

Le séisme et tsunami japonais de mars 2011: une telle catastrophe était-elle prévisible ?



Par Pr. Jean Virieux

Université Joseph Fourier – Grenoble I, ISTerre, IUF
avec l'aide de Philippe Guéguen et de Fabrice Cotton, ISTerre

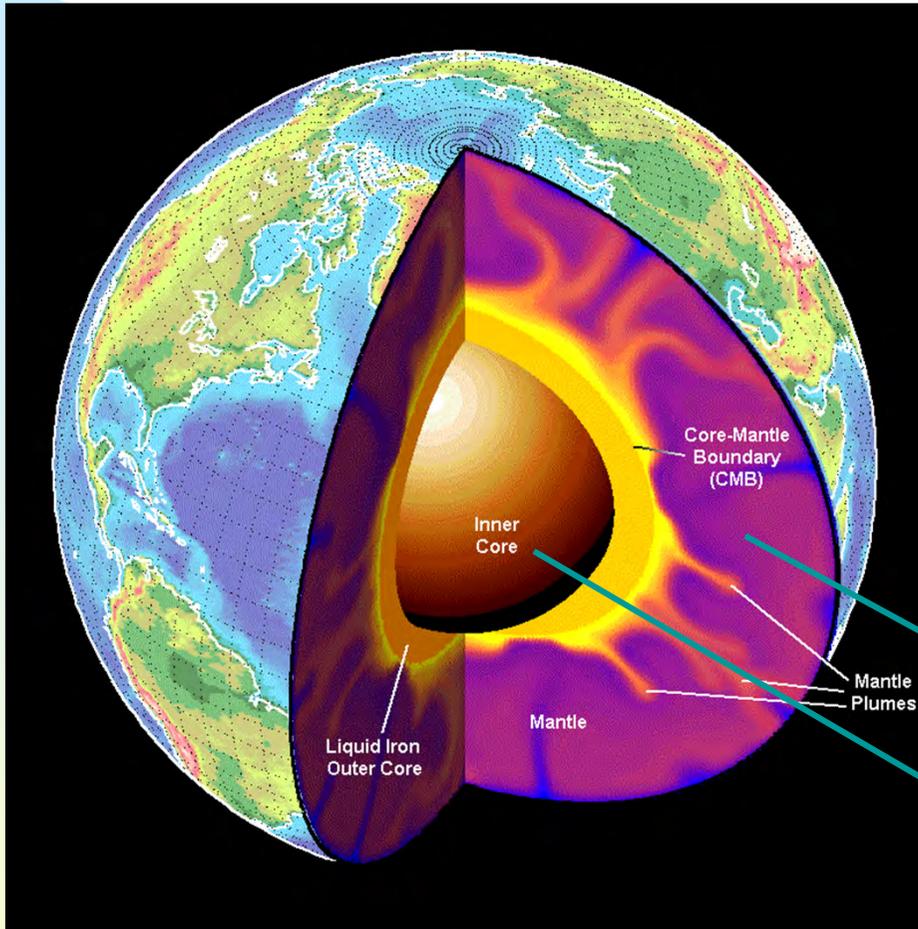


KOBE 1995

Une remise en question des connaissances au Japon tant sur les événements naturels que sur le « design » des constructions



