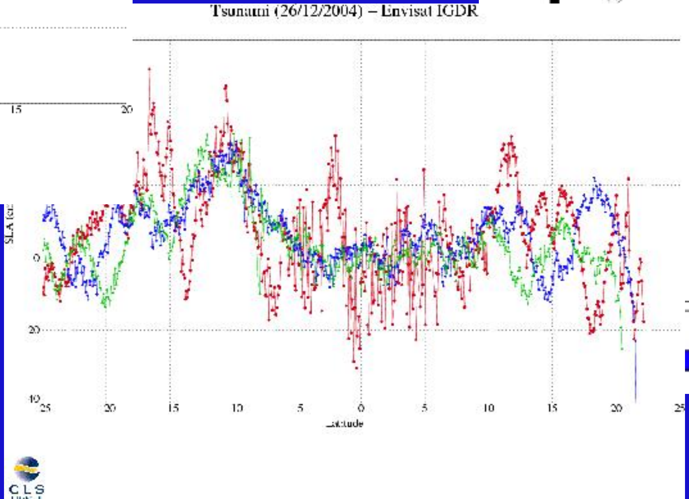
Données altimétriques

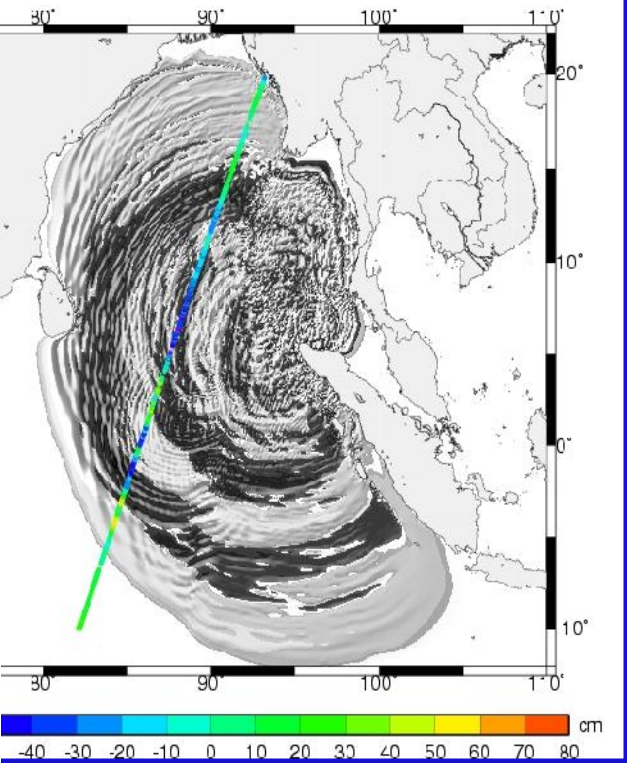
- Tsunami "photographié" 2 heures après le séisme
  - sur 9 minutes de propagation du satellite



- Amplitudes de 60 cm à 1m !

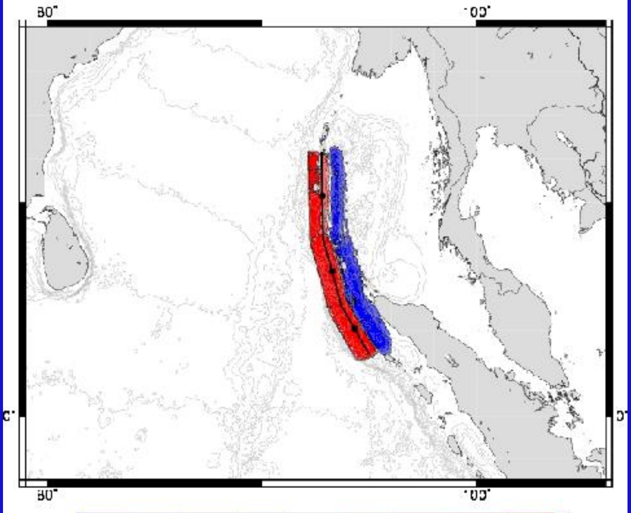


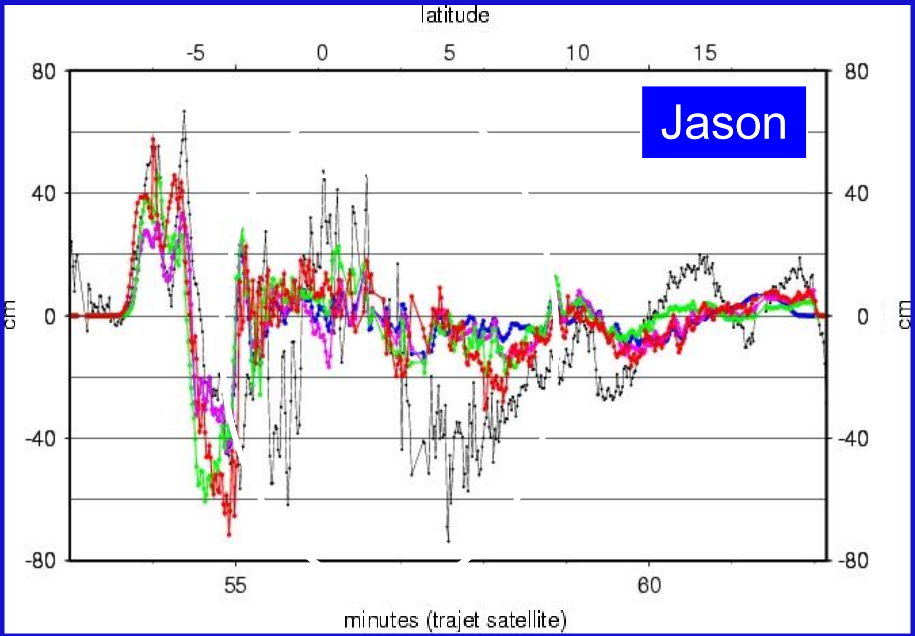


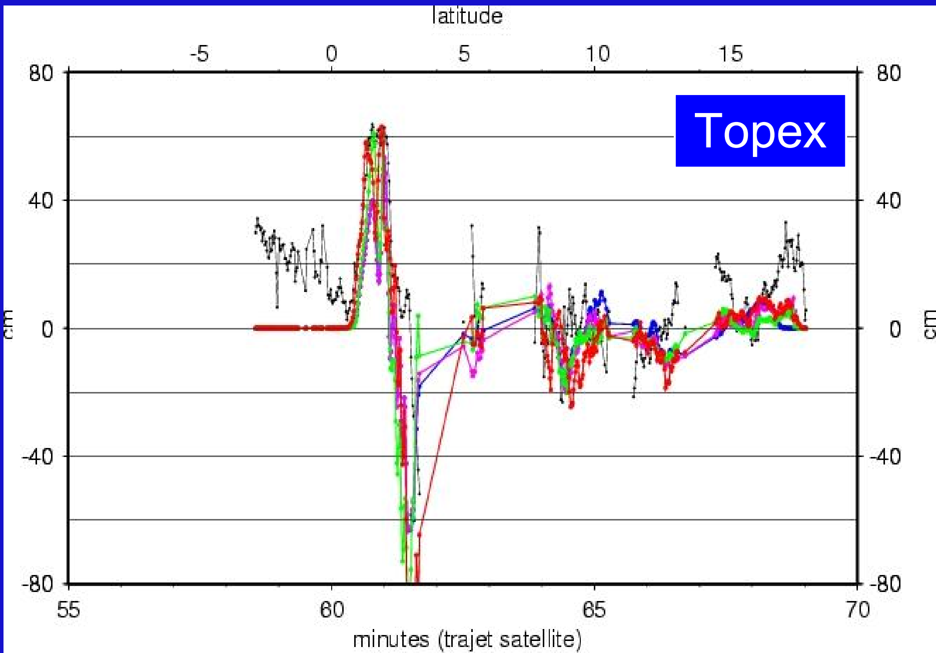

80°
90°
100°
110°
20°
10°
0°
10°
cm
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50
60
70
80

Modèles

- **M_w 8.9** 🟦 : faille 650 x 100 km, Z = 15 km, pendage 12°
  - 12 m de glissement uniforme
- **M_w 9.0** 🟪 : faille 1100 x 100 km
  - 12 m de glissement Sud , 5 m au Nord
- **M_w 9.0** 🟩 : faille 1100 x 100 km
  - 20 m de glissement au Sud, 6 m au milieu 4 m au Nord
- **M_w 9.2** 🟥 : faille 1100 x 130 km
  - 20 m de glissement au Sud, 12 m au milieu, 6 m au Nord


80°
100°
0°
4.00
1.00
0.50
0.10
0.05
0.05
0.10
0.50
1.00
3.00
m



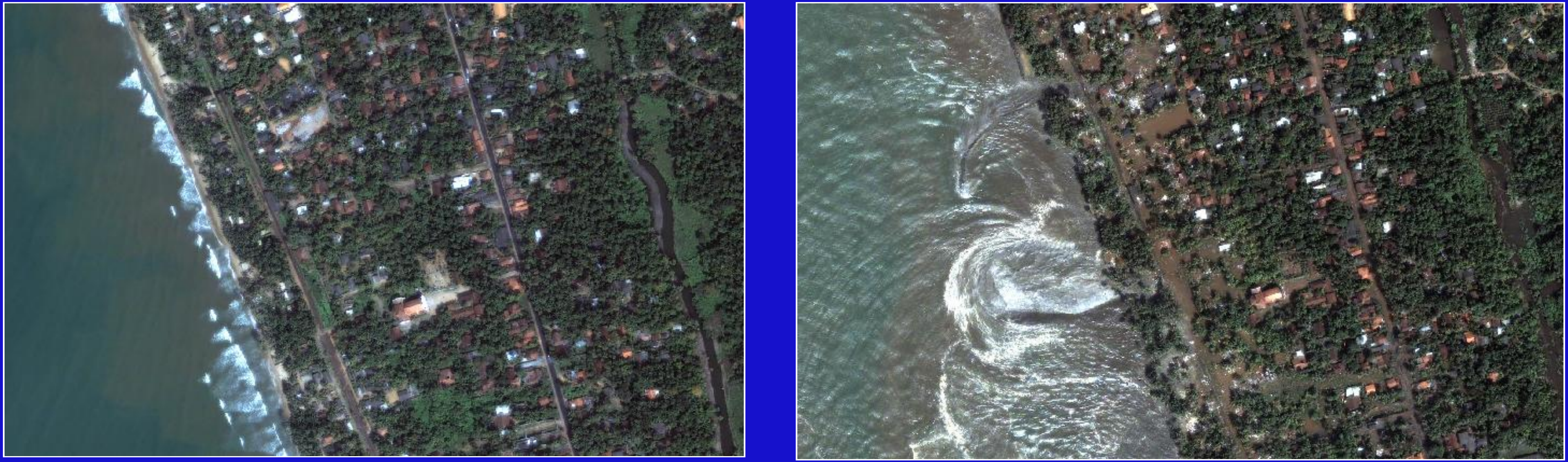


Satellites imageurs : Quickbird

Enregistrement d’images de l’inondation:

Carte des longueurs d’inondation

Plage de Kalutara au Sri Lanka



Juste avant l’arrivée du tsunami

Juste après le tsunami: retrait la mer

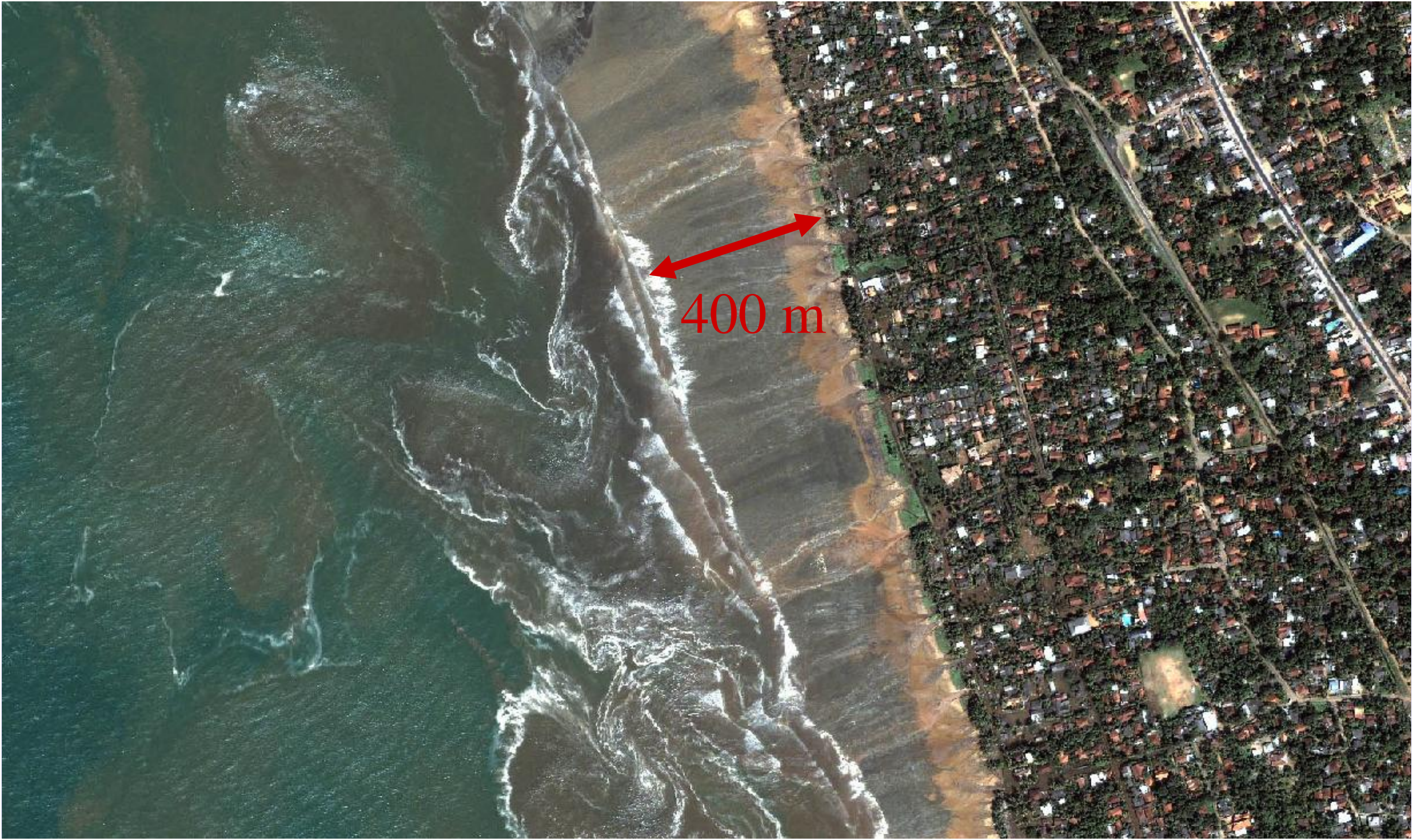
⇒ Estimation des dégats et des longueurs d’inondation

Satellites imageurs : Quickbird

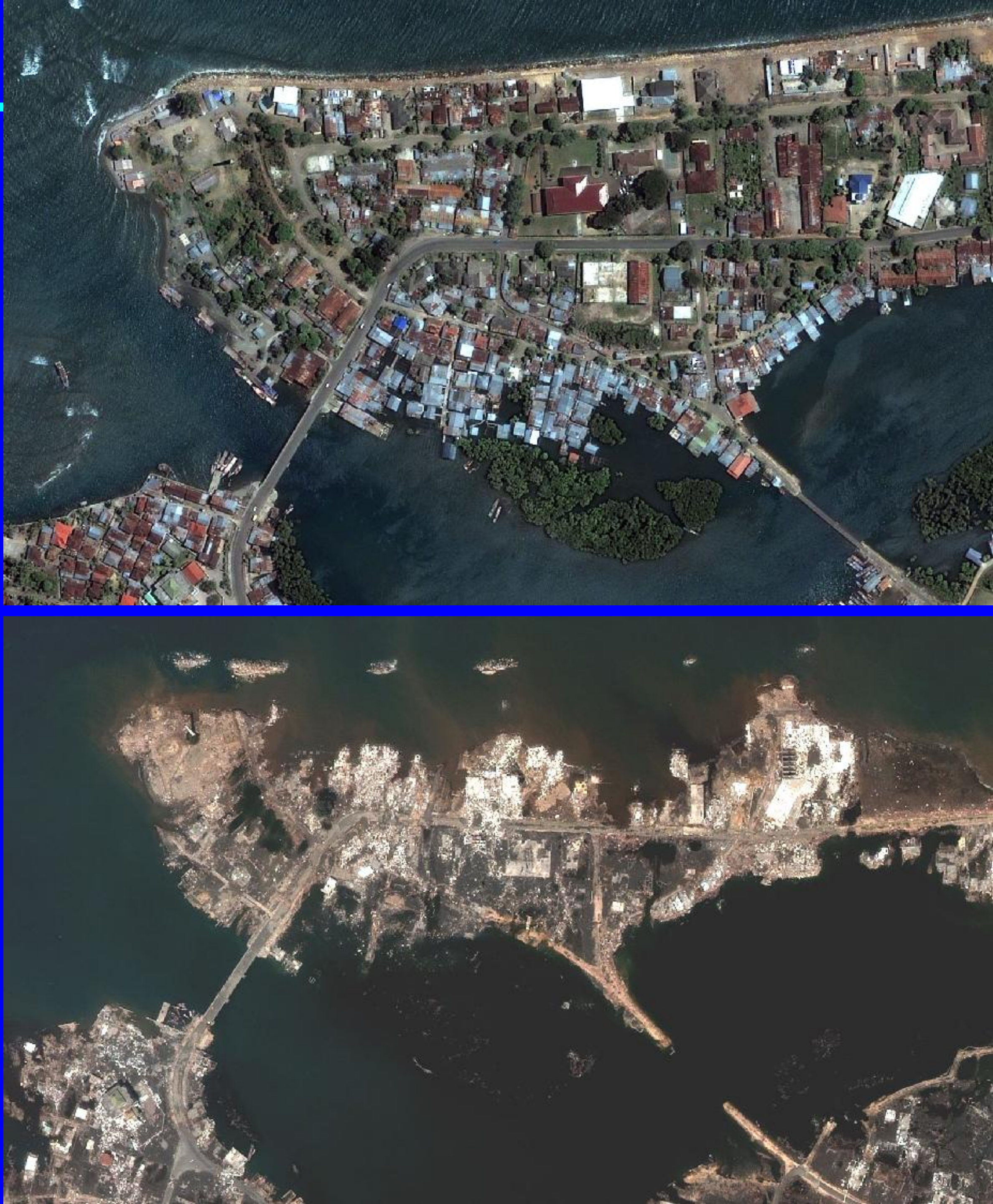
Juste avant l'arrivée de la première vague:

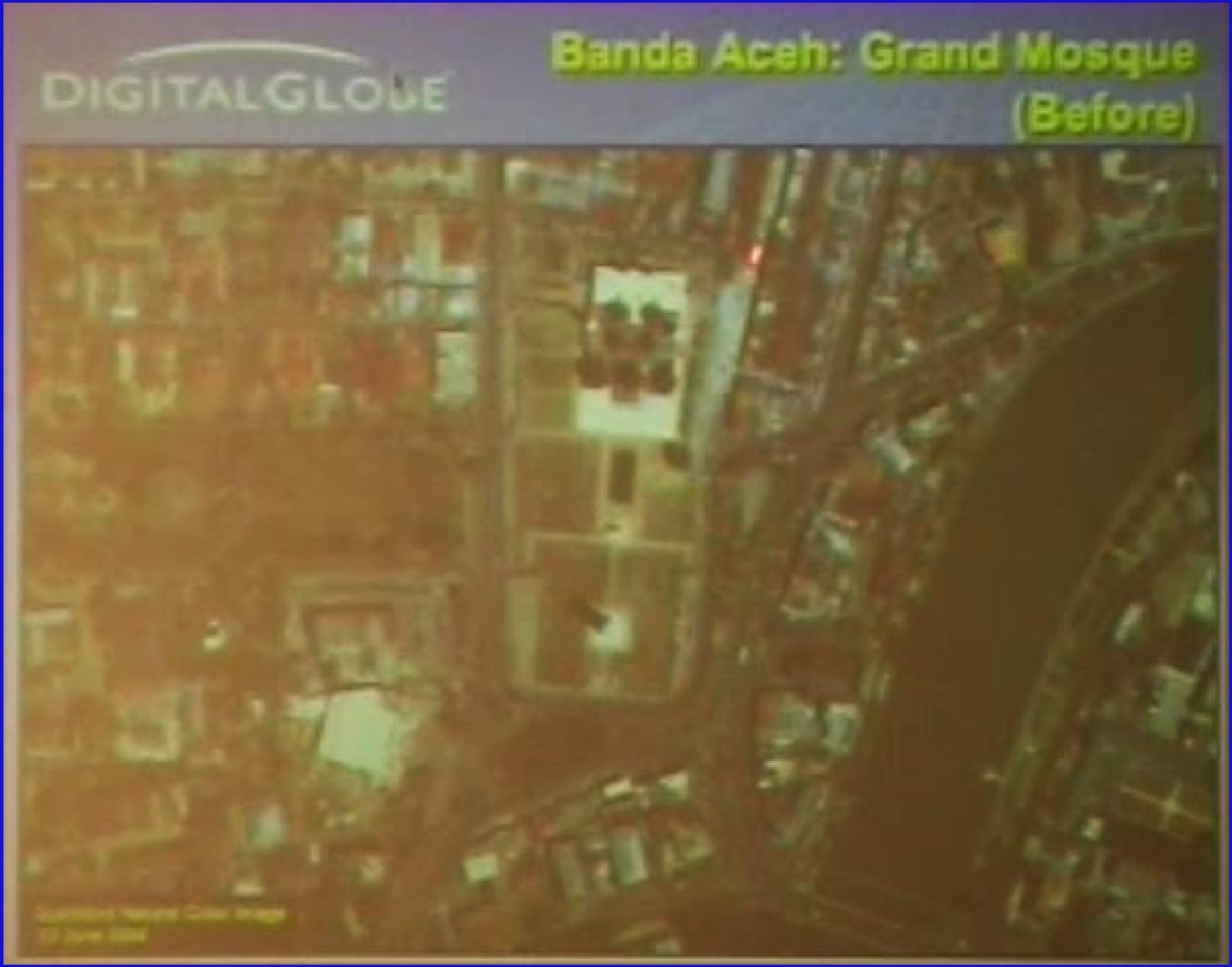
la mer se retire sur 400 mètres

Plage de Kalutara au Sri Lanka

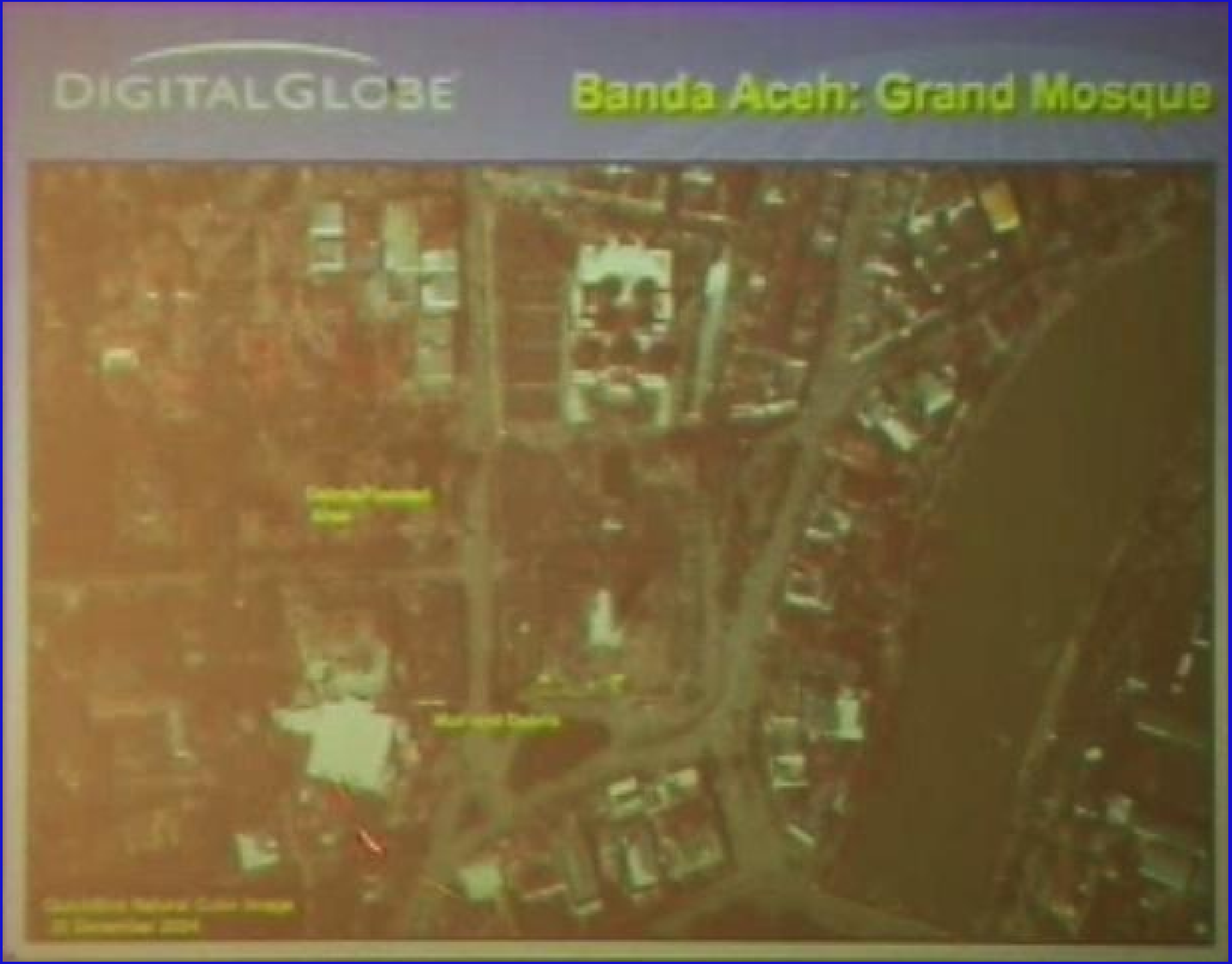


Banda Aceh avant et après le passage du tsunami




DIGITALGLOBE

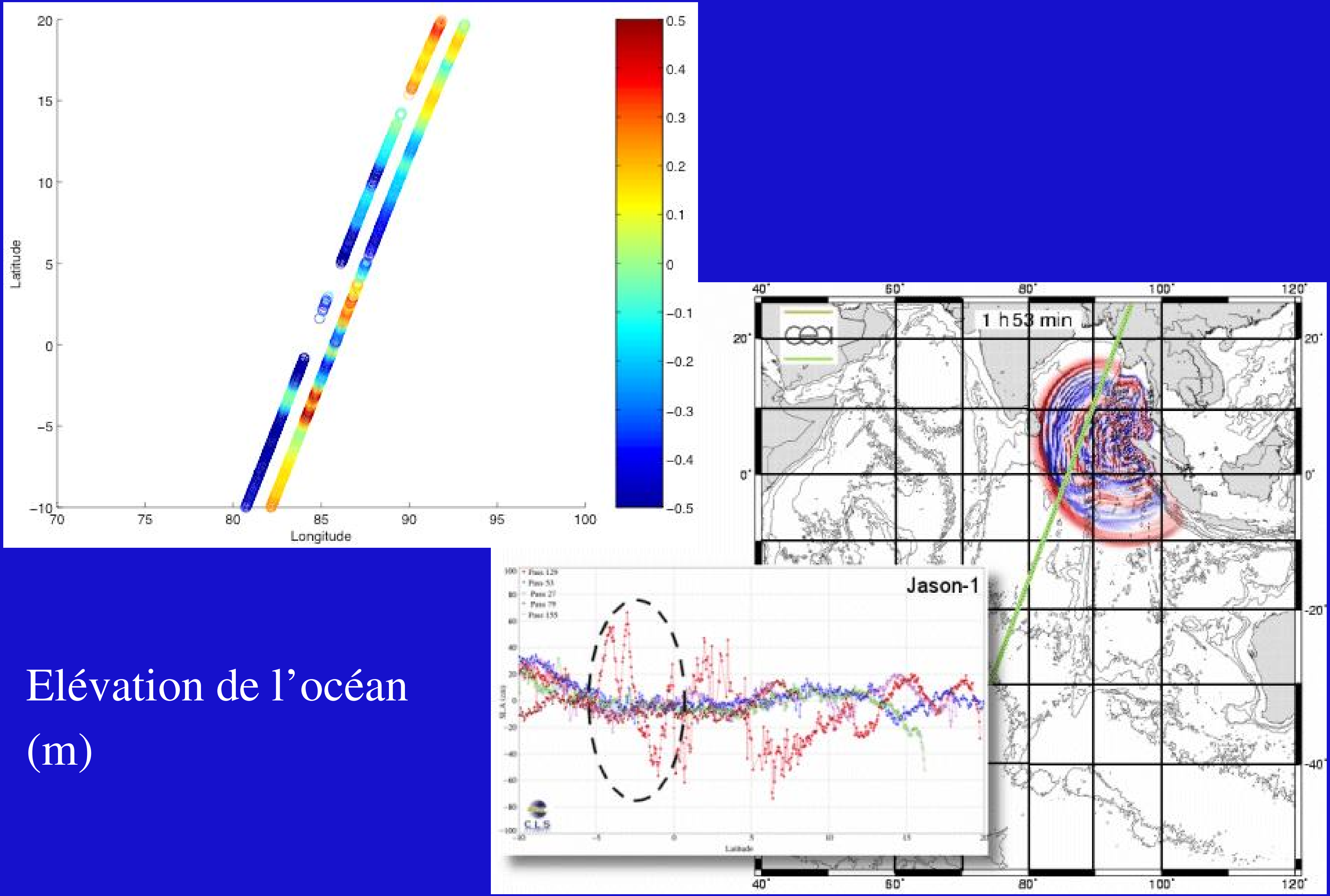
Banda Aceh: Grand Mosque (Before)



DIGITALGLOBE

Banda Aceh: Grand Mosque

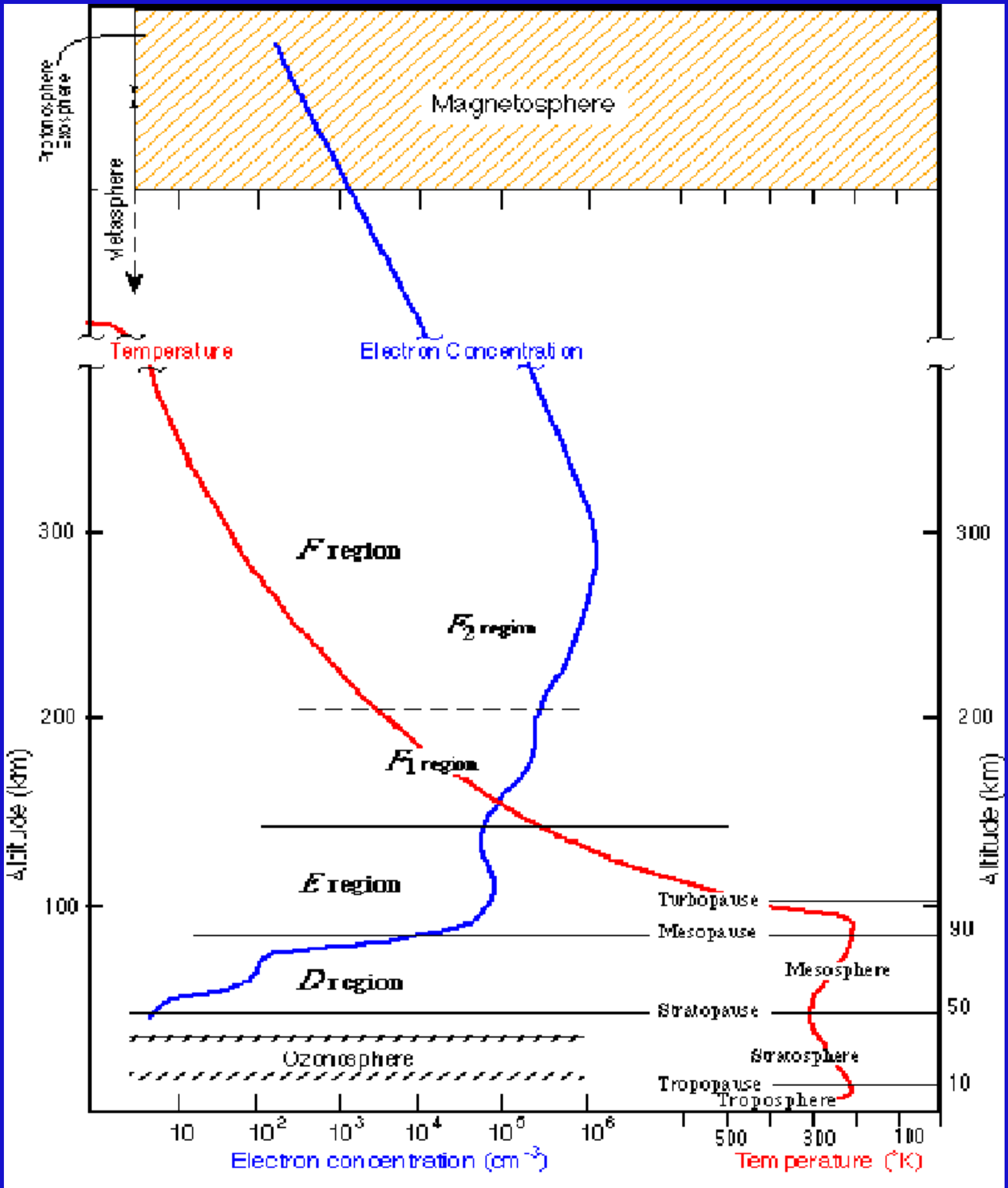
Tsunami en Mer vu par Topex et Jason



Elévation de l'océan
(m)

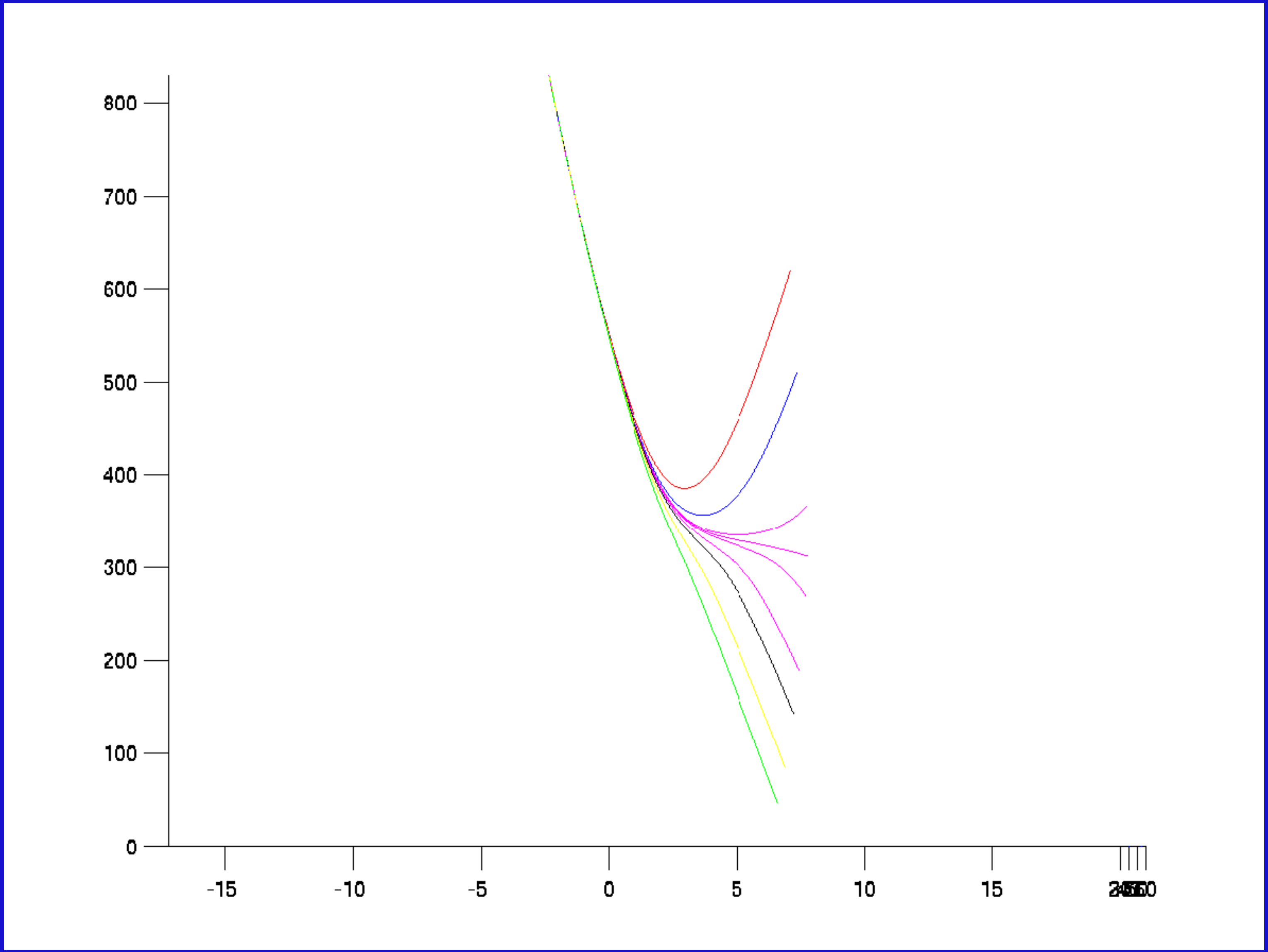
Impact et définition de l’ionosphère…

- Un milieu ionisé à partir de 150 km d’altitude
- Ionisation de l’air en raison du rayonnement et des particules émises par le soleil
- Très faible densité et très grande réactivité



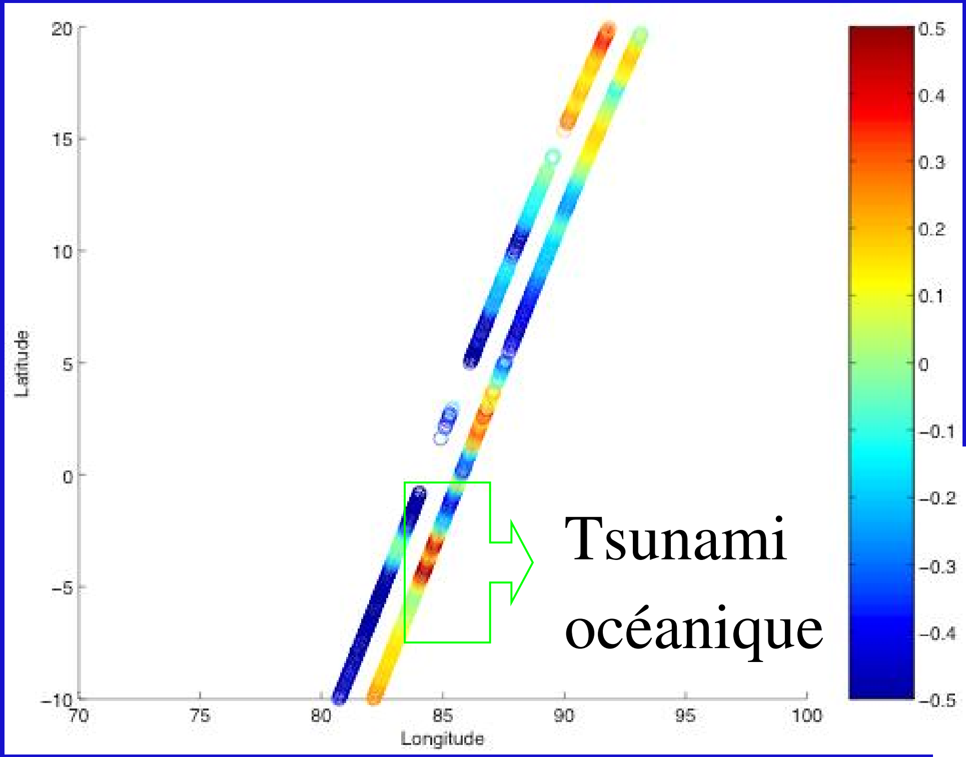
Propagation entre 10 et 15 Mhz

km



degrés

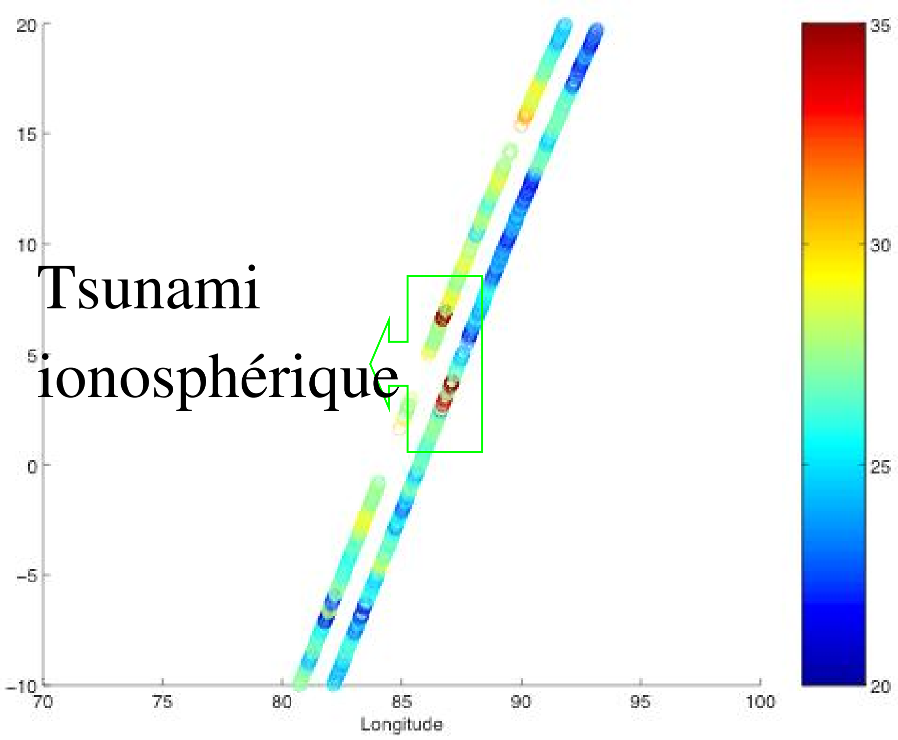
Tsunami en Mer et Ionosphérique (Topex et Jason)



Tsunami océanique

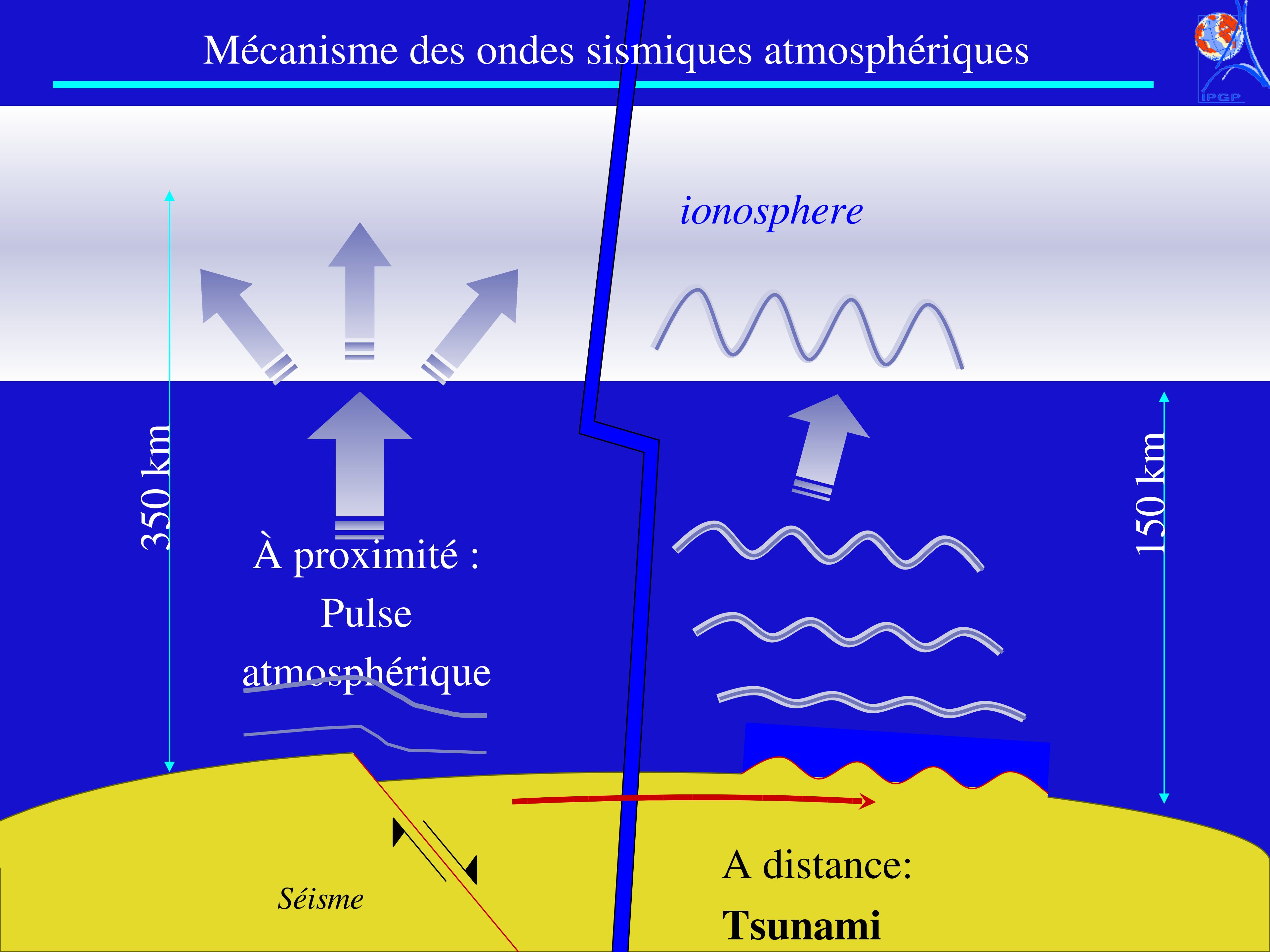
Elévation de l’océan 2 heures après le séisme (m)

Contenu Total Electronique (TECU) 2 heures après le séisme ~ propagation du signal océanique après une heure environ



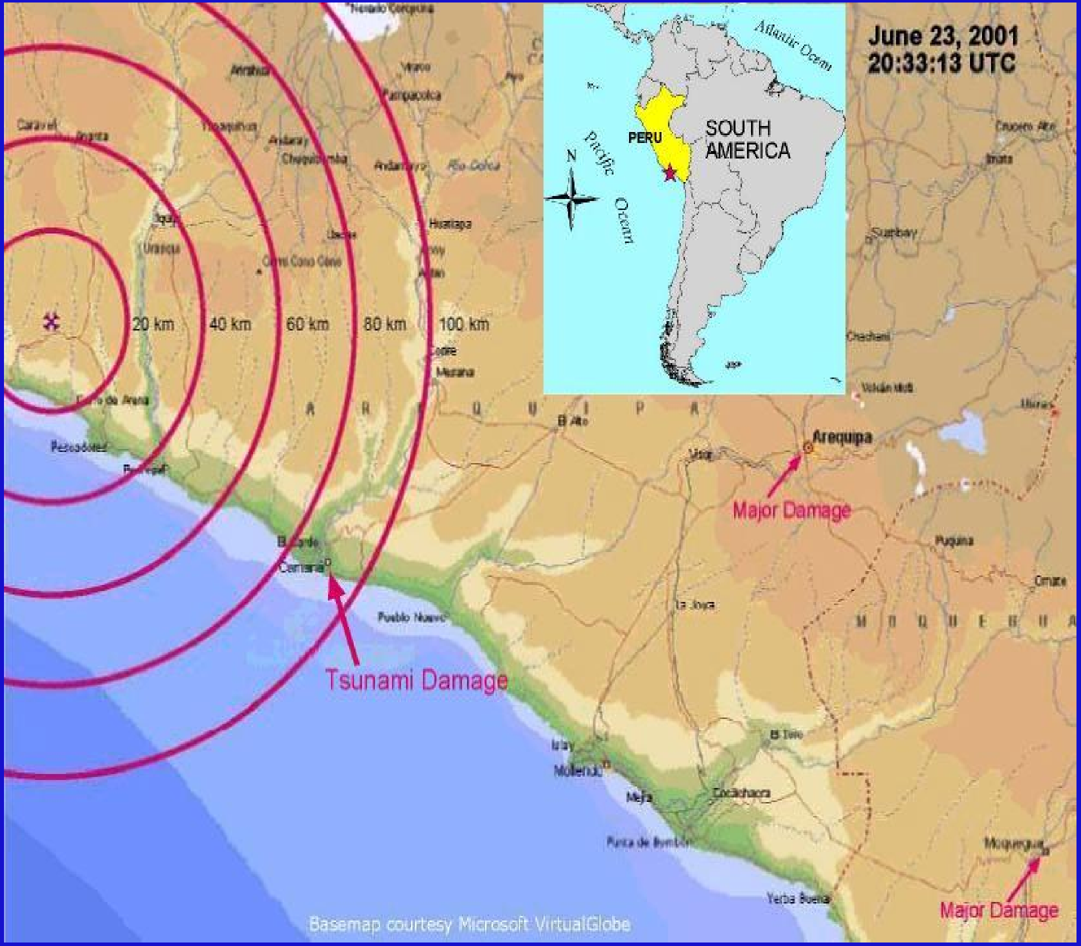
Tsunami ionosphérique

Mécanisme des ondes sismiques atmosphériques


ionosphere
350 km
150 km
À proximité :
Pulse
atmosphérique
Séisme
A distance:
Tsunami

Détection des ondes de tsunami dans l'ionosphère

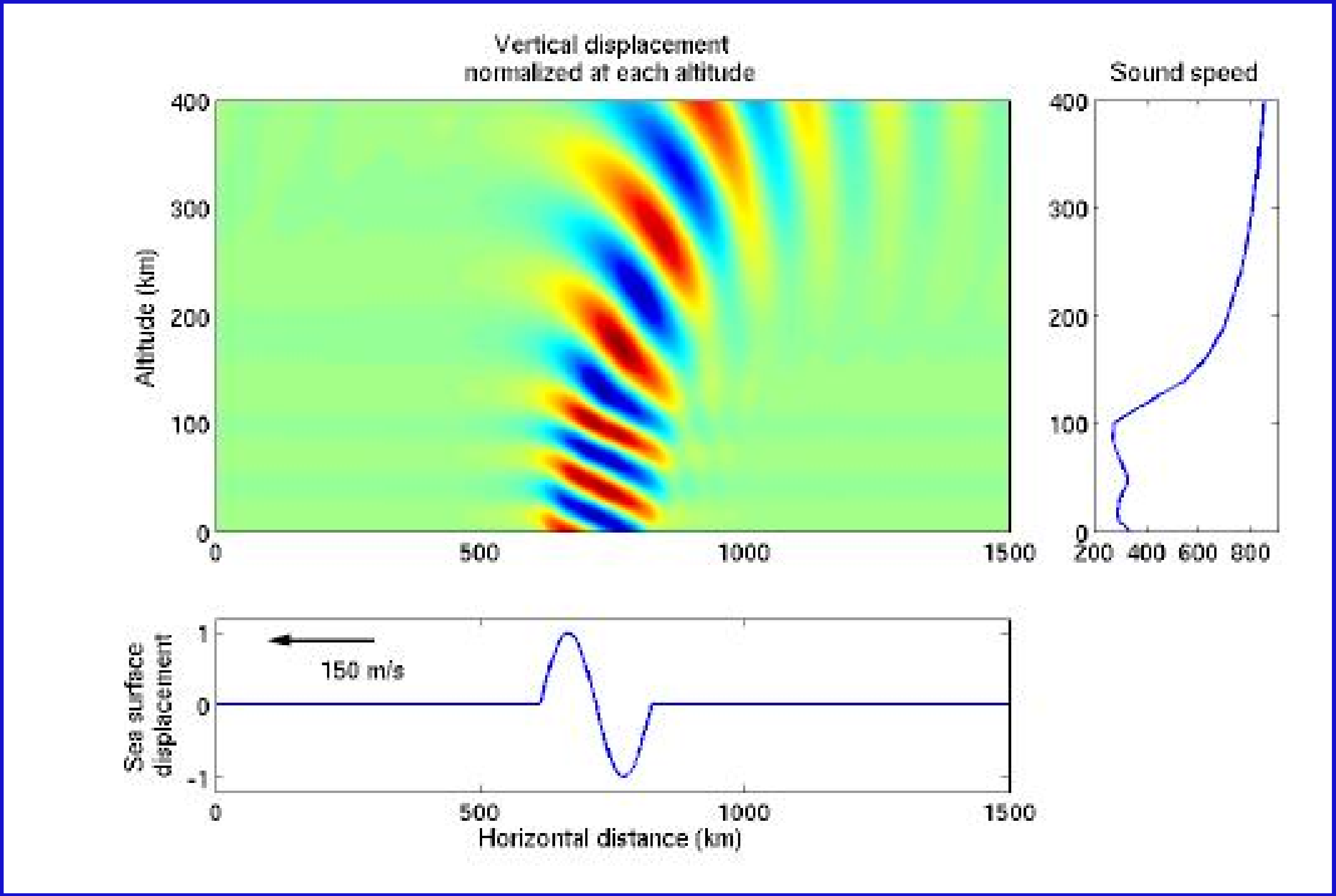
Séisme du Pérou


June 23, 2001
20:33:13 UTC
SOUTH AMERICA
PERU
Pacific Ocean
Atlantic Ocean
N
20 km
40 km
60 km
80 km
100 km
Arequipa
Major Damage
Tsunami Damage
Major Damage
Camaná
Mollendo
Moquegua
Basemap courtesy Microsoft VirtualGlobe