C'est solide (encore que...) mais ça bouge à l'intérieur



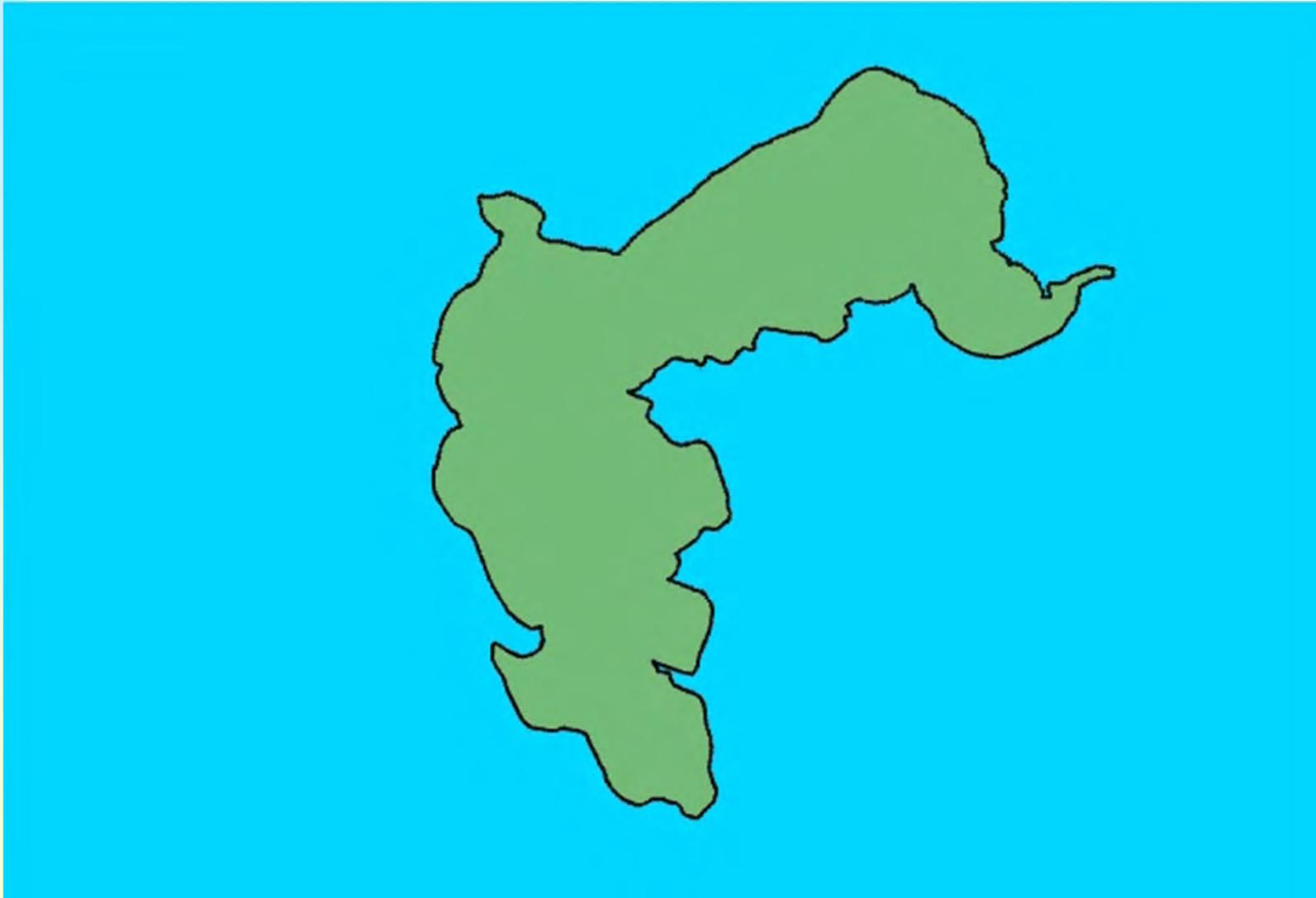
MOUVEMENTS DE CONVECTION



V en cm/an

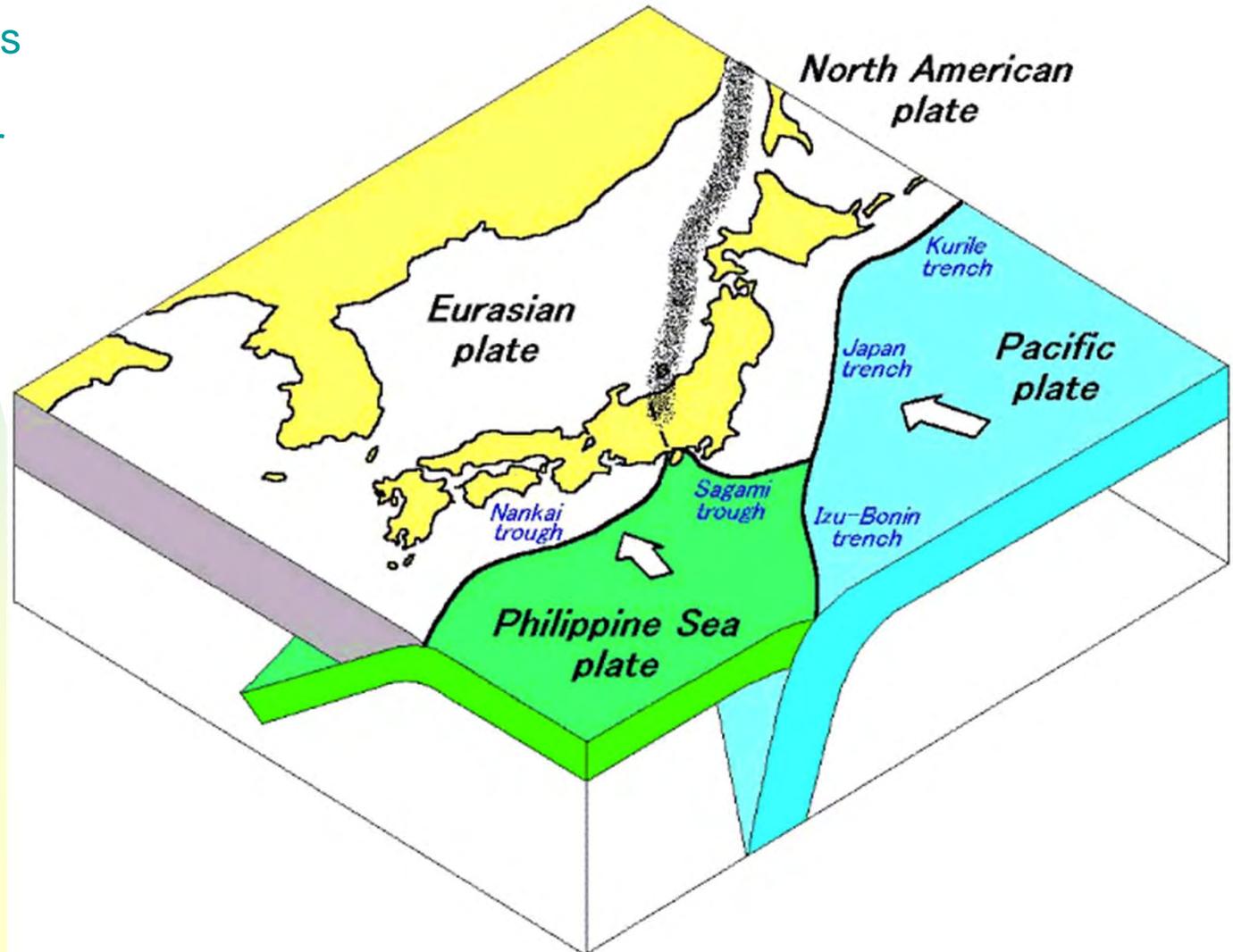
V en km/an

L'évolution des continents sur 200 MA



Un régime permanent à l'échelle humaine

Les frontières de
plaque et donc les
séismes ne
changent que sur
des durées
géologiques



Là où il y a eu des
séismes, il y aura
des séismes ...