•- Séisme du Pérou
• 23 juin 2001, 16.14 S 73.31O
•- M = 7.9
➔- 20:33:14 TU
➔- Tsunami observé dans l’océan

➔ Pacifique
➔- 10-30 cm au Japon

Principe d'observation



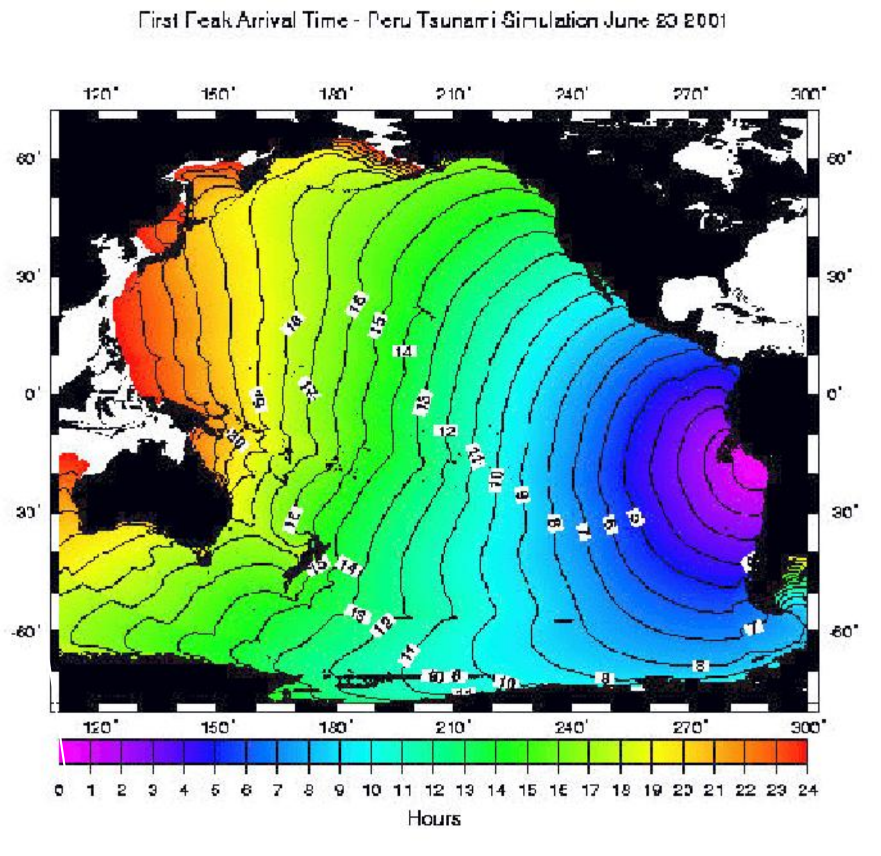
Artru et al., 2004

+ Amplification de 10^5 a 400 km ~ 1 km pour 1cm d'amplitude dans l'océan profond

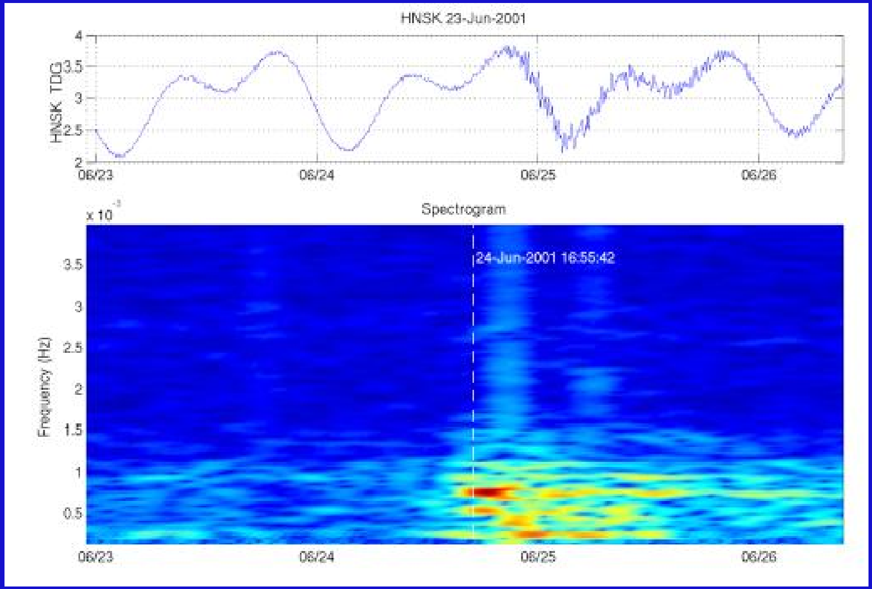
- Vitesse de propagation de l'énergie comparable à celle des ondes de

Tsunami du séisme du perou

Date	23 June 2001
Time	20:33
Latitude	16°13′ S
Longitude	73°36′ E
Depth	33km
Magnitude	8.2

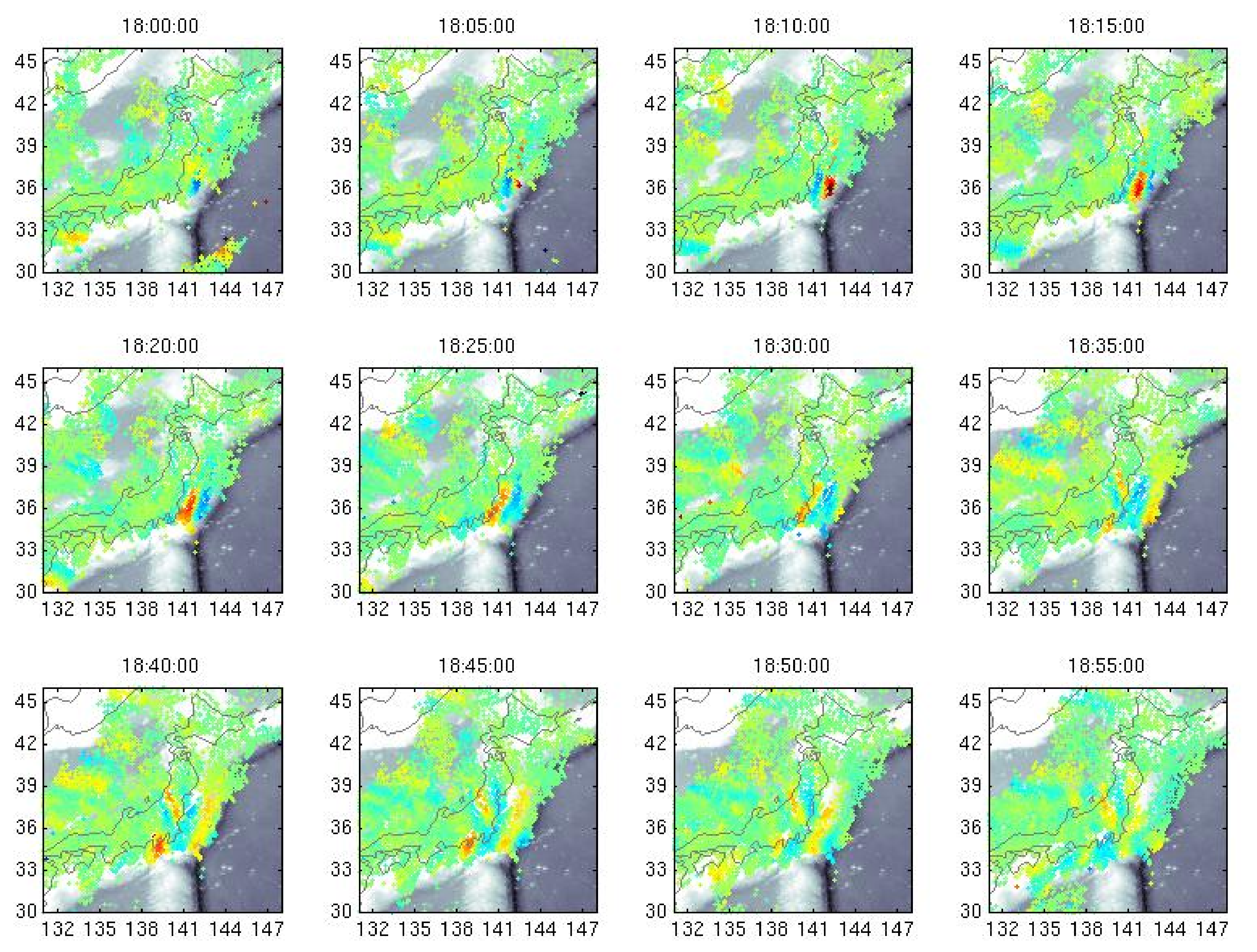

First Peak Arrival Time - Peru Tsunami Simulation June 23 2001
120° 150° 180° 210° 240° 270° 300°
60° 30° 0° -30° -60°
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
Hours

Japon: Arrivée 24 Juin, 17:00-17:30 UT

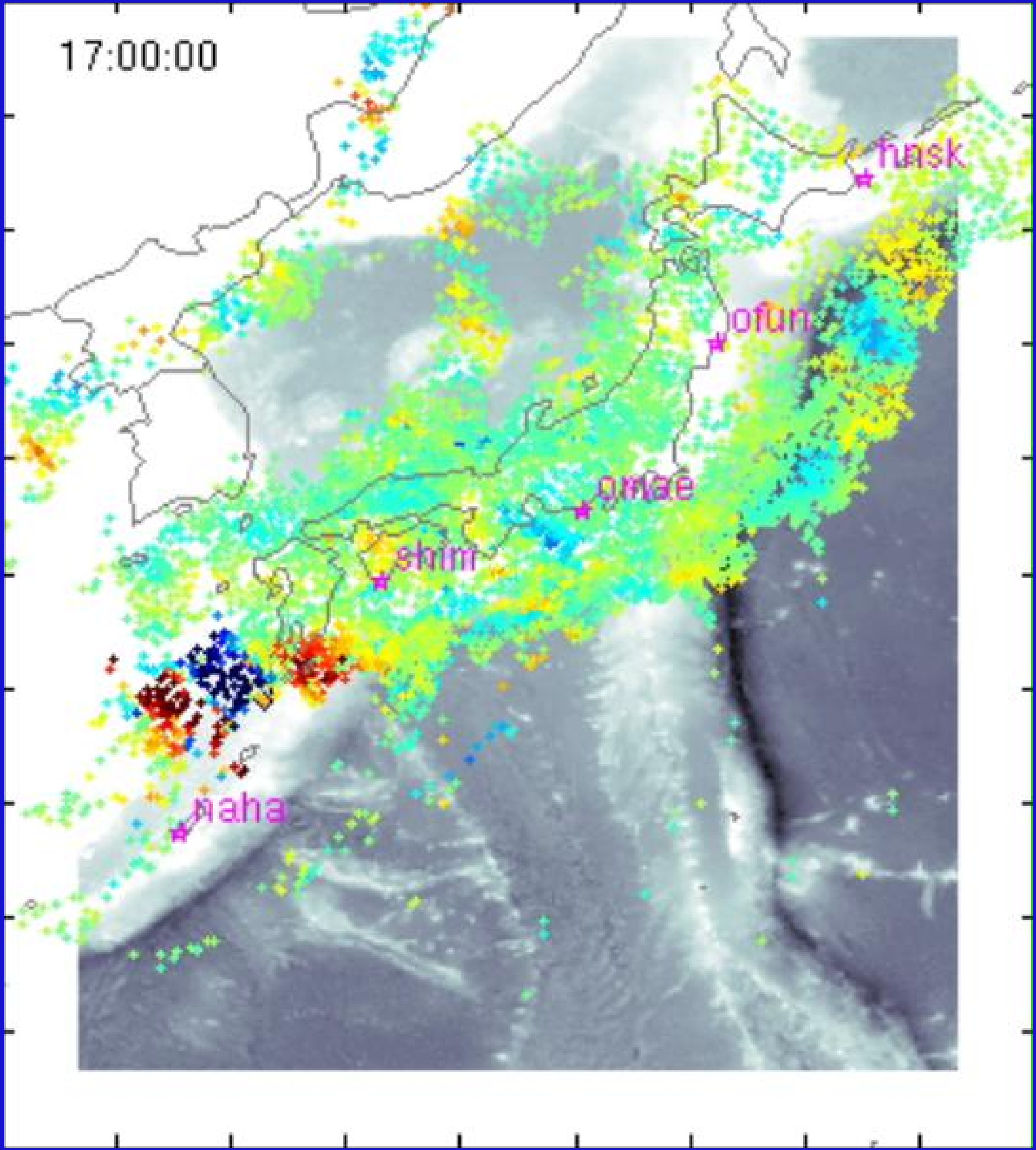


Hanasaki tidal gauge, Hokkaido

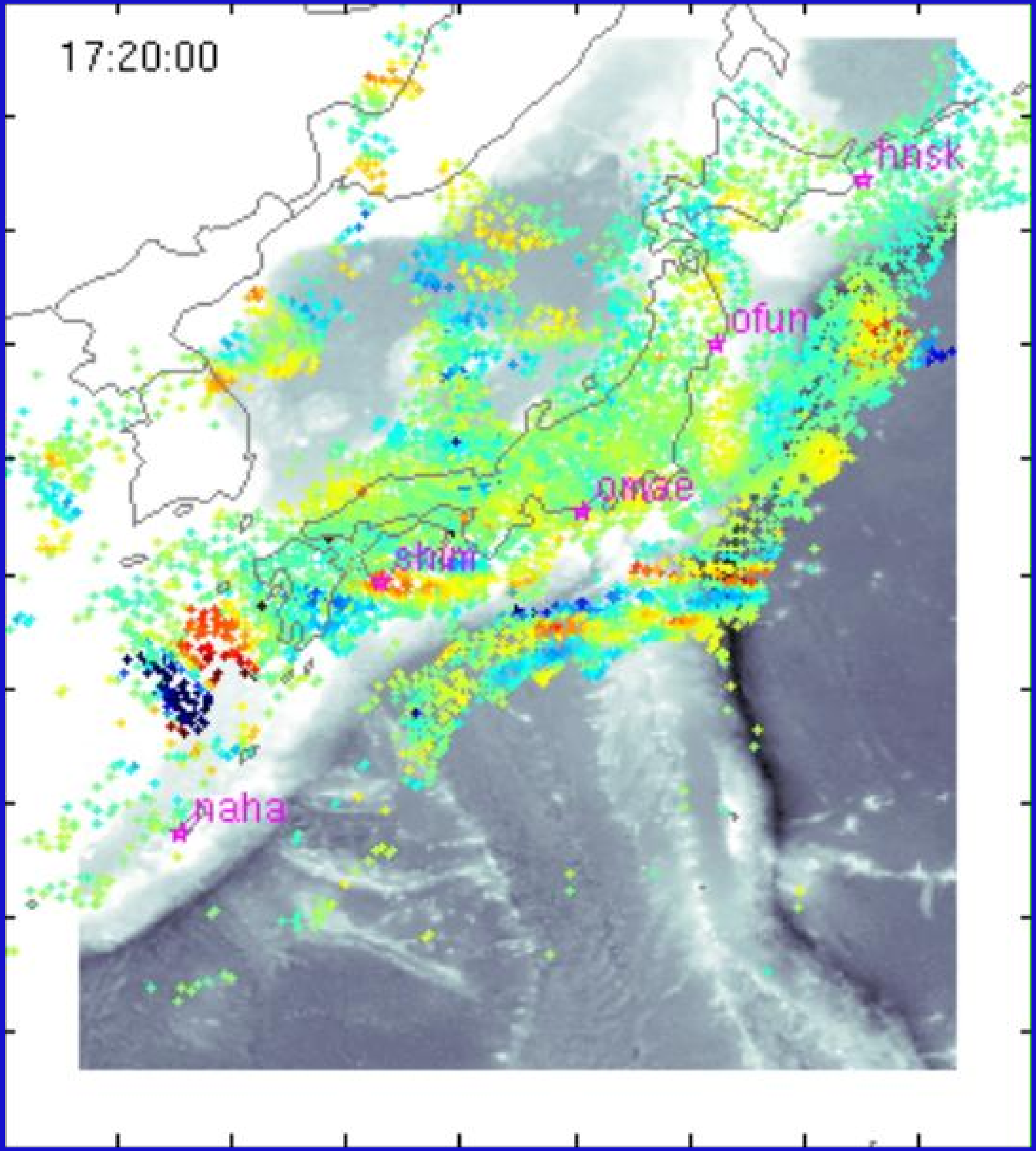
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


18:00:00
18:05:00
18:10:00
18:15:00
18:20:00
18:25:00
18:30:00
18:35:00
18:40:00
18:45:00
18:50:00
18:55:00
45
42
39
36
33
30
132 135 138 141 144 147

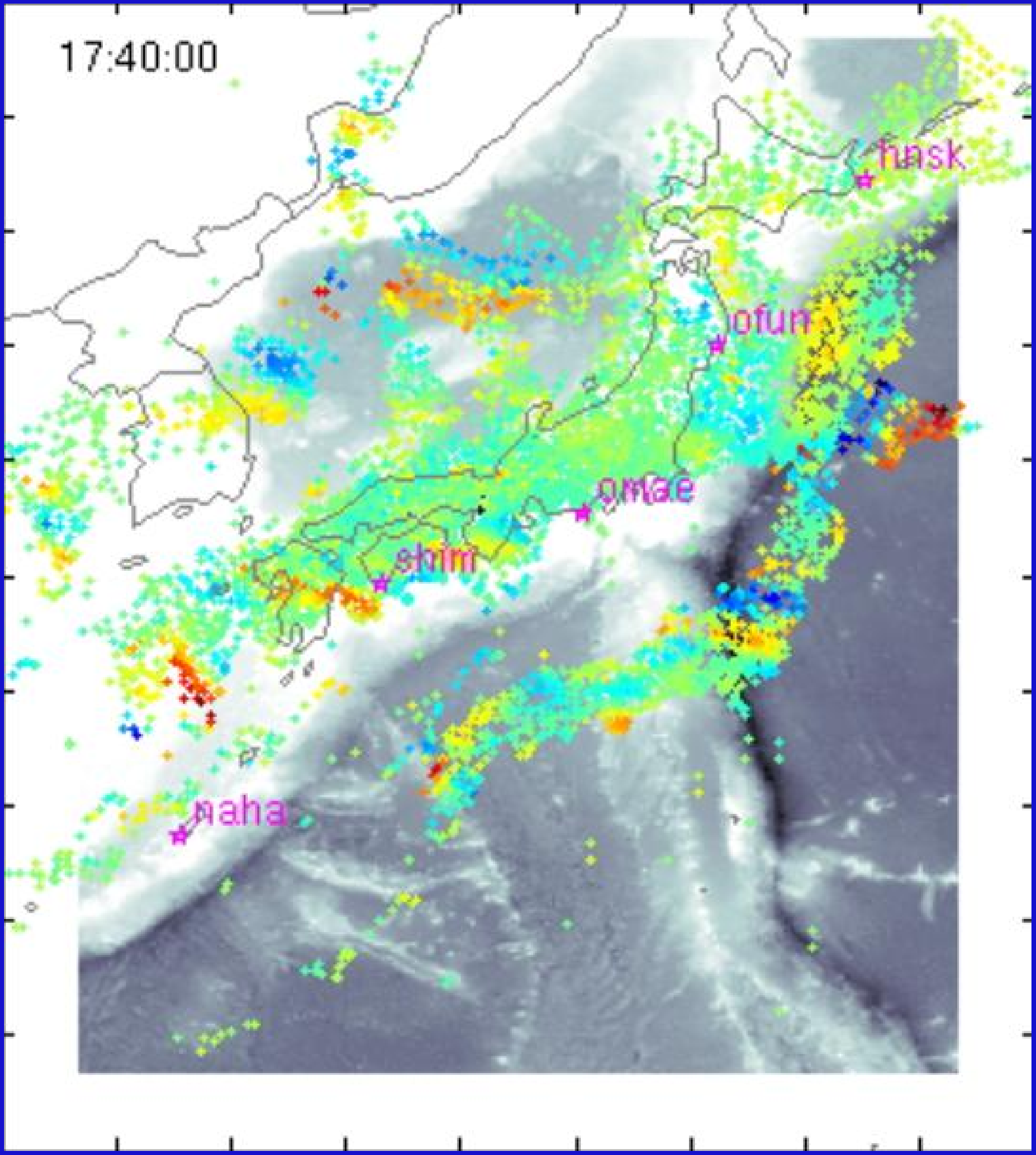
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


17:00:00
hnsk
ofun
omae
shim
naha

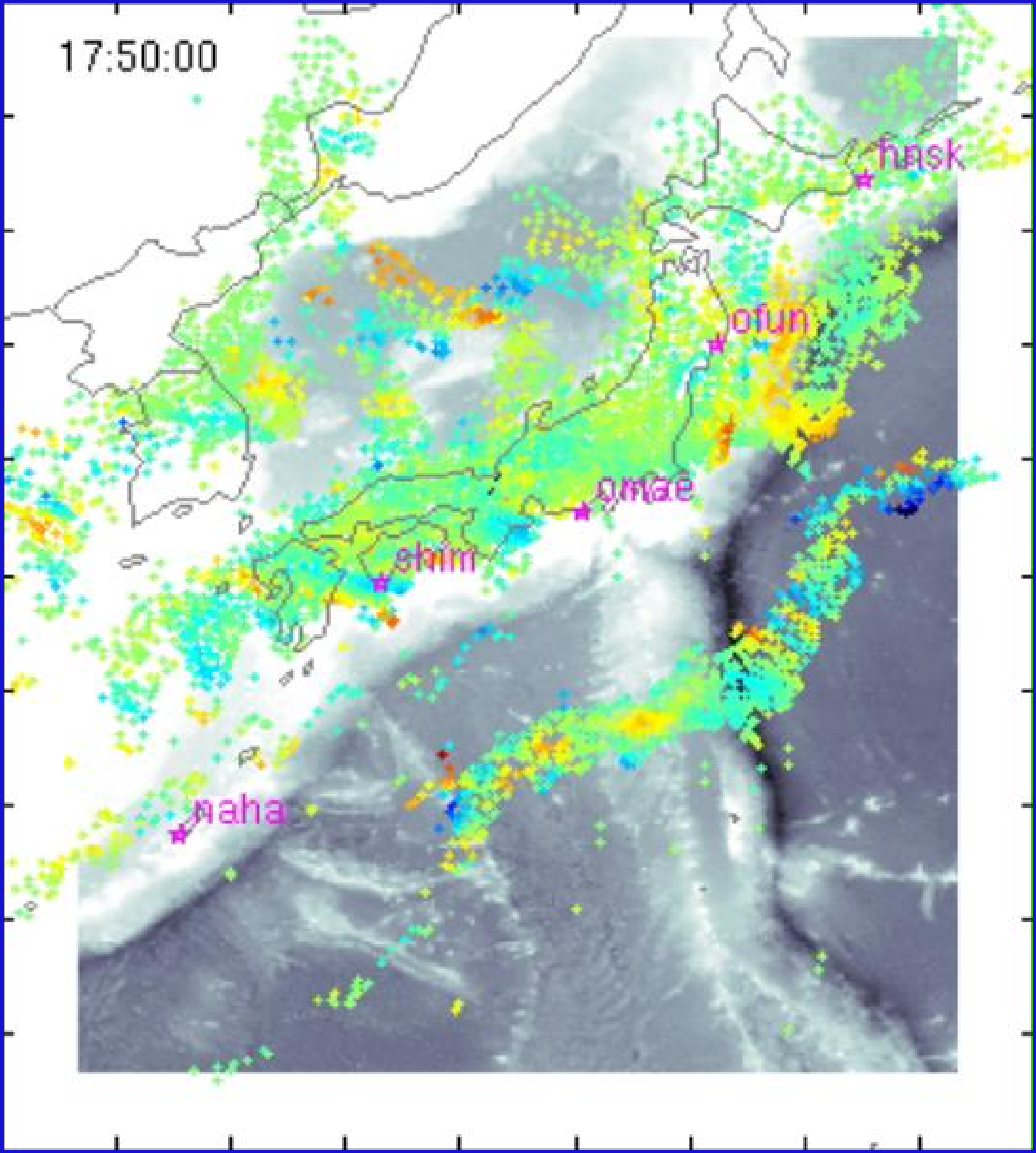
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