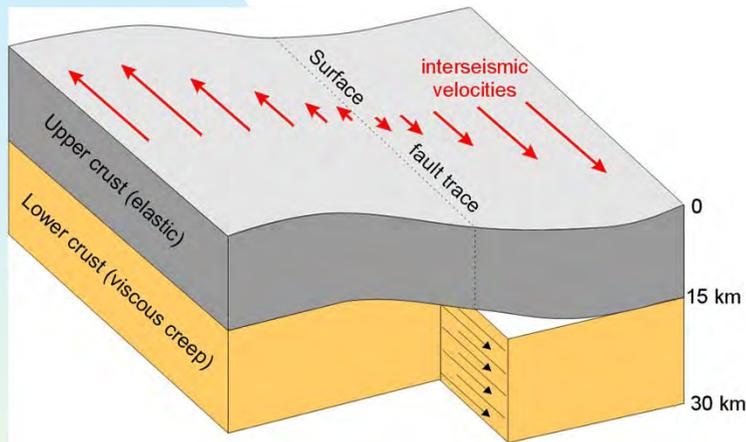
Les Séismes

Séisme Ligure : 23 Fev 1887
(magnitude estimé 6)



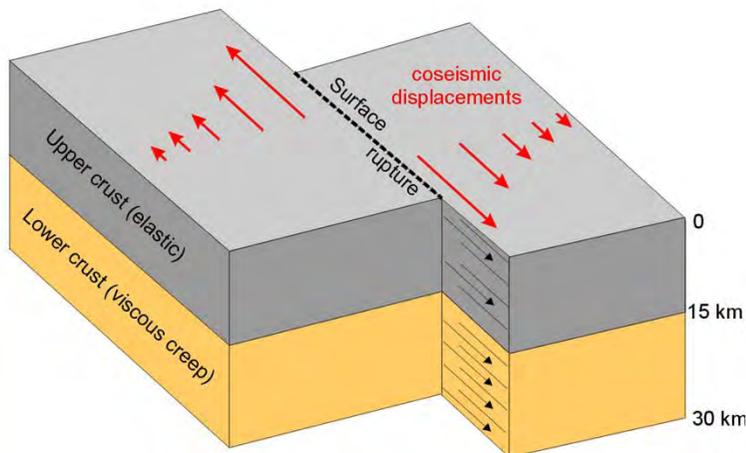
De graves dégâts et plus de 600 victimes du côté italien

Cycle sismique et rebond élastique



Entre les séismes

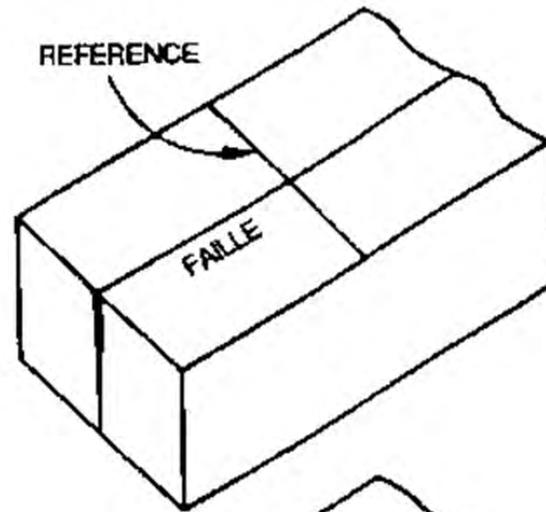
- Dans la croûte supérieure: les failles sont bloquées => les efforts élastiques s'accumulent
- En profondeur: les failles glissent asismiquement (fonction de la température et du type de roches)



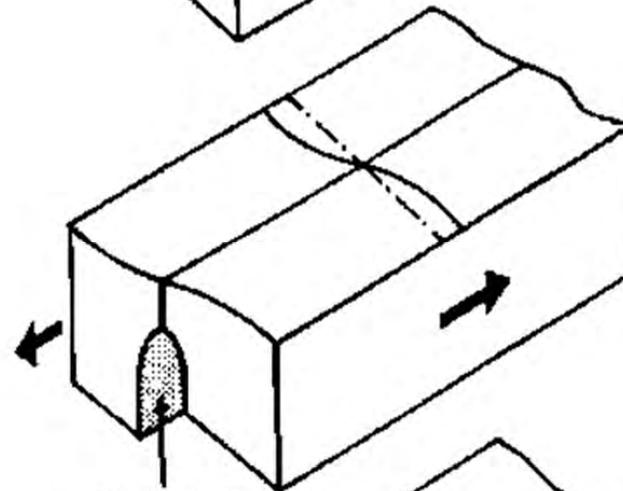
Pendant un séisme

- Efforts > résistance mécanique de la faille
- L'énergie élastique accumulée est soudainement relâchée par une rupture
- La rupture concerne une portion de faille (courte => faible magnitude, longue => forte magnitude)
- ondes