17:20:00
hnsk
ofun
omae
shim
naha

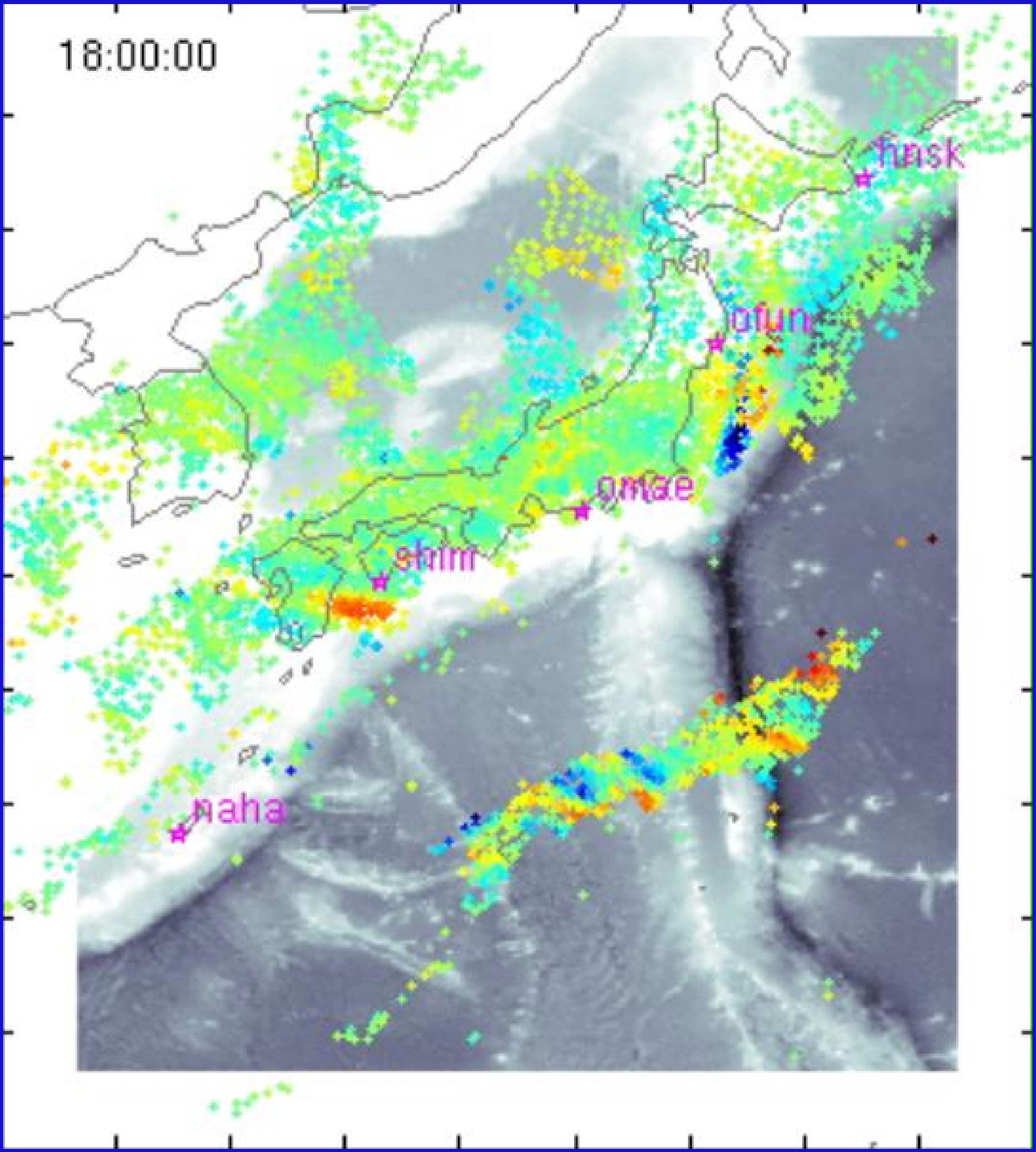
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


17:40:00
hnsk
ofun
omae
shim
naha

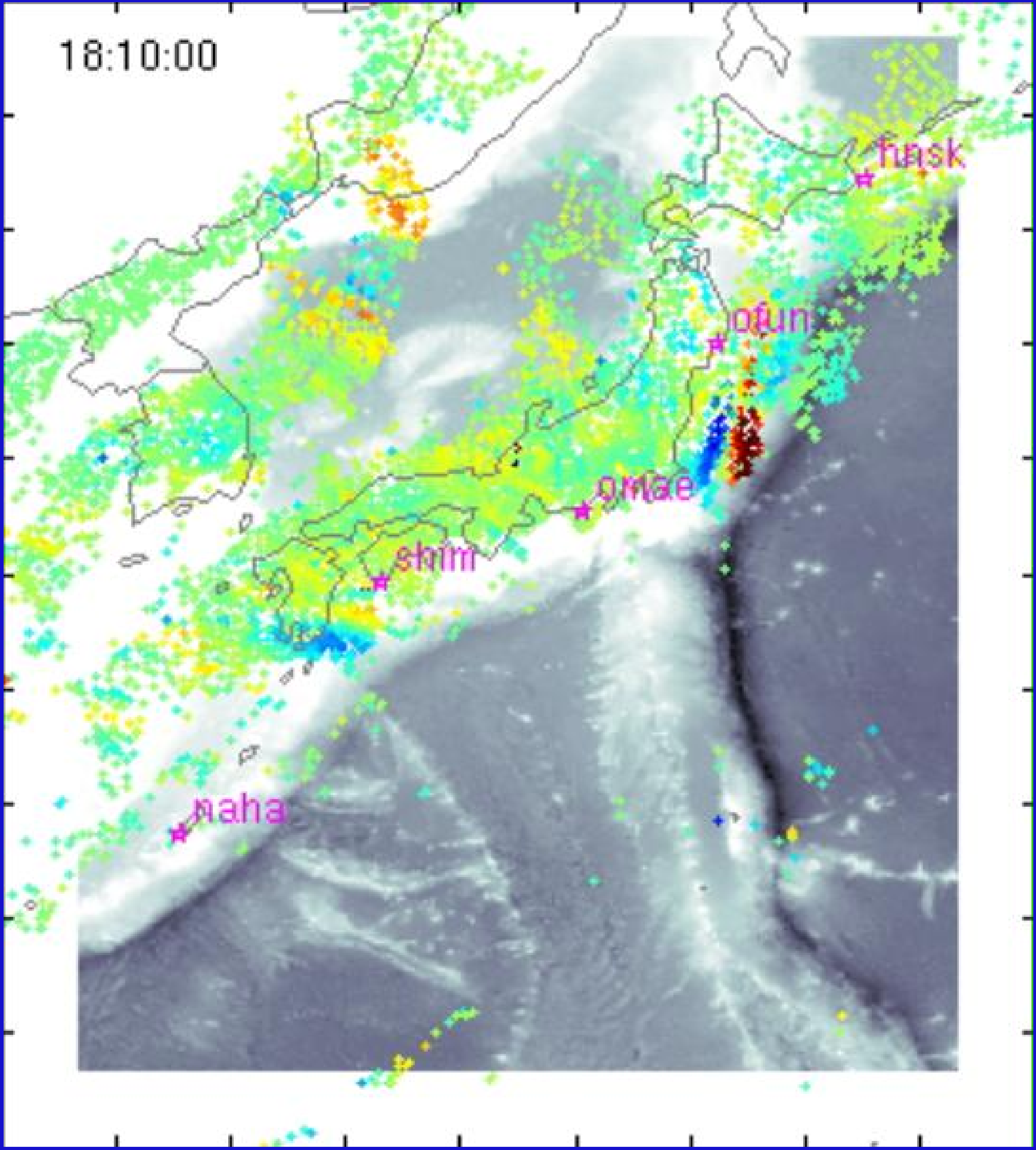
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


17:50:00
hnsk
ofun
omae
shim
naha

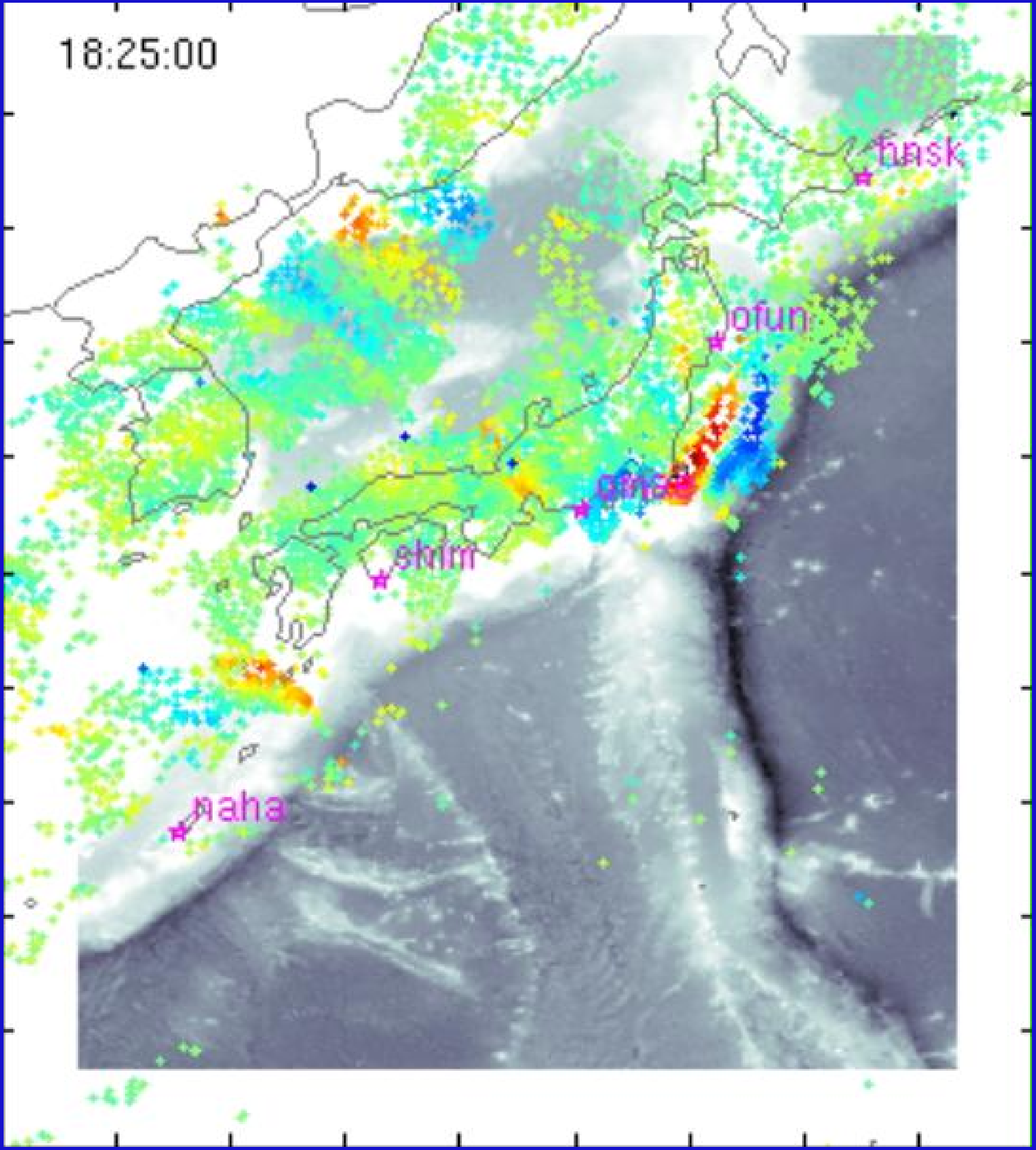
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


18:00:00
hnsk
ofun
omae
shim
naha

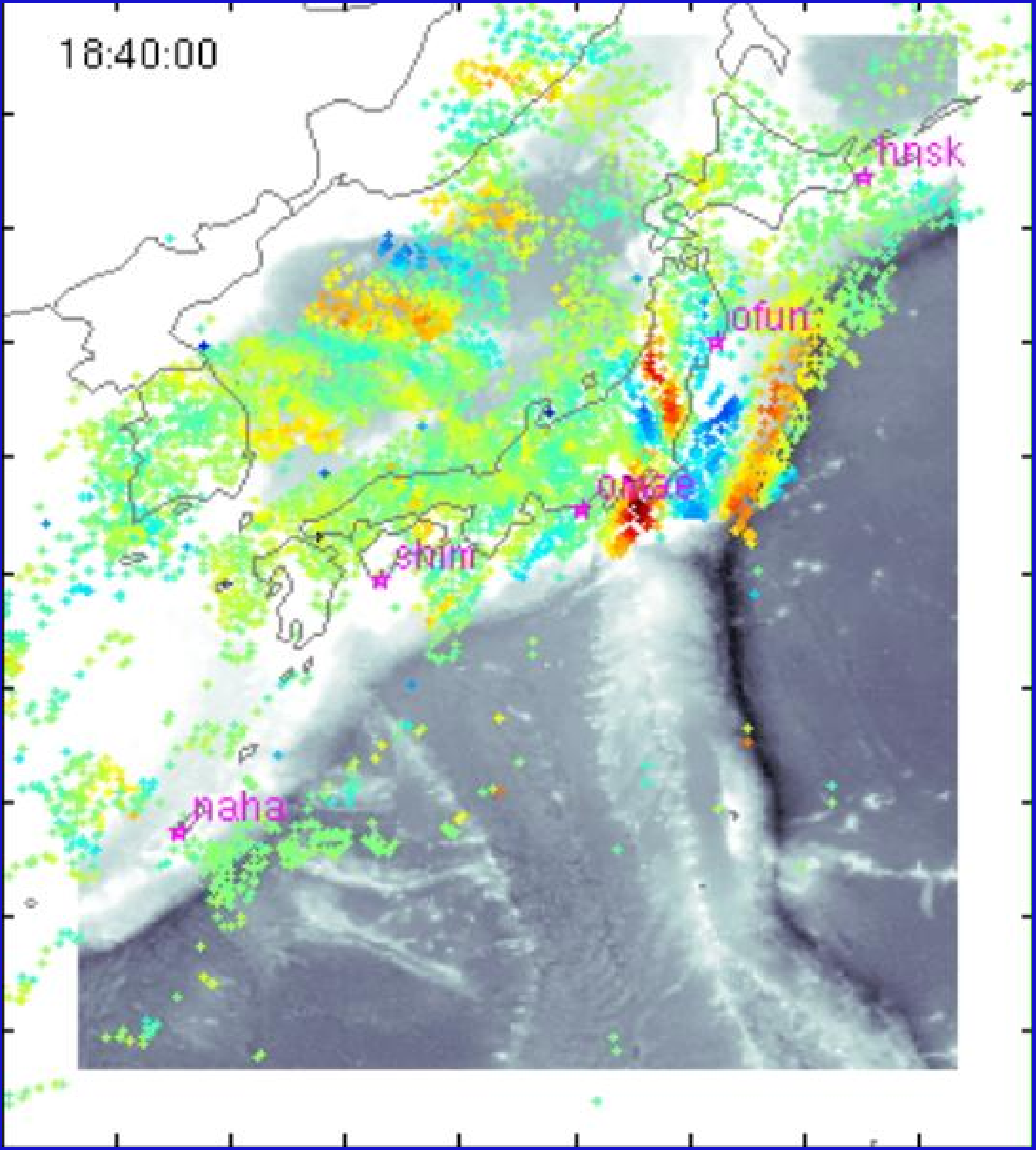
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


18:10:00
funsk
ofun
omae
shim
naha

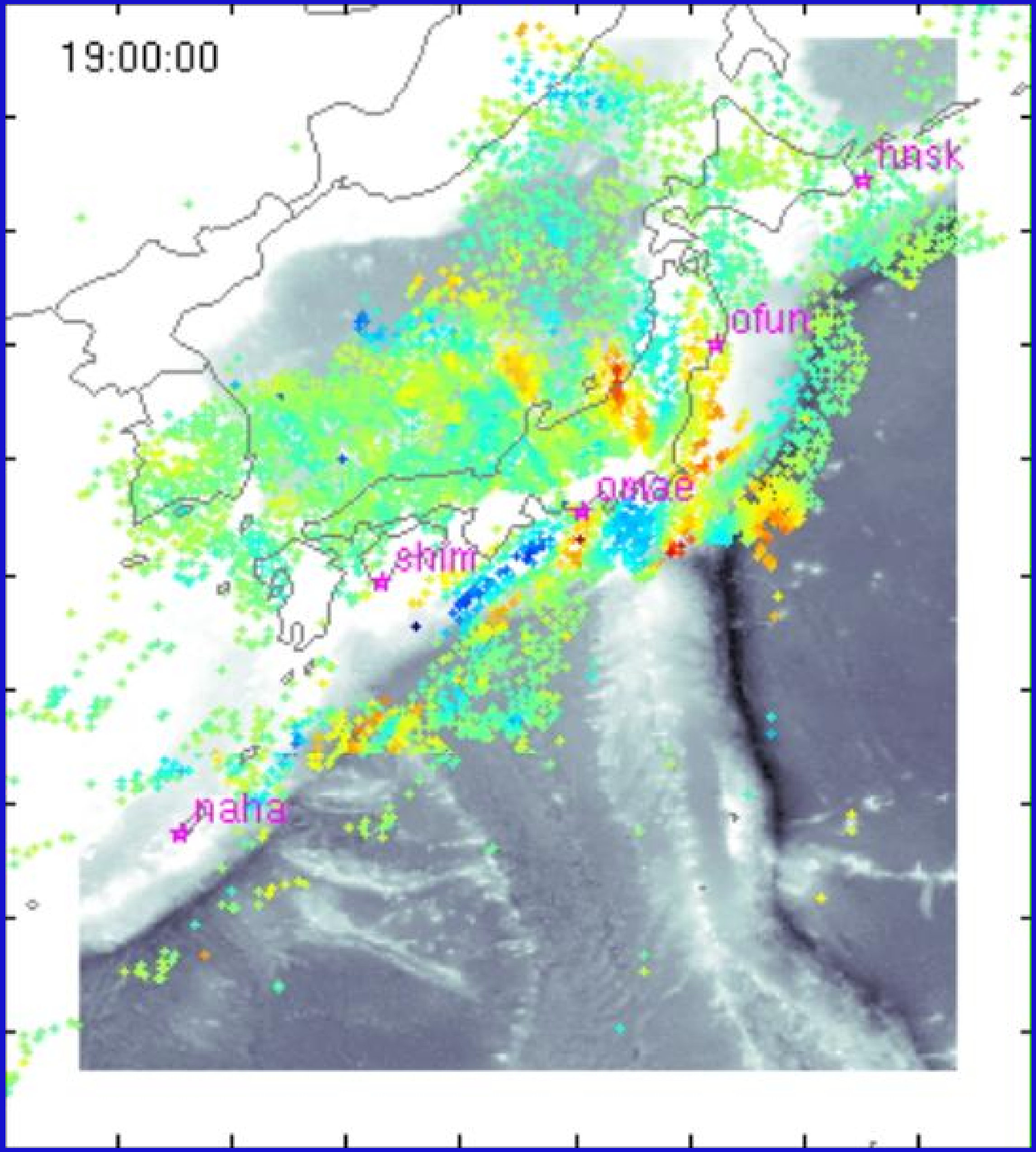
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


18:25:00
fnsk
ofun
gmsa
shim
naha

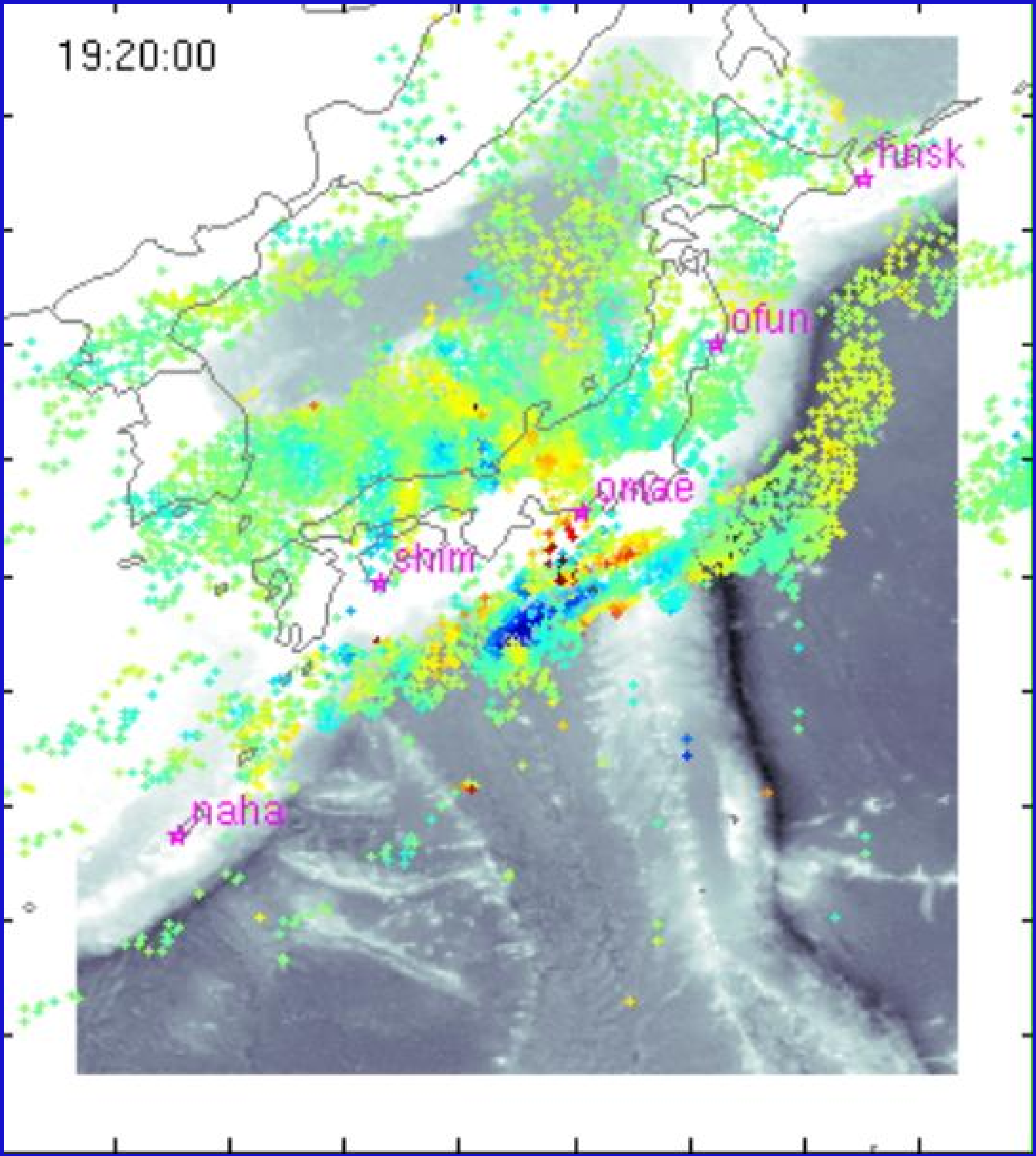
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


18:40:00
funsk
ofun
onoe
shim
naha

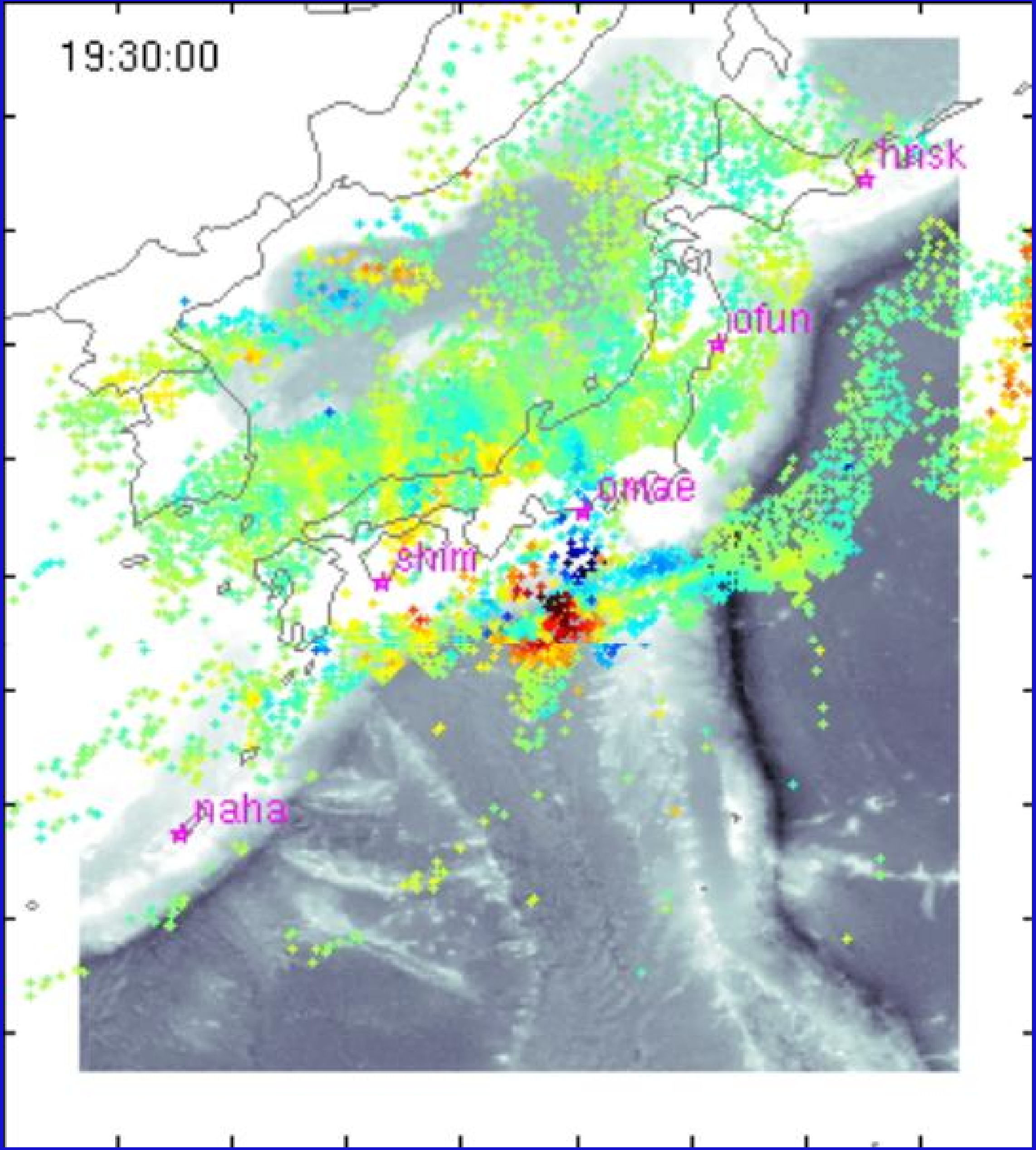
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