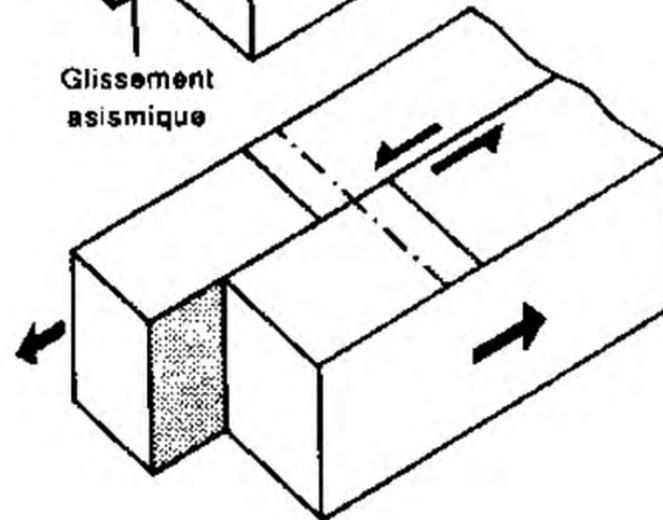
a
1=0
au départ



b
avant le
séisme



c
après le
séisme





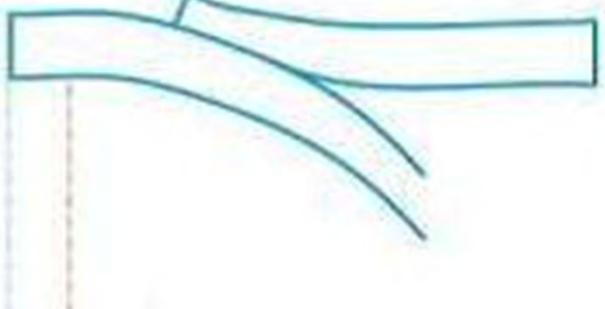


Le rebond élastique (subduction)