19:00:00
hnsk
ofun
omae
shim
naha

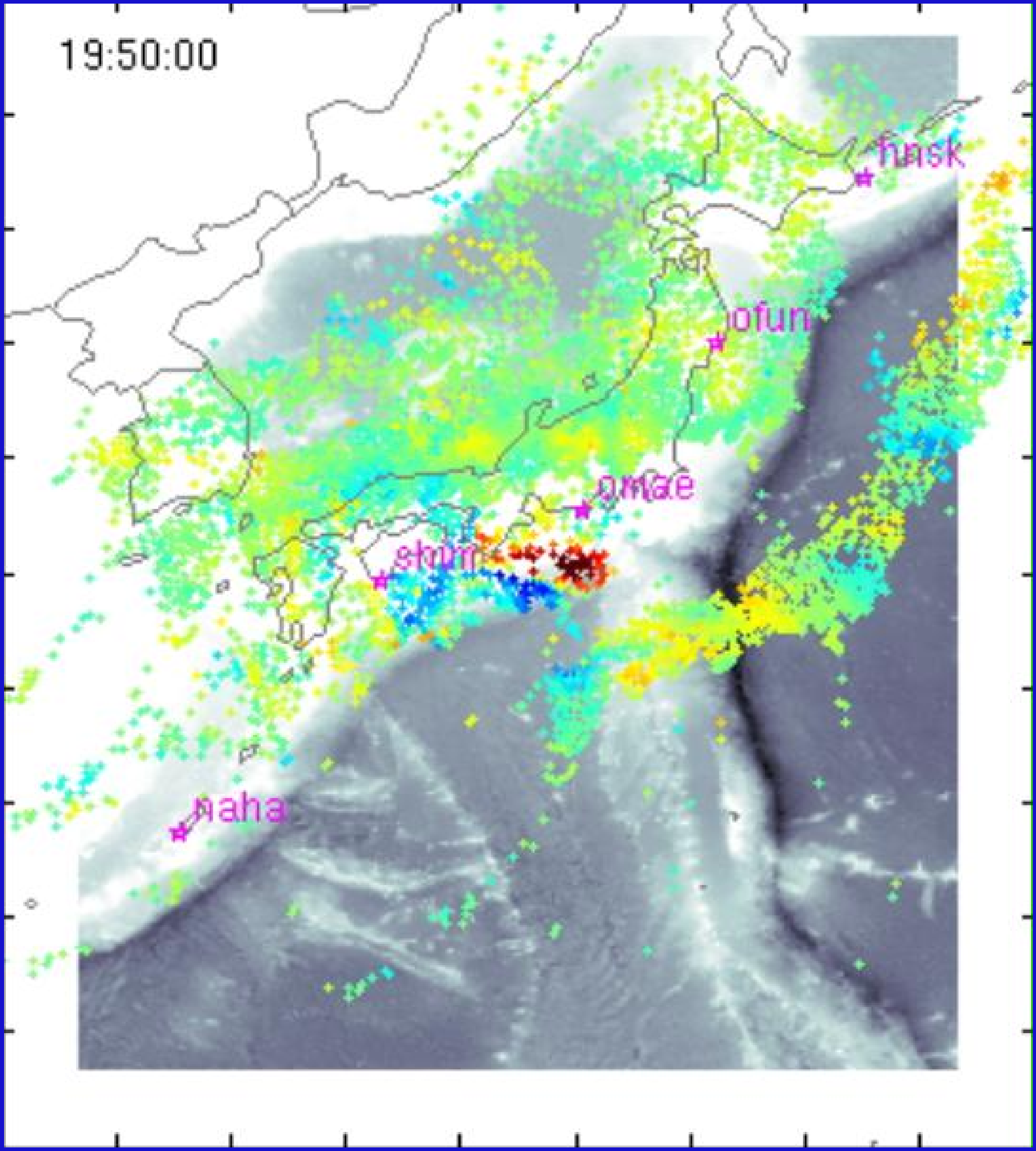
Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


19:20:00
hnsk
ofun
omae
shim
naha

Séisme du Pérou, Juin 23, 2001

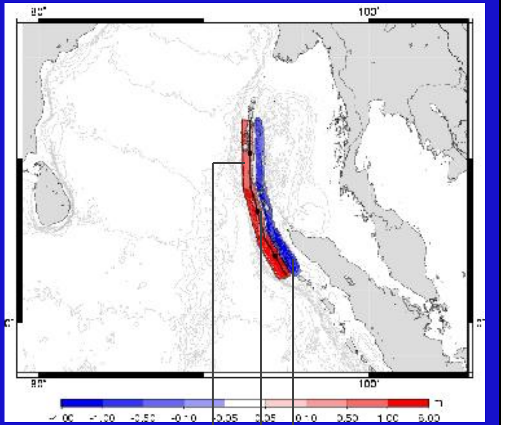

19:30:00
hnsk
ofun
omae
shim
naha

Séisme du Pérou, Juin 23, 2001


19:50:00
hnsk
ofun
omae
shm
naha

Sumatra tsunami

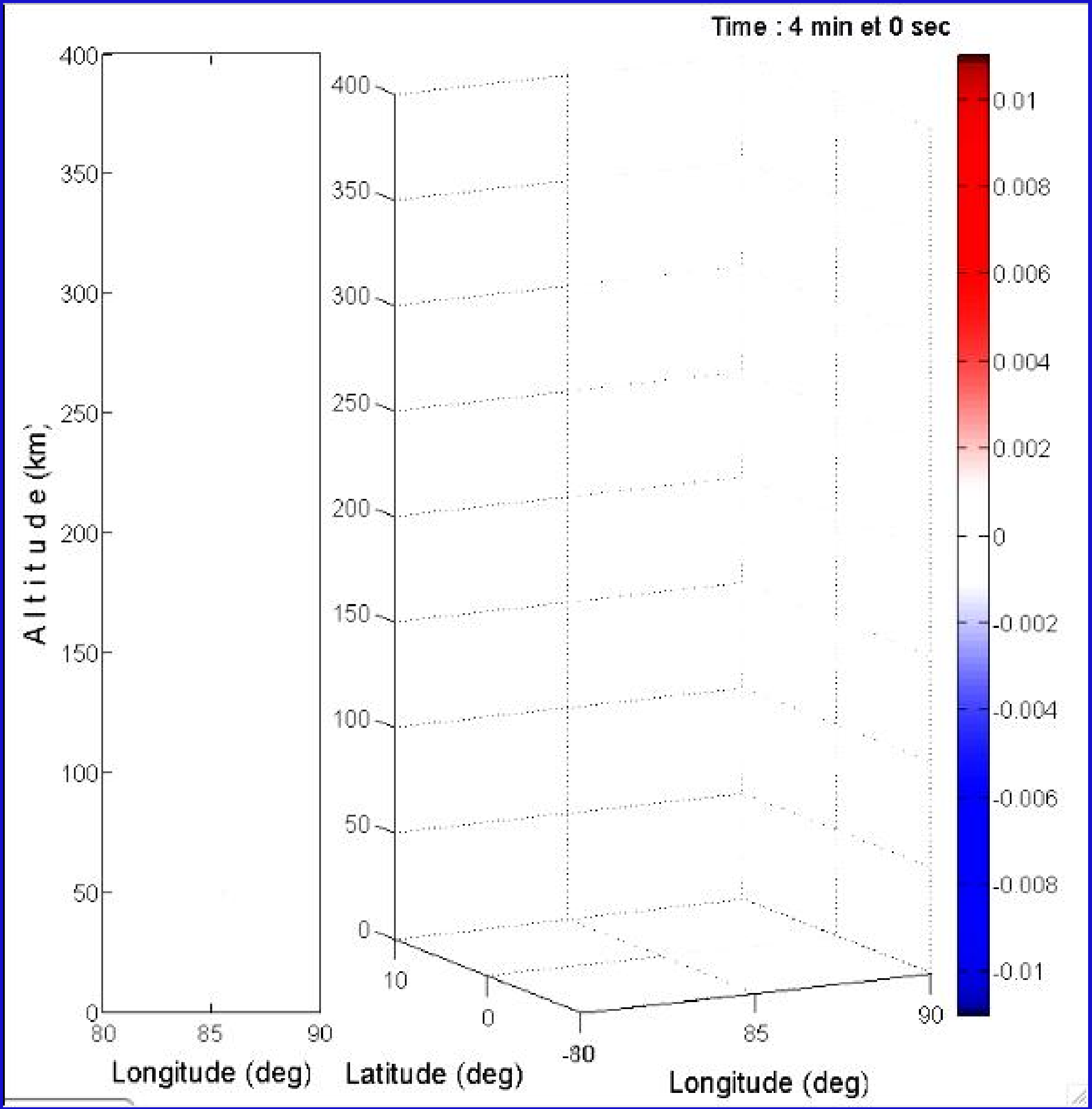
dec. 26th, 2004



4 m

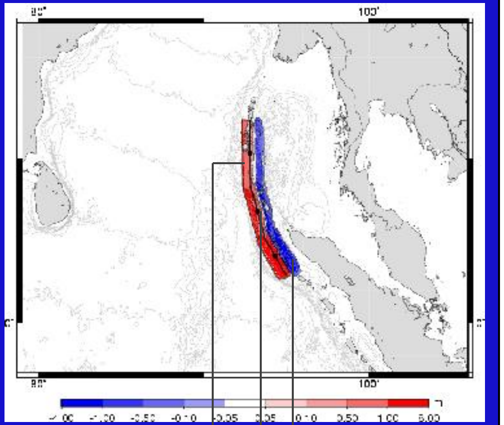
6 m

20 m



Sumatra tsunami

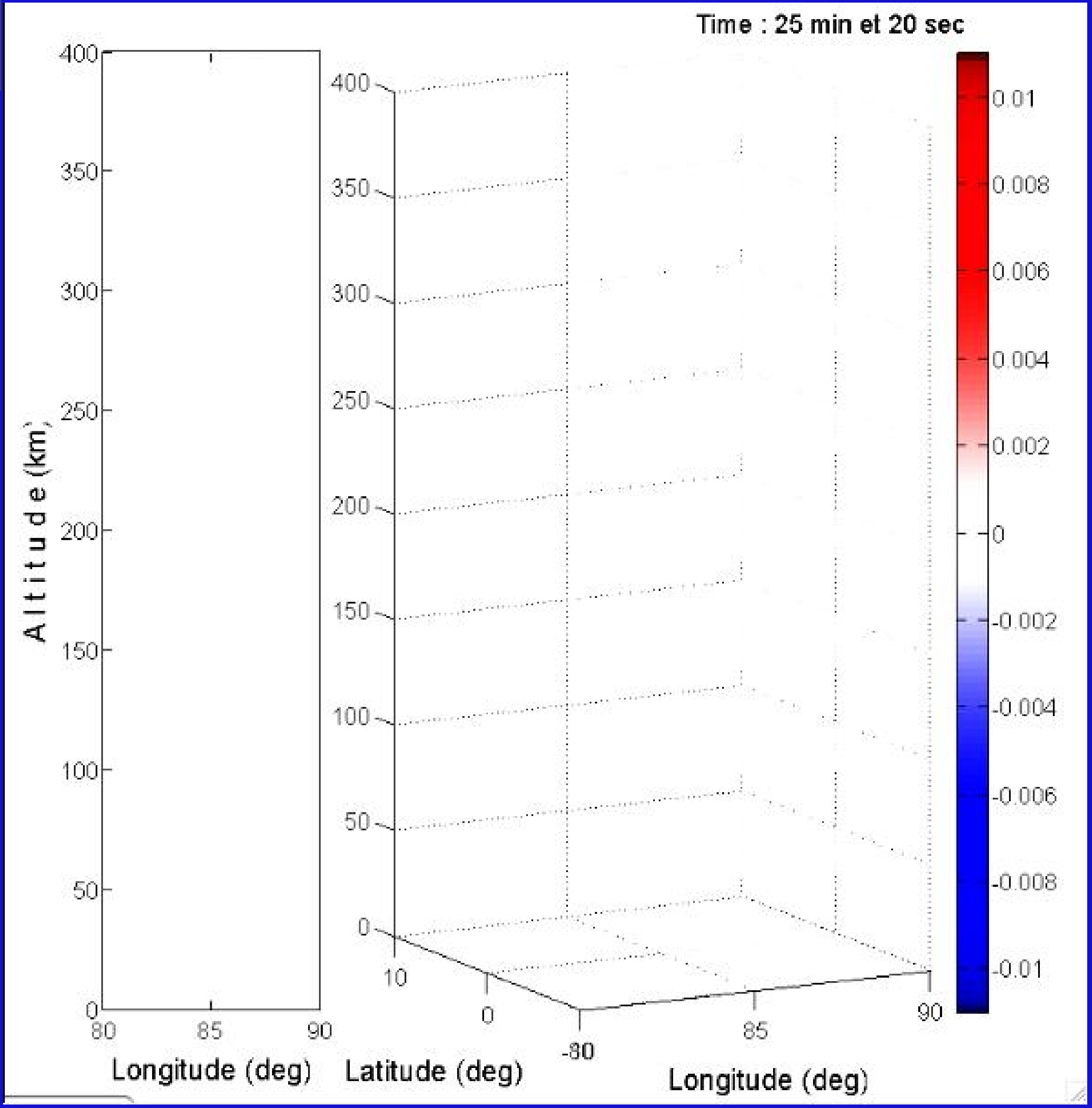
dec. 26th, 2004



4 m

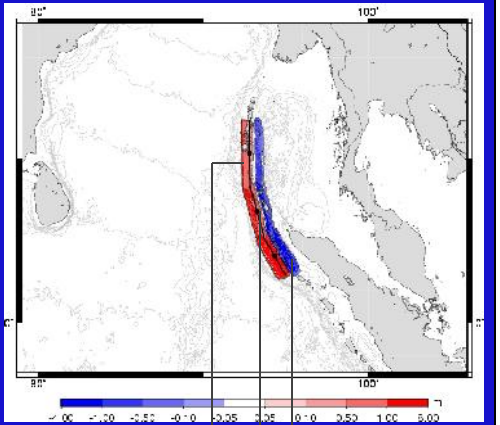
6 m

20 m



Sumatra tsunami

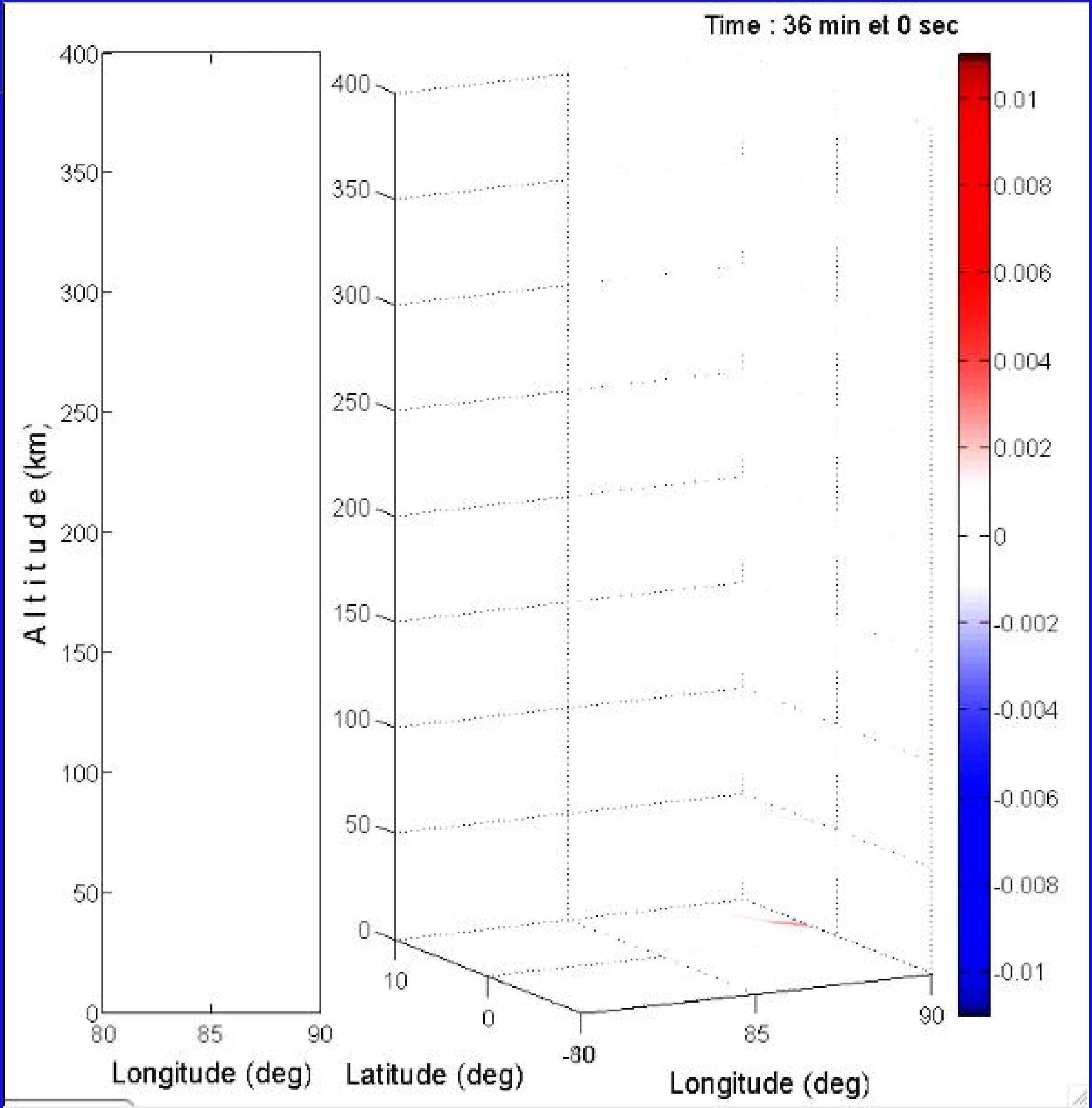
dec. 26th, 2004



4 m

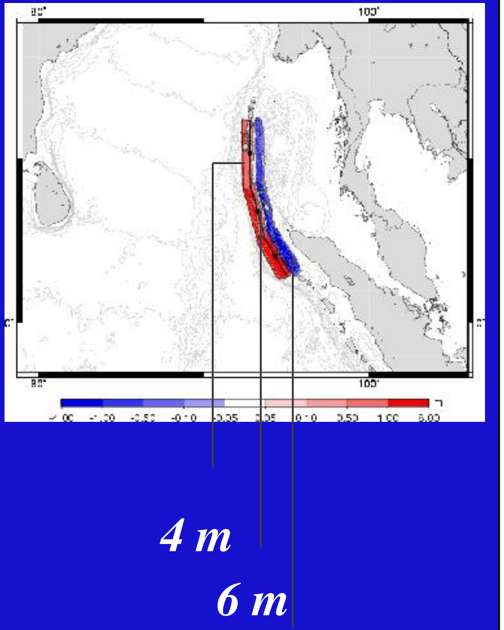
6 m

20 m



Sumatra tsunami

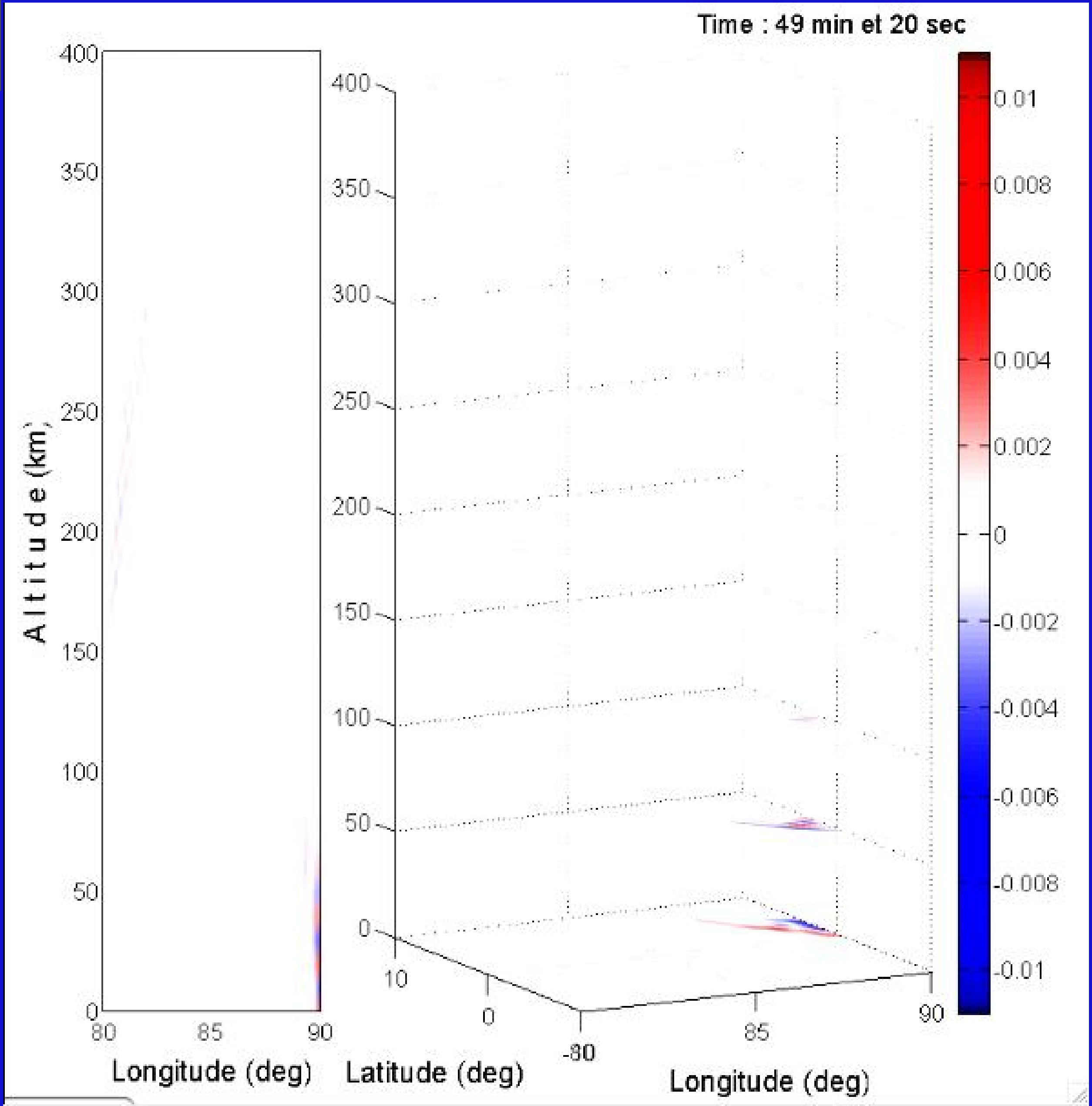
dec. 26th, 2004



4 m

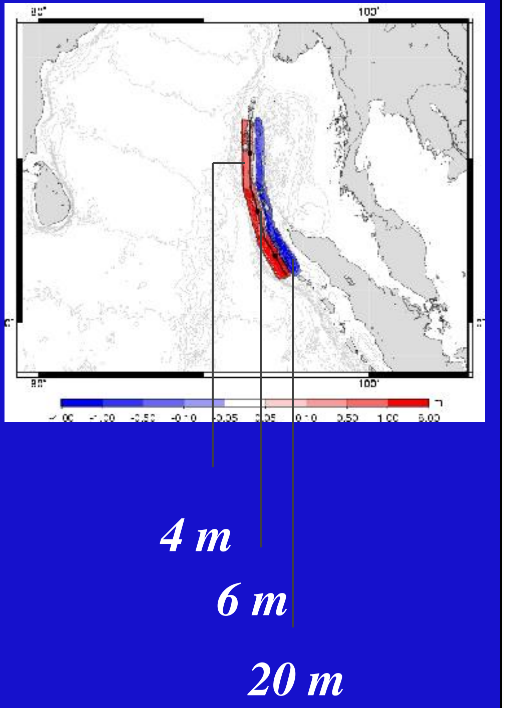
6 m

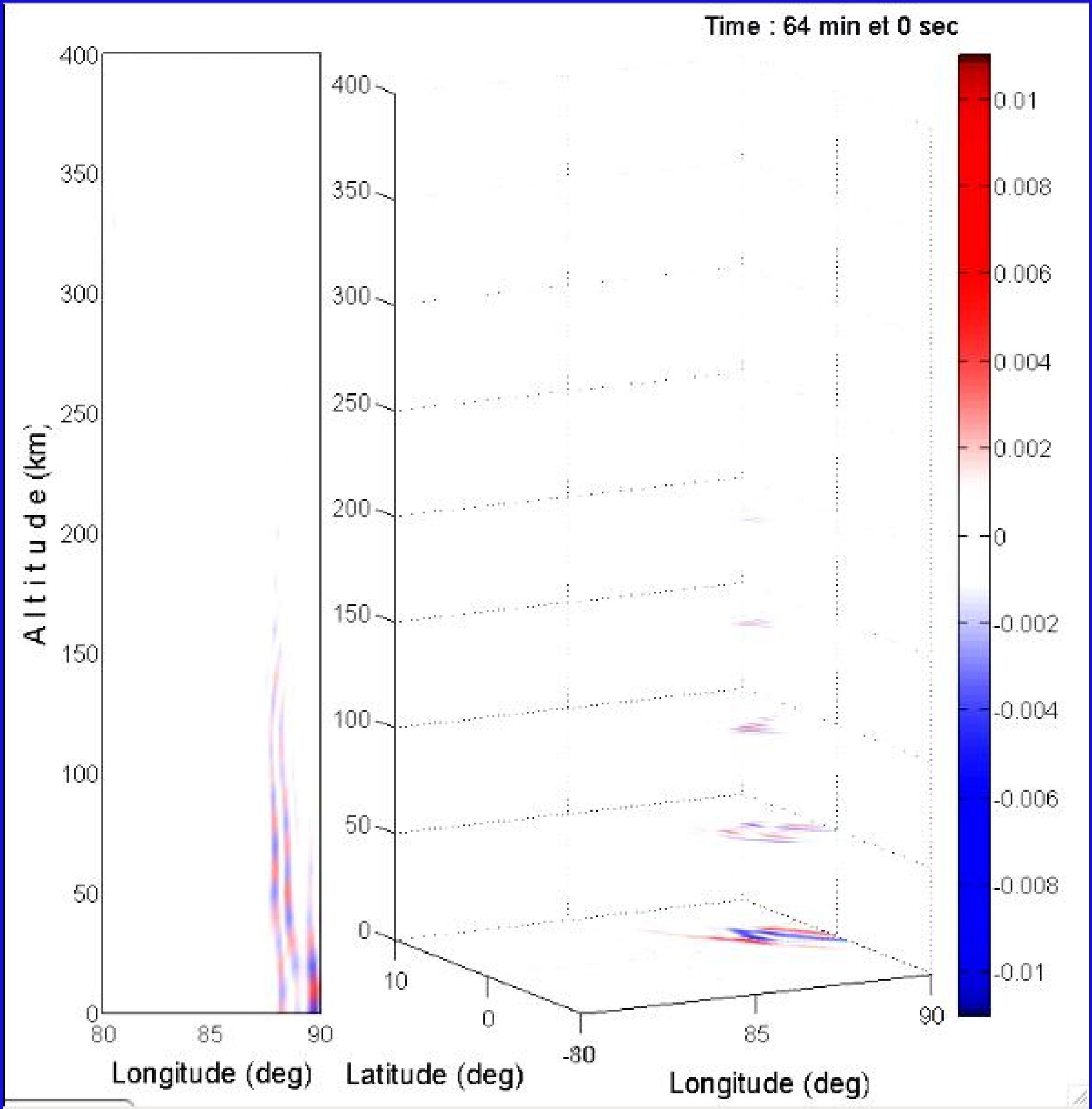
20 m



Sumatra tsunami

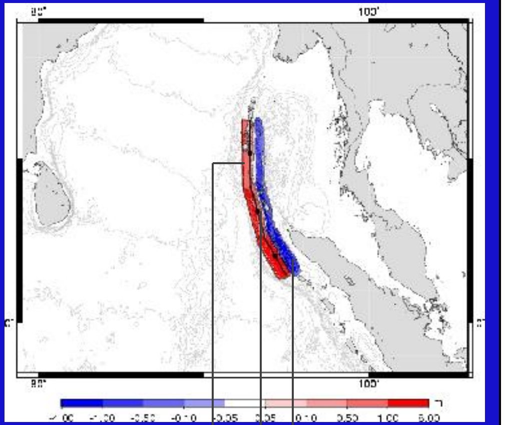
dec. 26th, 2004





Sumatra tsunami

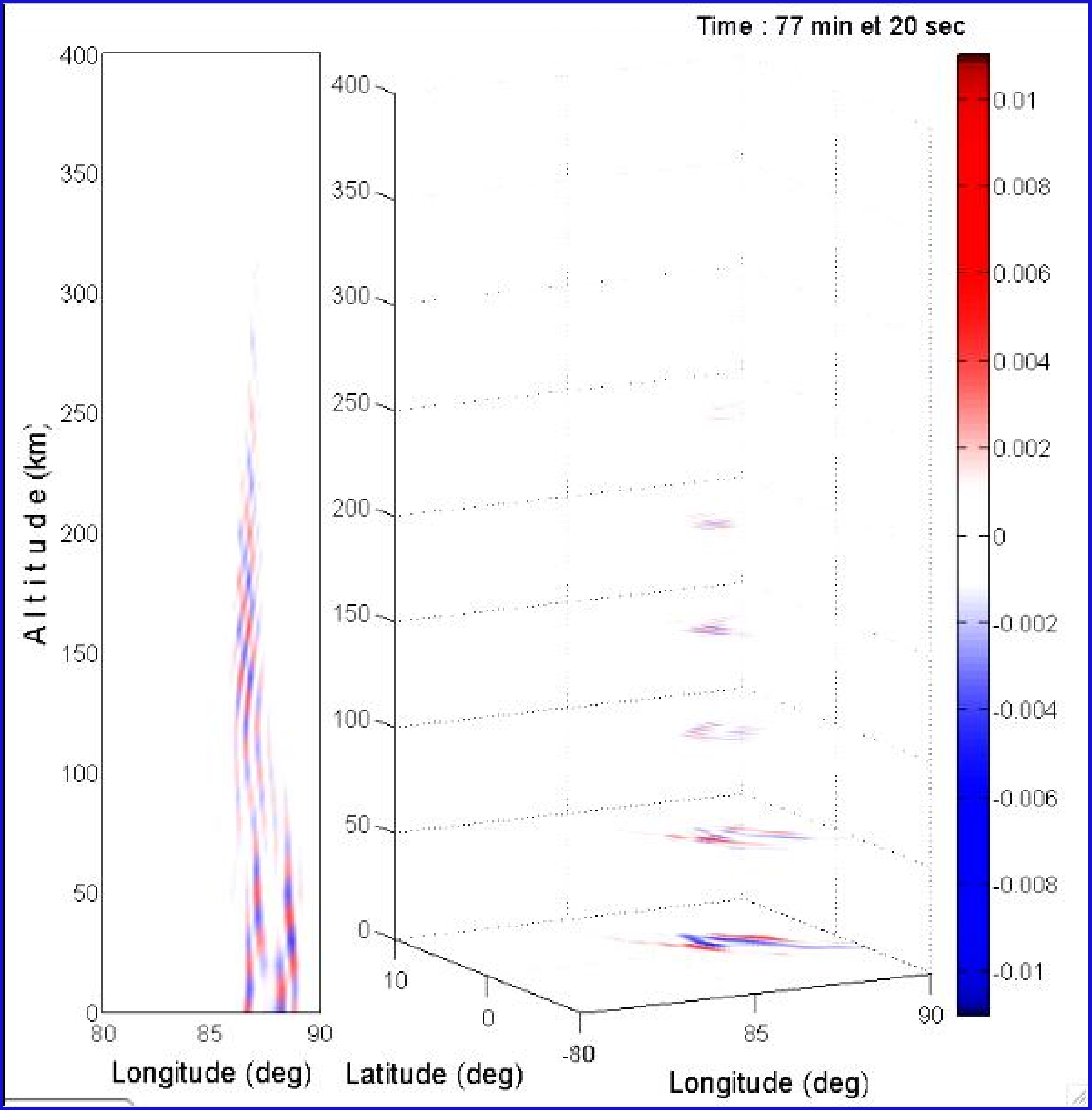
dec. 26th, 2004



4 m

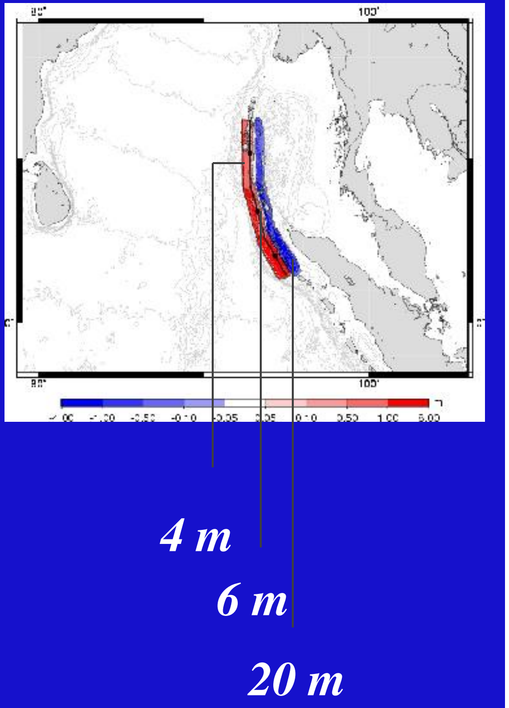
6 m

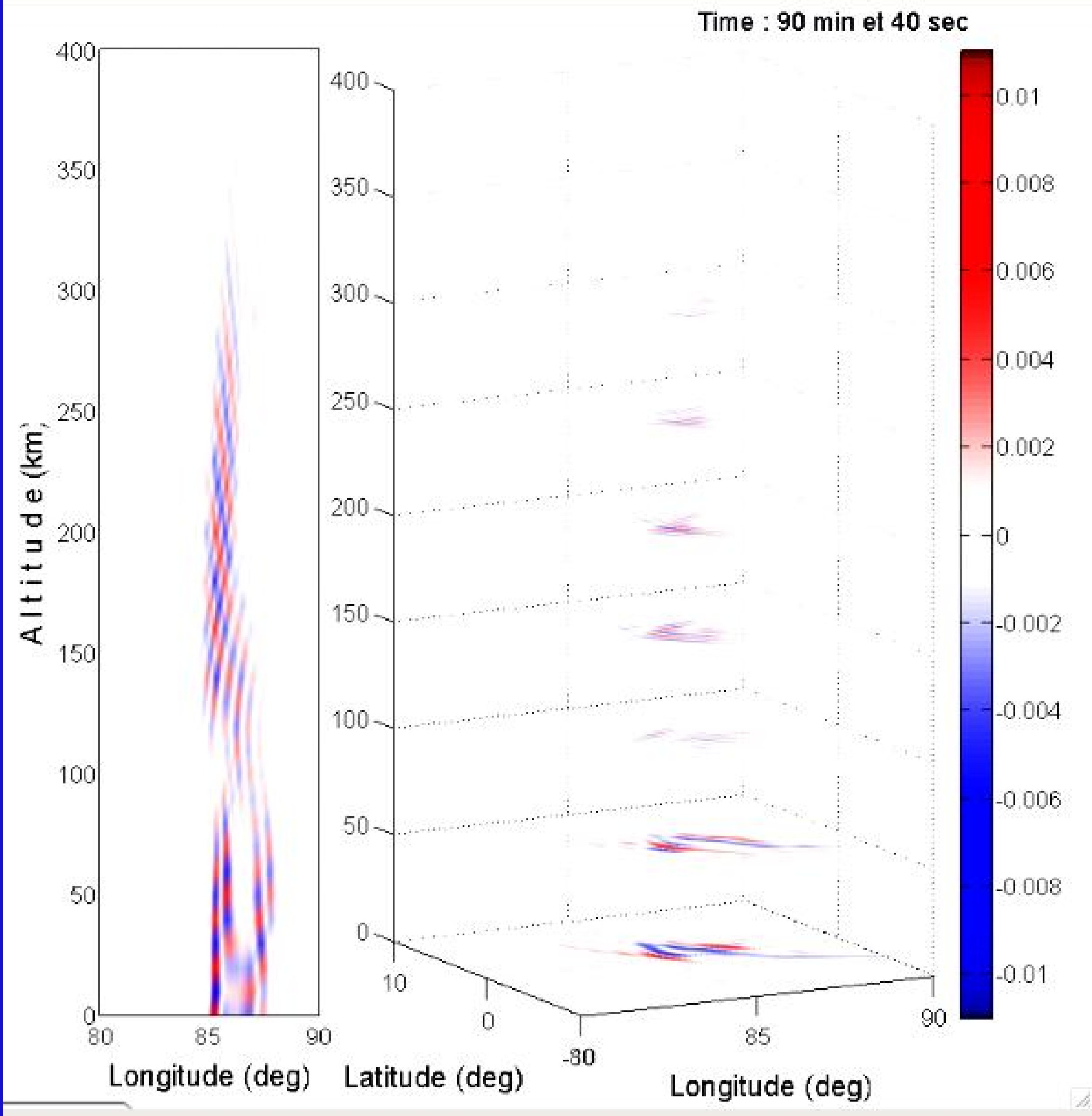
20 m



Sumatra tsunami

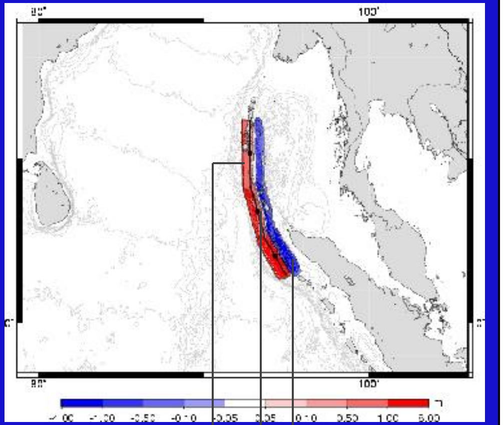
dec. 26th, 2004





Sumatra tsunami

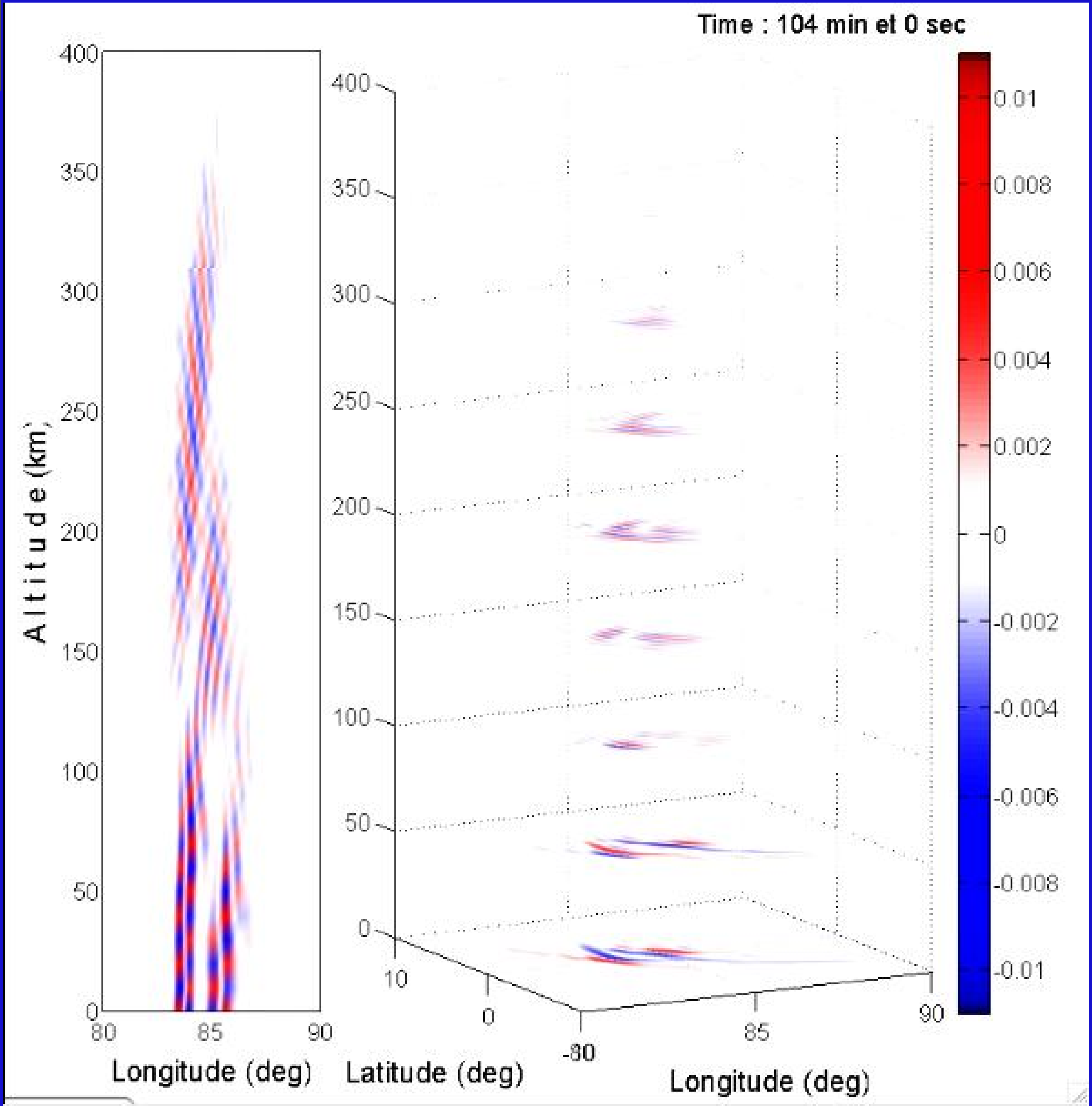
dec. 26th, 2004



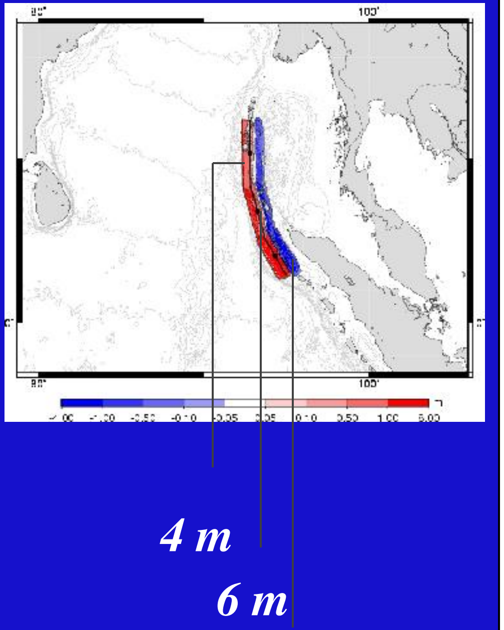
4 m

6 m

20 m



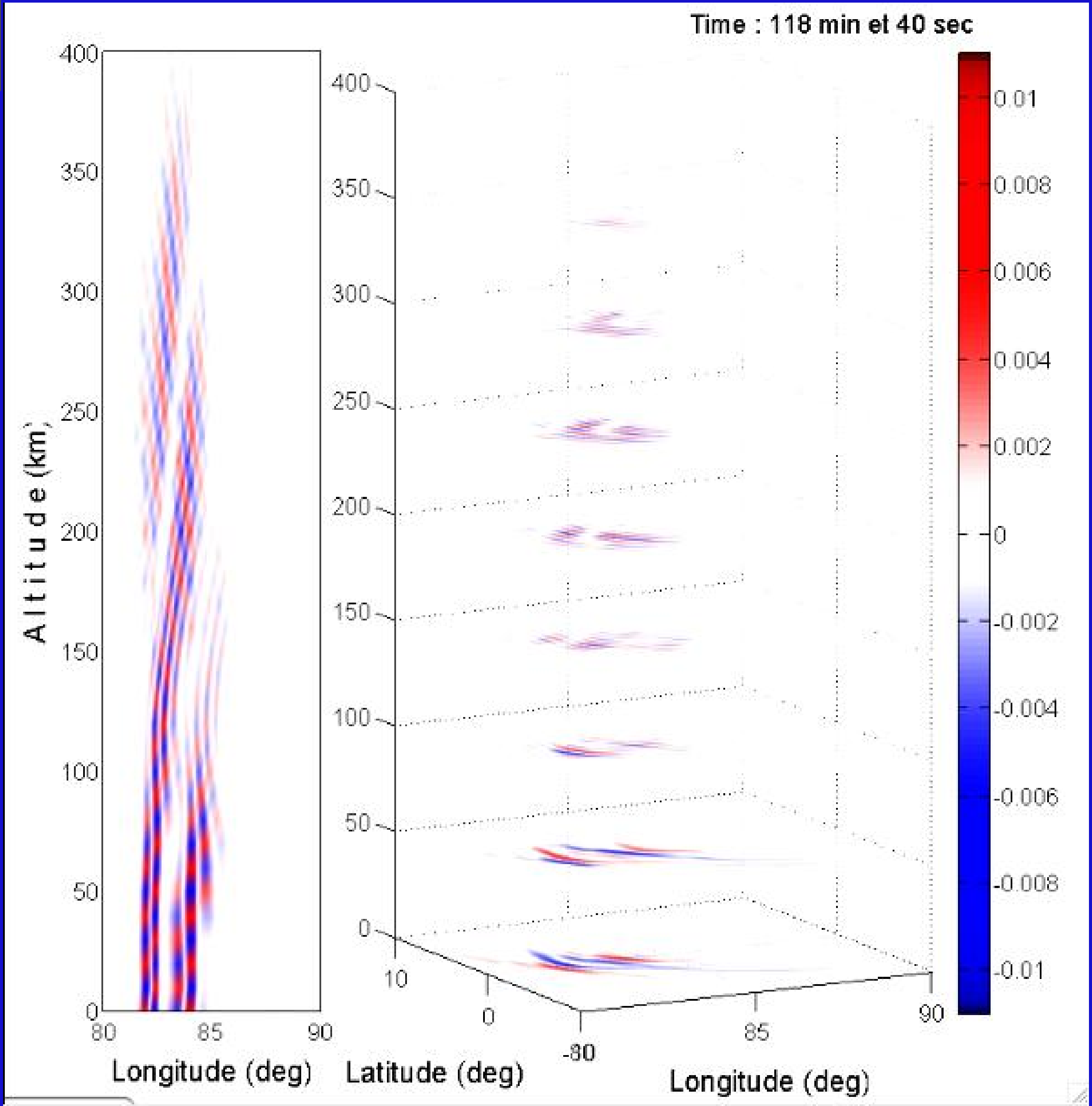
Sumatra tsunami
dec. 26th, 2004



4 m

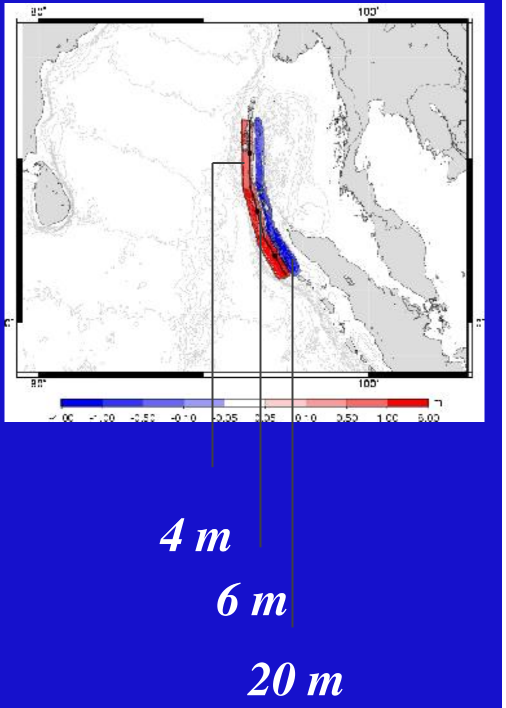
6 m

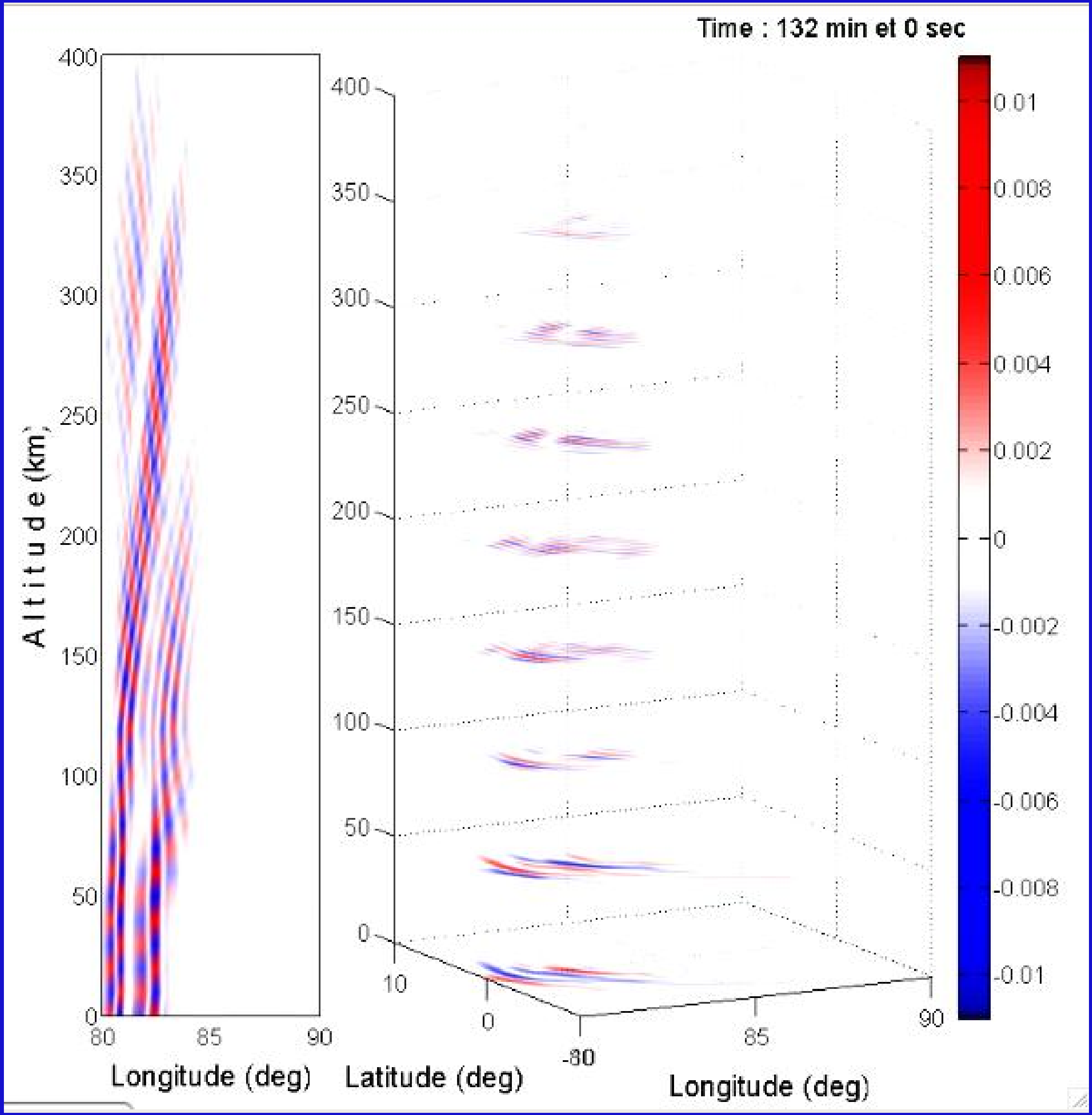
20 m



Sumatra tsunami

dec. 26th, 2004

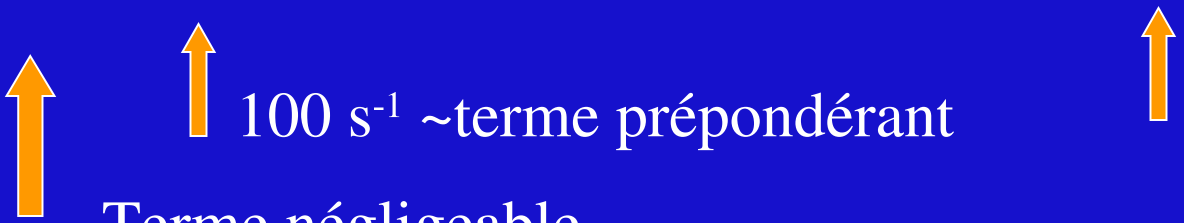




Couplage Neutre-Plasma

- Transfert de la vitesse des neutres aux ions par collision

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = \frac{eB}{M_i}\left(\frac{\vec{E}}{B} + \vec{v}_i \times \vec{n}\right) - \frac{k_B T \nabla N_i}{M_i N_i} + \vec{g} + \nu_{in}(\vec{u} - \vec{v}_i)$$



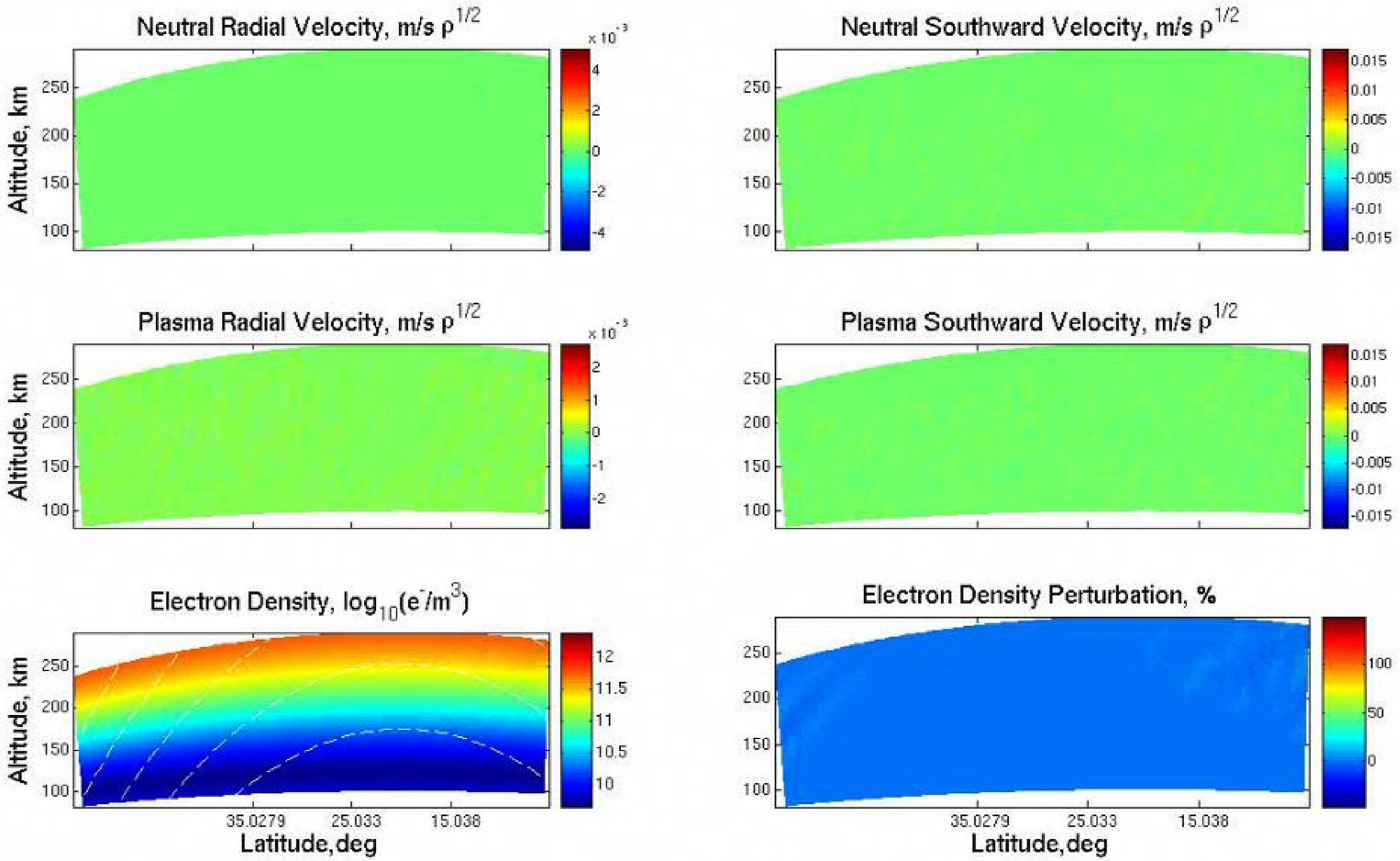
100 s^{-1} ~terme prépondérant

1-10 s^{-1}

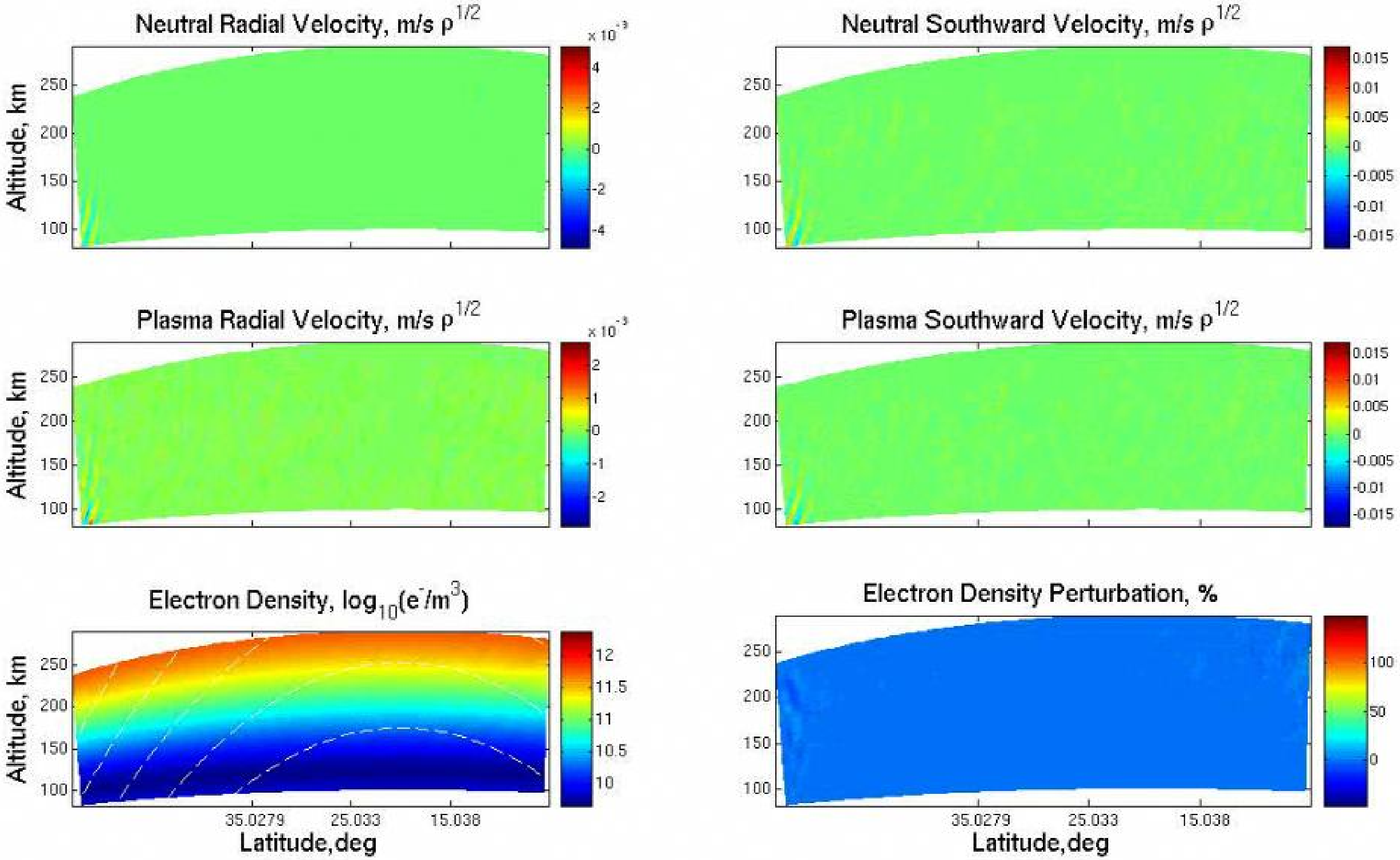
Terme négligeable

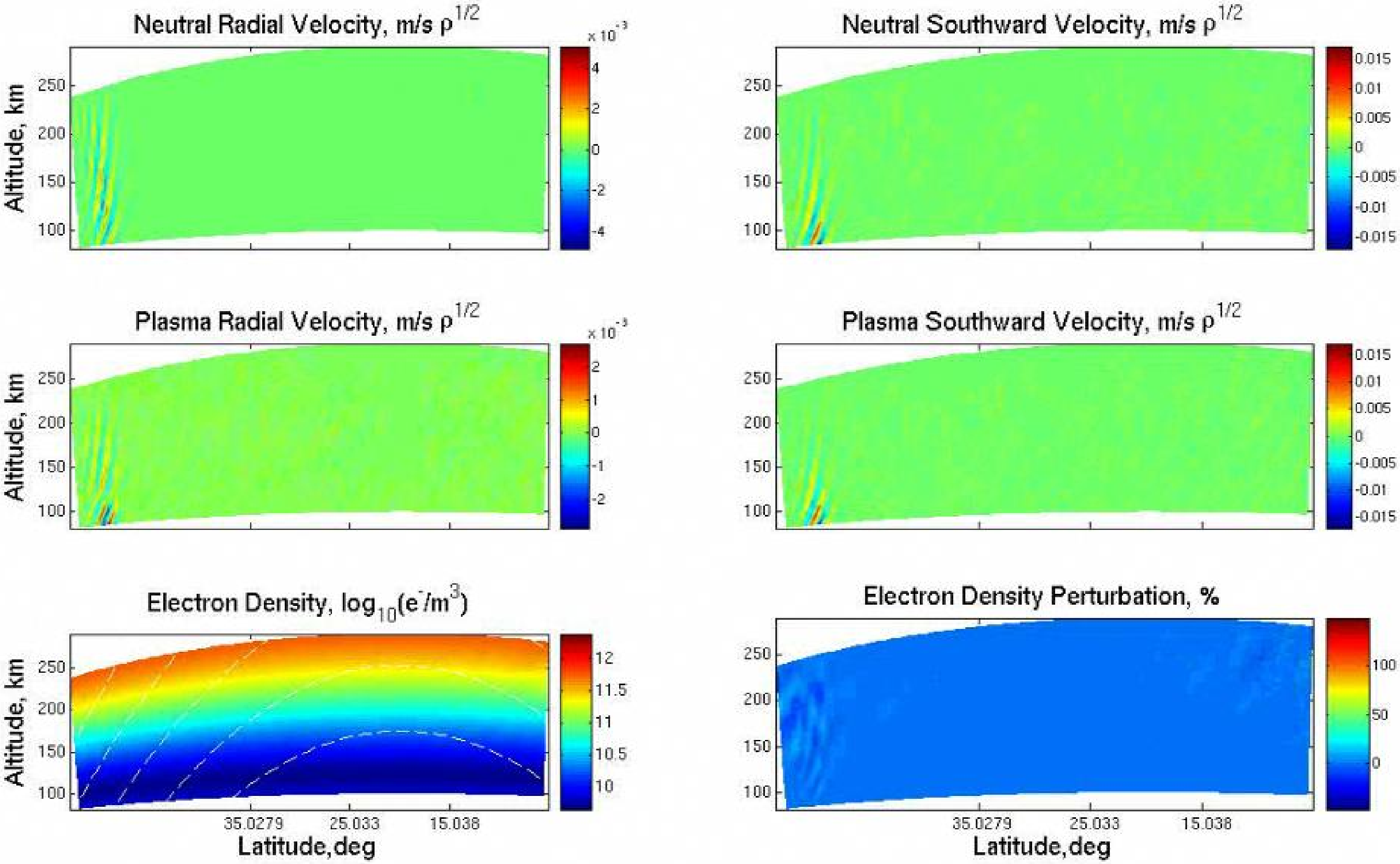
- Interaction des ions avec le champ magnétique
- Autres effets (modifications du taux d’ionisation)

Nostradamus: Le radar trans-horizon de l’ONERA



Nostradamus: Le radar trans-horizon de l’ONERA





Neutral Radial Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

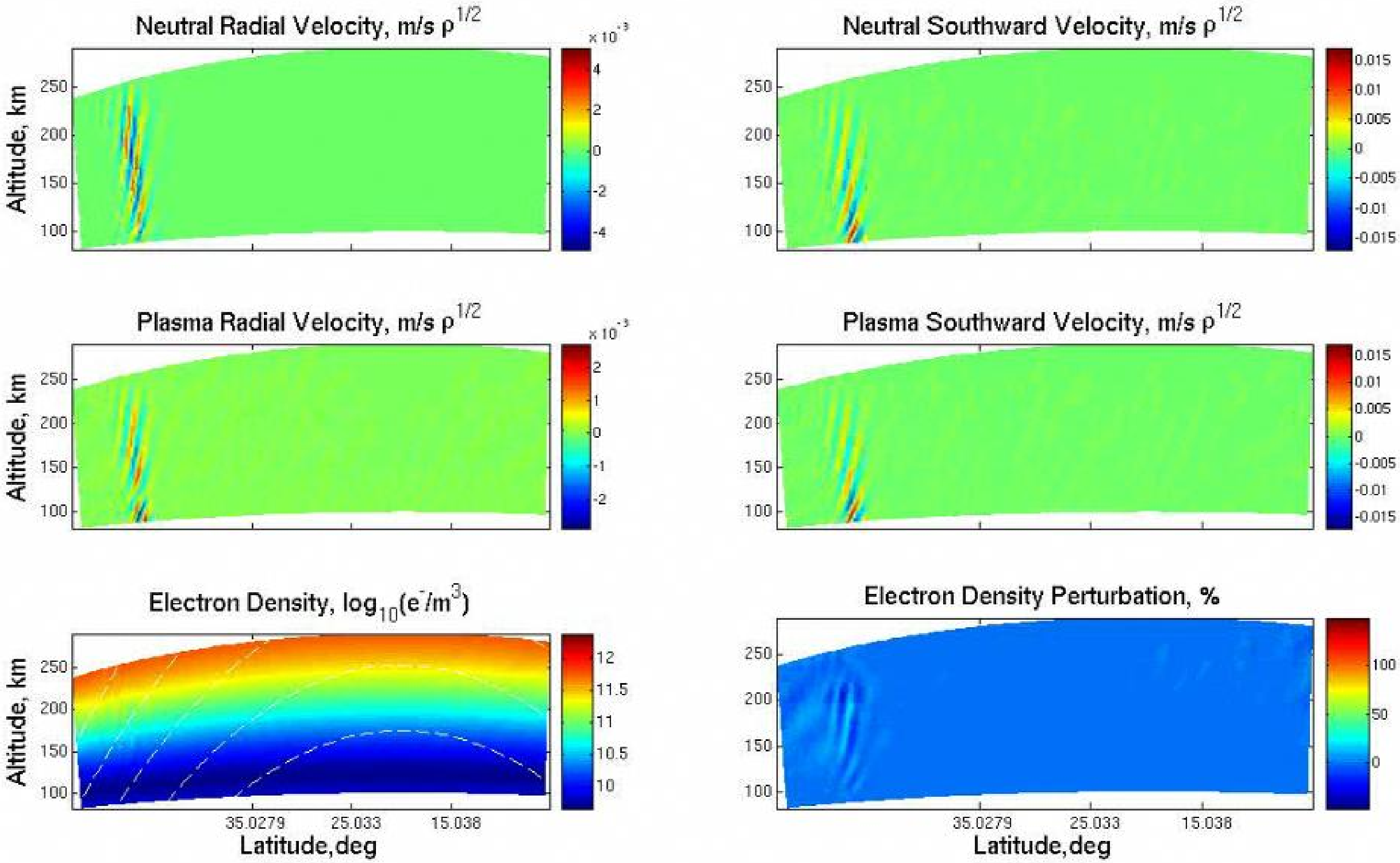
Neutral Southward Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

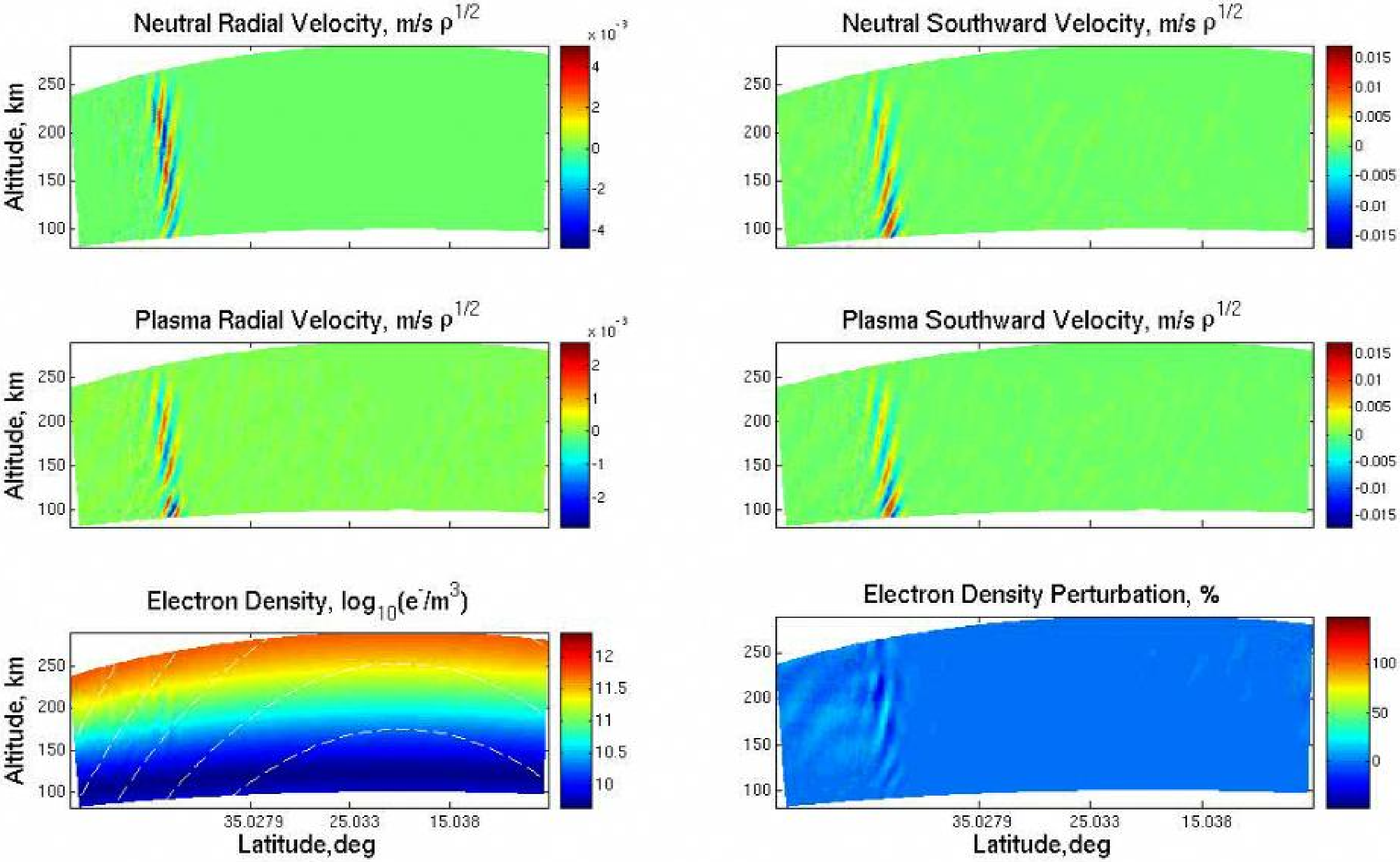
Plasma Radial Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

Plasma Southward Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

Electron Density, $\log_{10}(e^-/m^3)$

Electron Density Perturbation, %





Neutral Radial Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

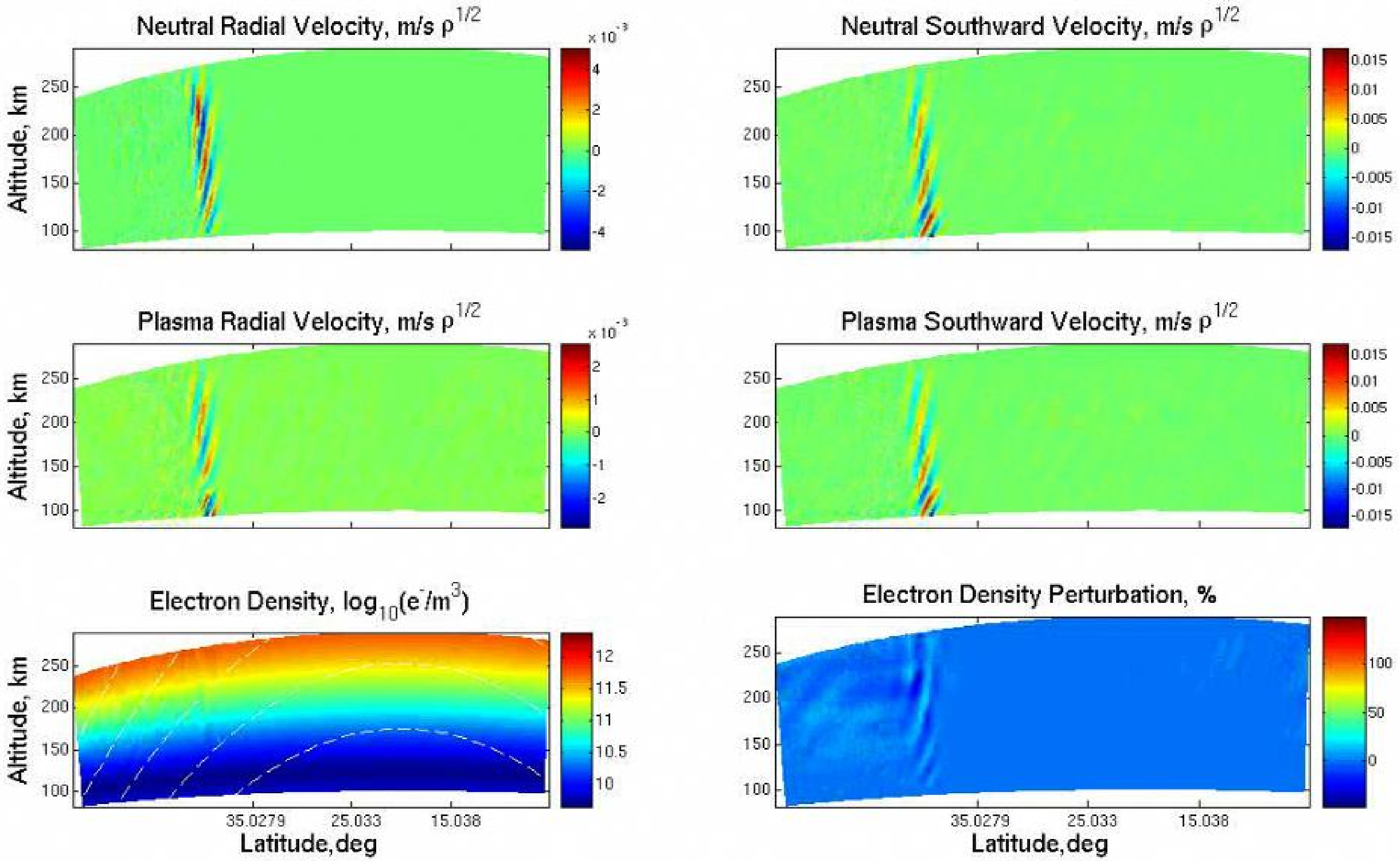
Neutral Southward Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

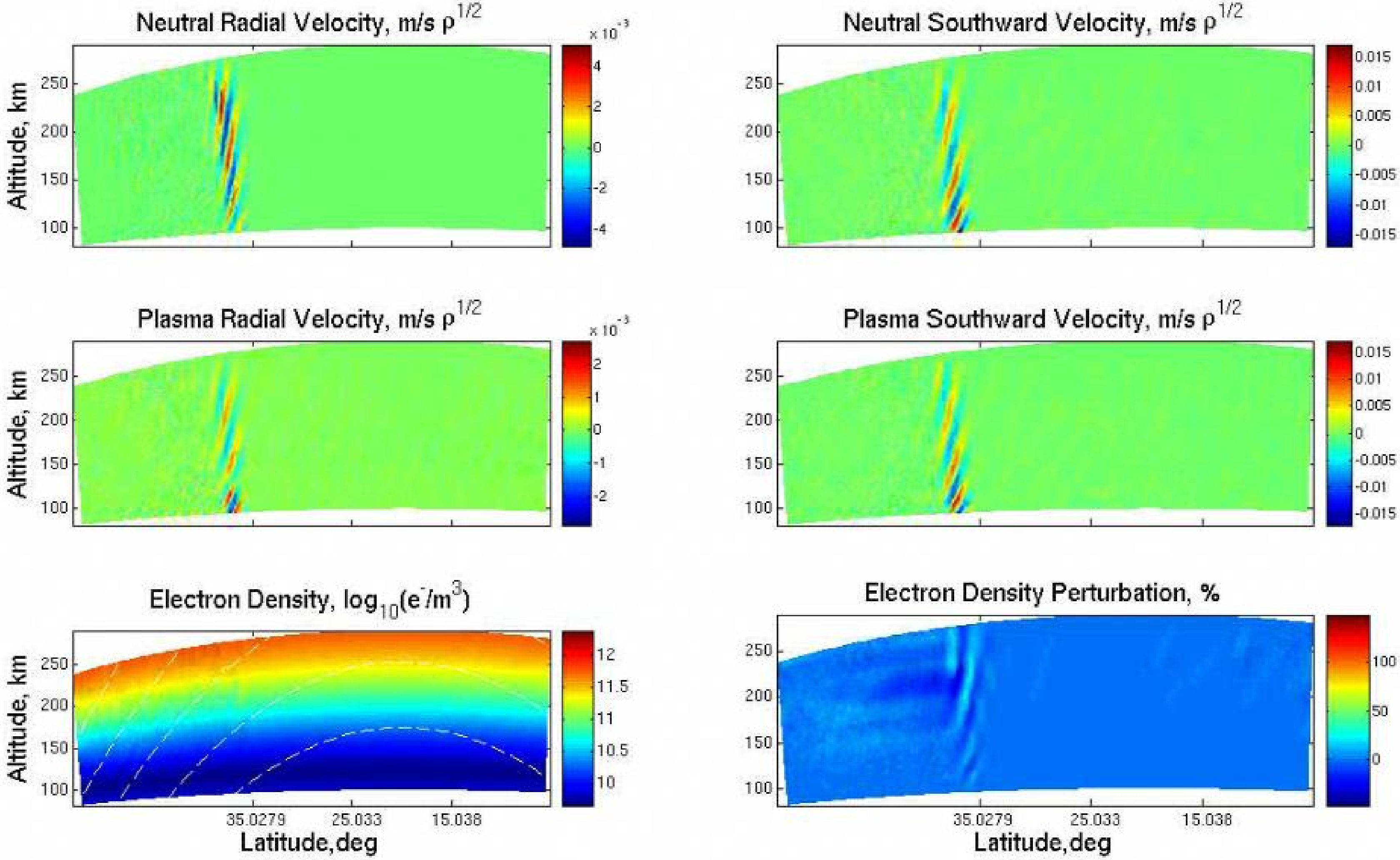
Plasma Radial Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

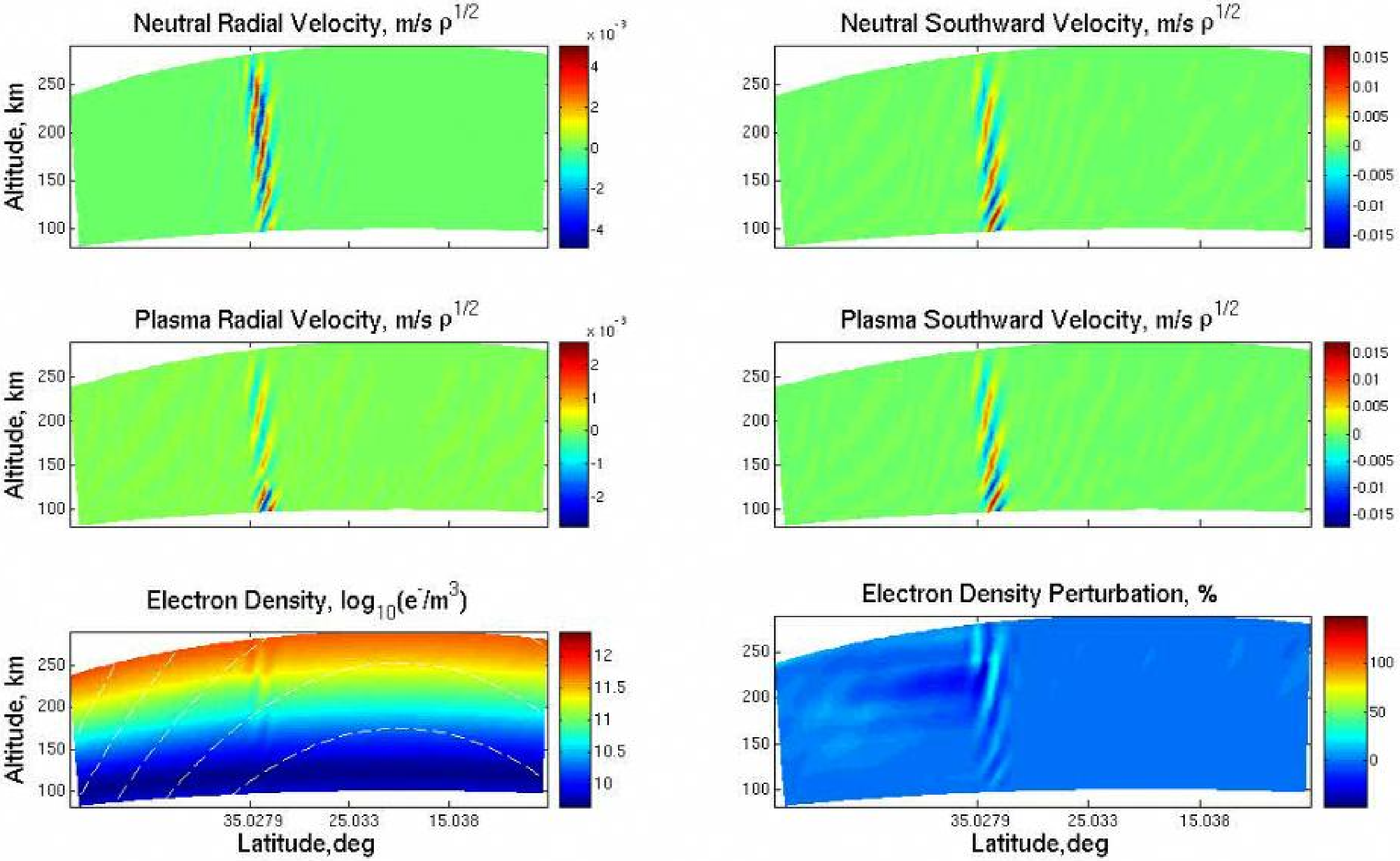
Plasma Southward Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

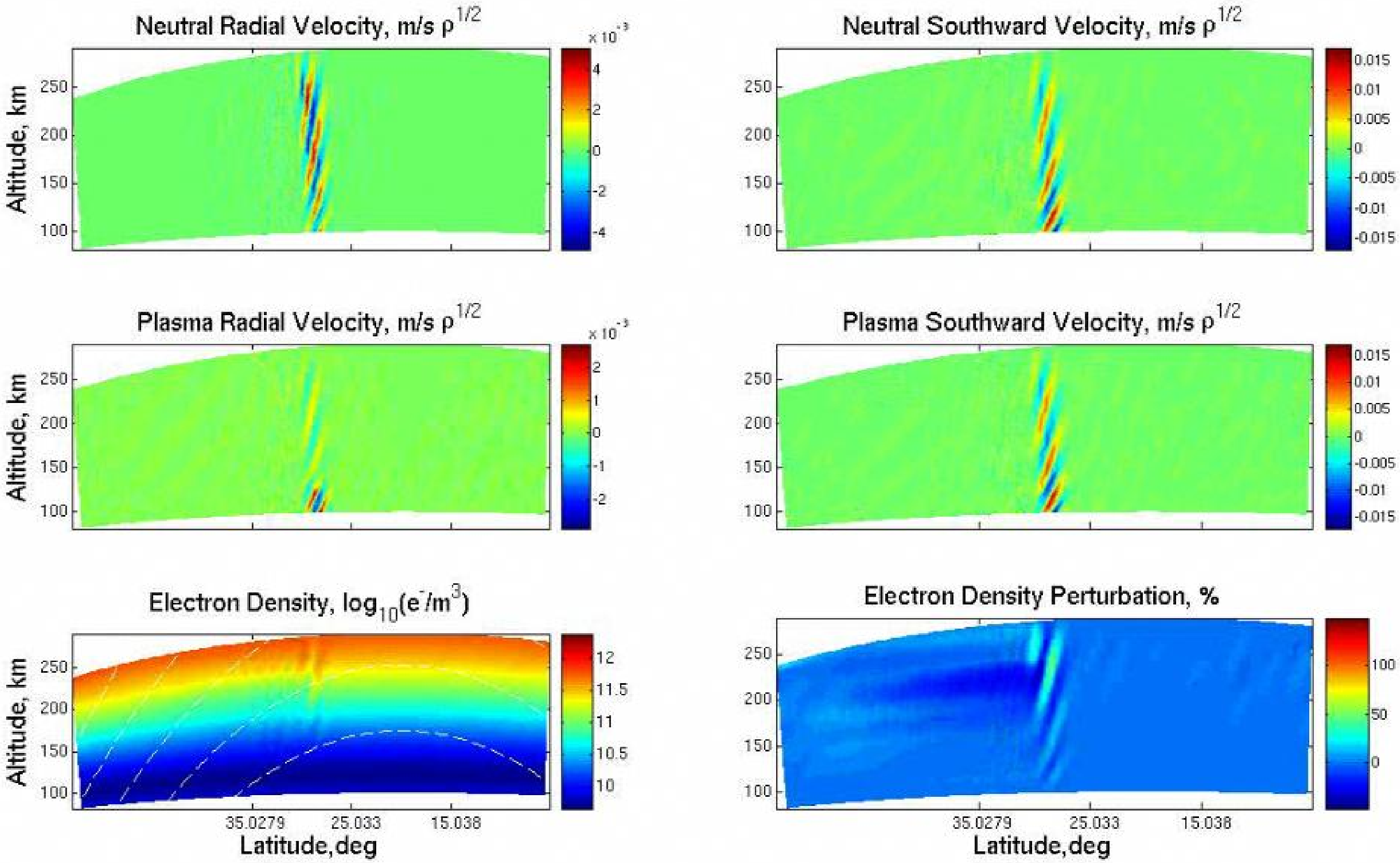
Electron Density, $\log_{10}(e^-/m^3)$

Electron Density Perturbation, %


Neutral Radial Velocity, m/s ρ^1/2
Altitude, km
250
200
150
100
x 10^-3
4
2
0
-2
-4
Neutral Southward Velocity, m/s ρ^1/2
0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
-0.015
Plasma Radial Velocity, m/s ρ^1/2
x 10^-3
2
1
0
-1
-2
Plasma Southward Velocity, m/s ρ^1/2
Electron Density, log10(e-/m3)
12
11.5
11
10.5
10
Electron Density Perturbation, %
100
50
0
35.0279
25.033
15.038
Latitude,deg


Neutral Radial Velocity, m/s ρ^1/2
x 10^-3
4
2
0
-2
-4
Neutral Southward Velocity, m/s ρ^1/2
0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
-0.015
Plasma Radial Velocity, m/s ρ^1/2
x 10^-3
2
1
0
-1
-2
Plasma Southward Velocity, m/s ρ^1/2
0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
-0.015
Electron Density, log10(e-/m3)
12
11.5
11
10.5
10
Electron Density Perturbation, %
100
50
0
Altitude, km
250
200
150
100
35.0279
25.033
15.038
Latitude,deg





Neutral Radial Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

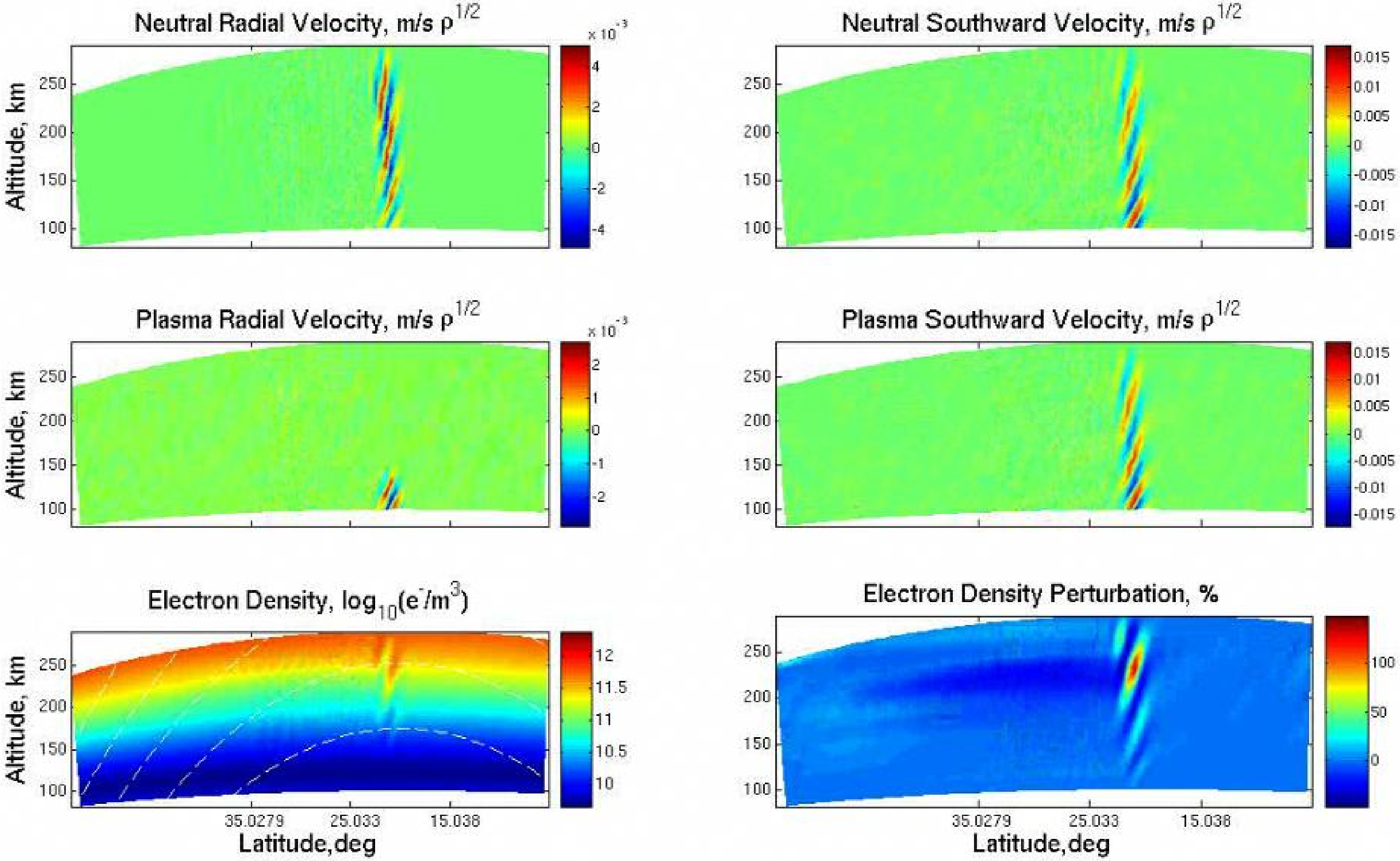
Neutral Southward Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

Plasma Radial Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

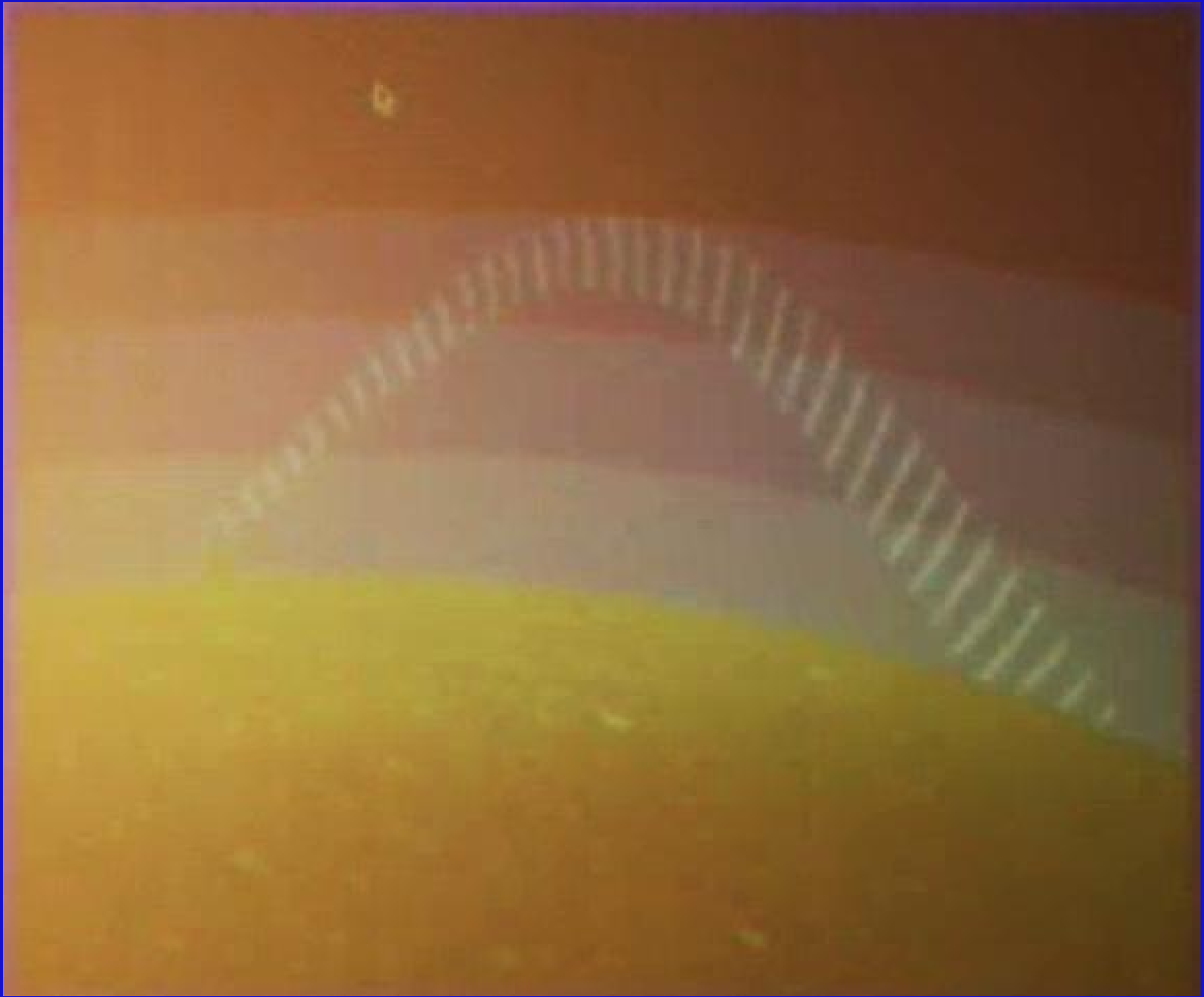
Plasma Southward Velocity, m/s $\rho^{1/2}$

Electron Density, $\log_{10}(e^-/m^3)$

Electron Density Perturbation, %

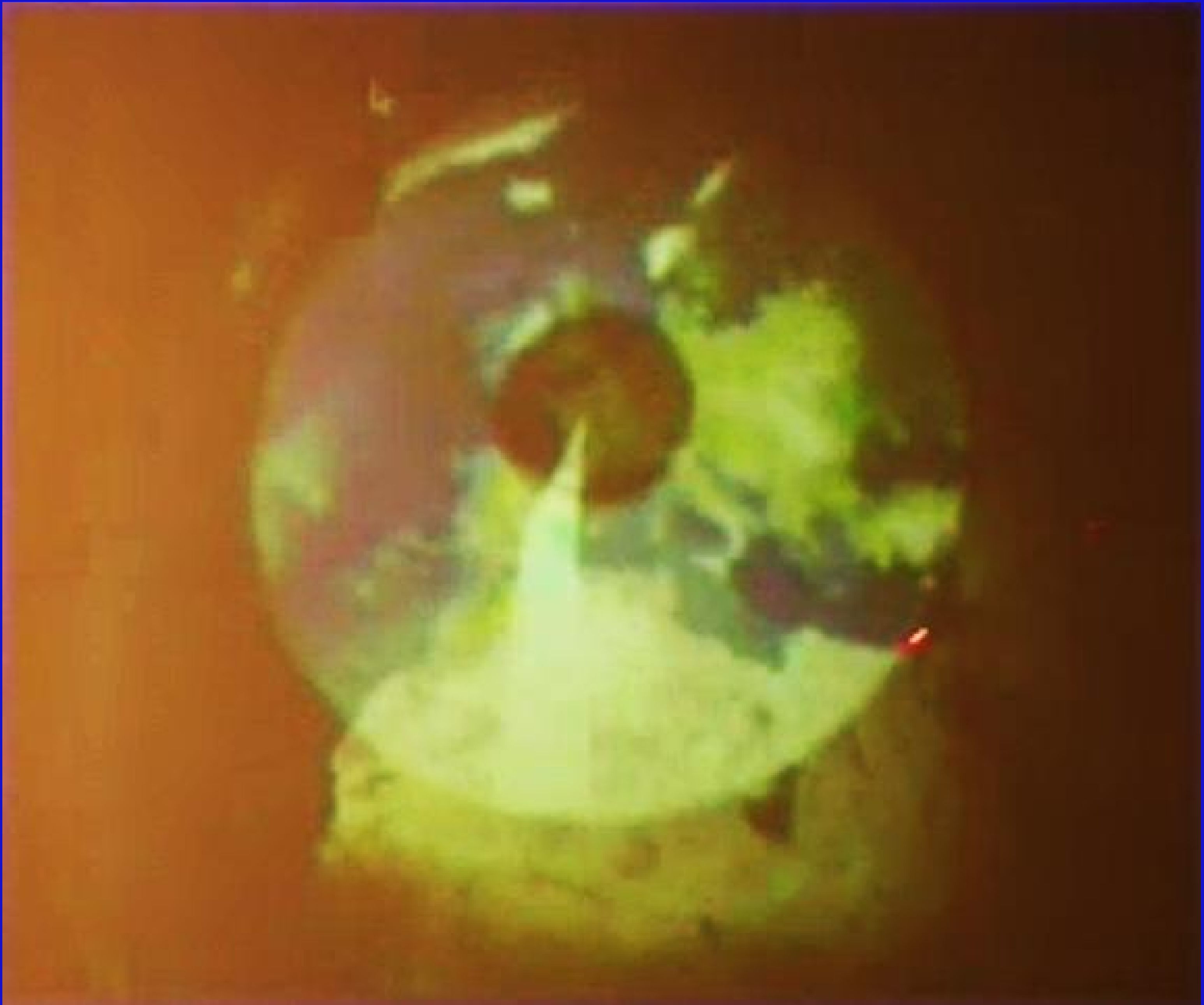

Neutral Radial Velocity, m/s ρ^1/2
Neutral Southward Velocity, m/s ρ^1/2
Plasma Radial Velocity, m/s ρ^1/2
Plasma Southward Velocity, m/s ρ^1/2
Electron Density, log10(e-/m3)
Electron Density Perturbation, %
Altitude, km
250
200
150
100
x 10^-3
4
2
0
-2
-4
0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
-0.015
x 10^-3
2
1
0
-1
-2
12
11.5
11
10.5
10
100
50
0
35.0279
25.033
15.038
Latitude,deg

Nostradamus: Le radar trans-horizon de l’ONERA

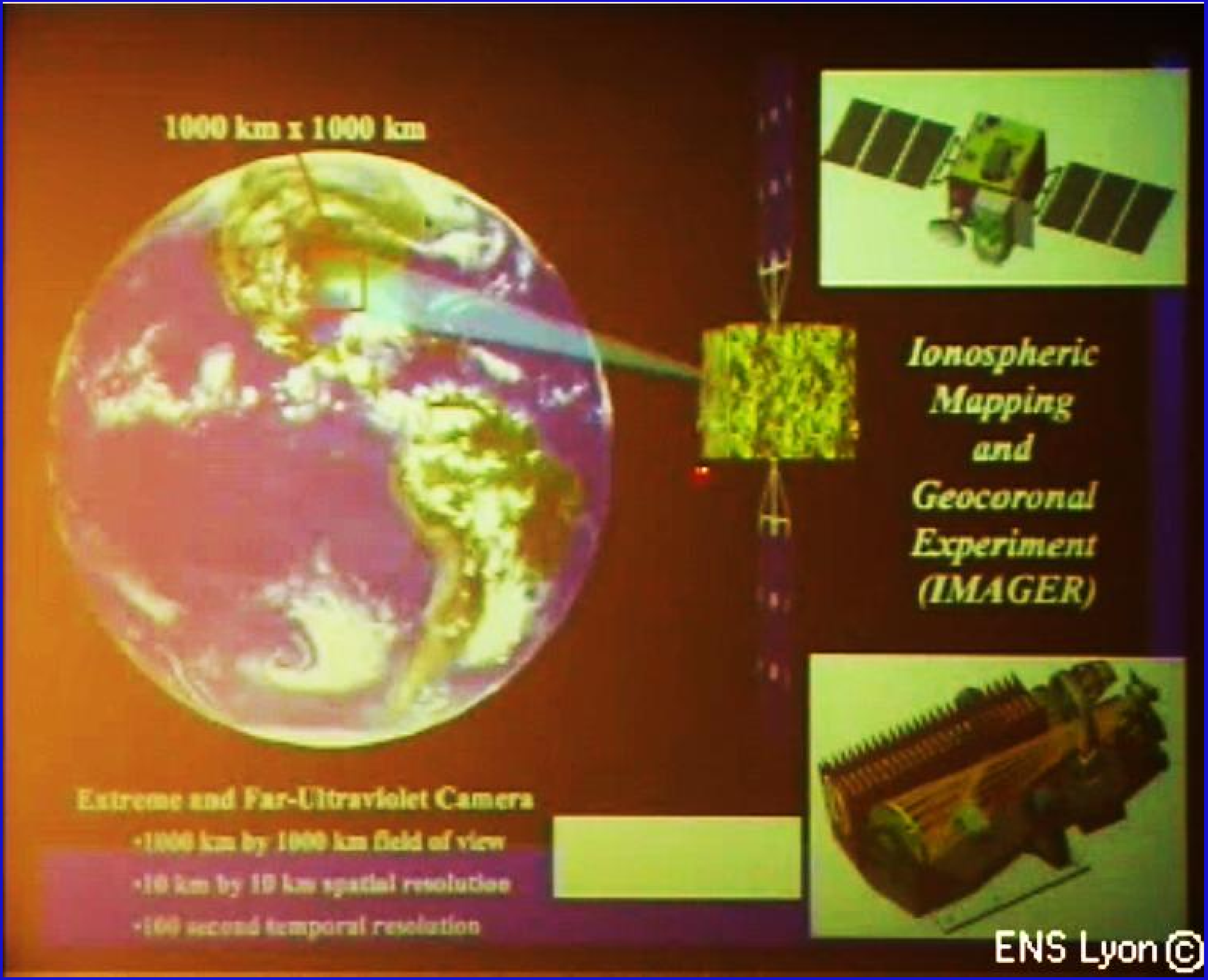


Nostradamus: Le radar trans-horizon de l’ONERA

Nostradamus: Le radar trans-horizon de l’ONERA



IMAGER



1000 km x 1000 km

Ionospheric Mapping and Geocoronal Experiment (IMAGER)

Extreme and Far-Ultraviolet Camera

- 1000 km by 1000 km field of view
- 10 km by 10 km spatial resolution
- 100 second temporal resolution

ENS Lyon ©

Conclusion

- Après le tsunami de Sumatra de 2004, un effort mondial dans la mise en place de systèmes d’alerte a été fait
- Systèmes très efficaces pour les tsunami de l’ampleur de Sumatra….Mais ces systèmes devront rester permanents…
- Apparition de la dimension spatiale
  - Encore une activité de recherche
  - Mais des perspectives importantes pour une surveillance continue
  - Meilleure gestion des « fausses alertes »
  - Meilleure caractérisation des amplitudes en pleine mer
  - Peut être à terme, une capacité pour des tsunami sismiquement silencieux

Questions

- Amplitude ...
- Longueur d'onde ...
- Atténuation ... des mouvements détectables depuis l'ionosphère.