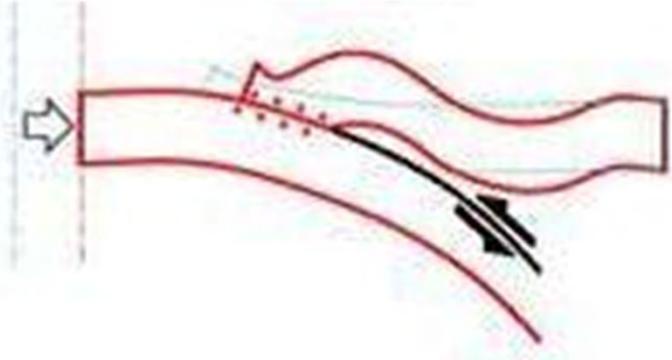
Pacifique

Japon

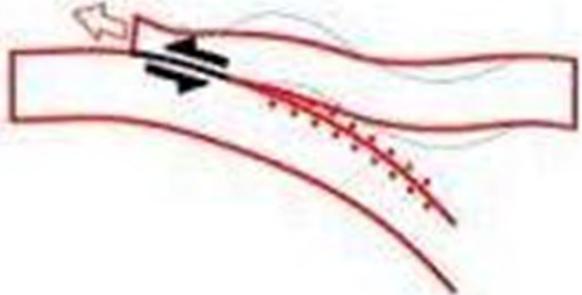
Etat Initial



Intersismique



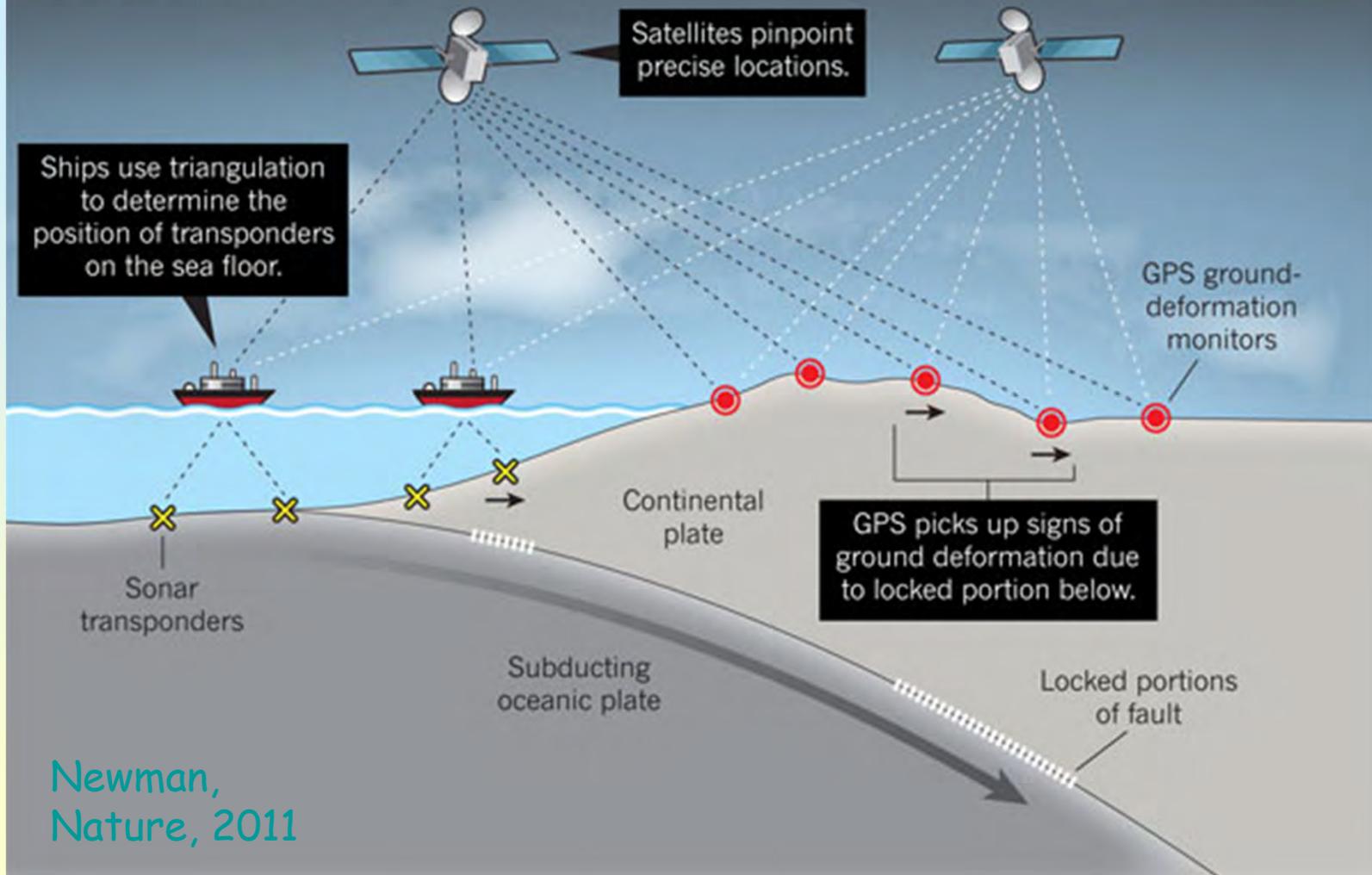
Cosismique



Source : Seamerge report

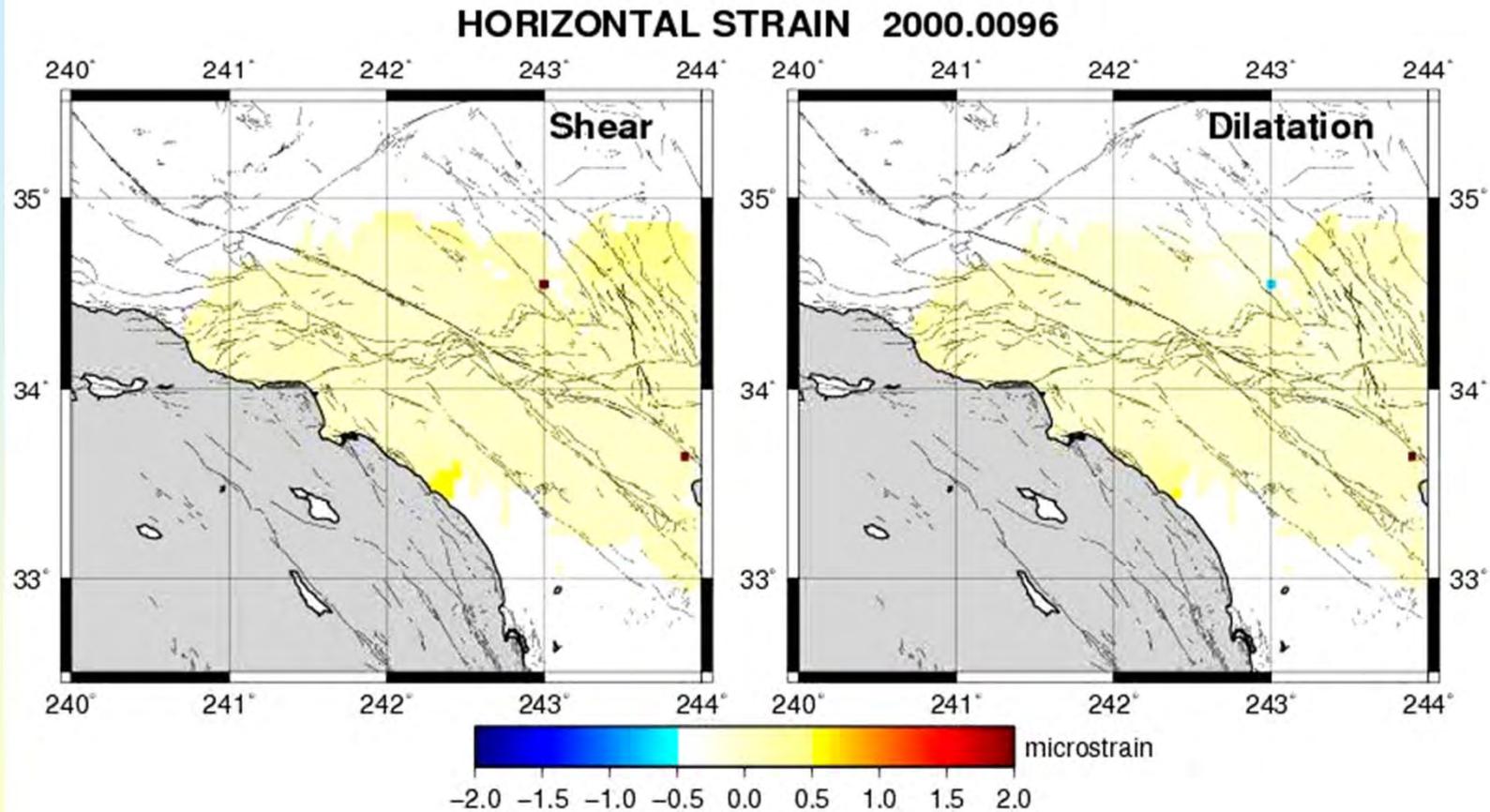
WATCHING THE EARTH MOVE

Ships are used as intermediaries to measure sea-floor deformation, which reveals where the plate is locked — stuck along faults.



Newman,
Nature, 2011

Le chargement mécanique en Californie, région très instrumentée

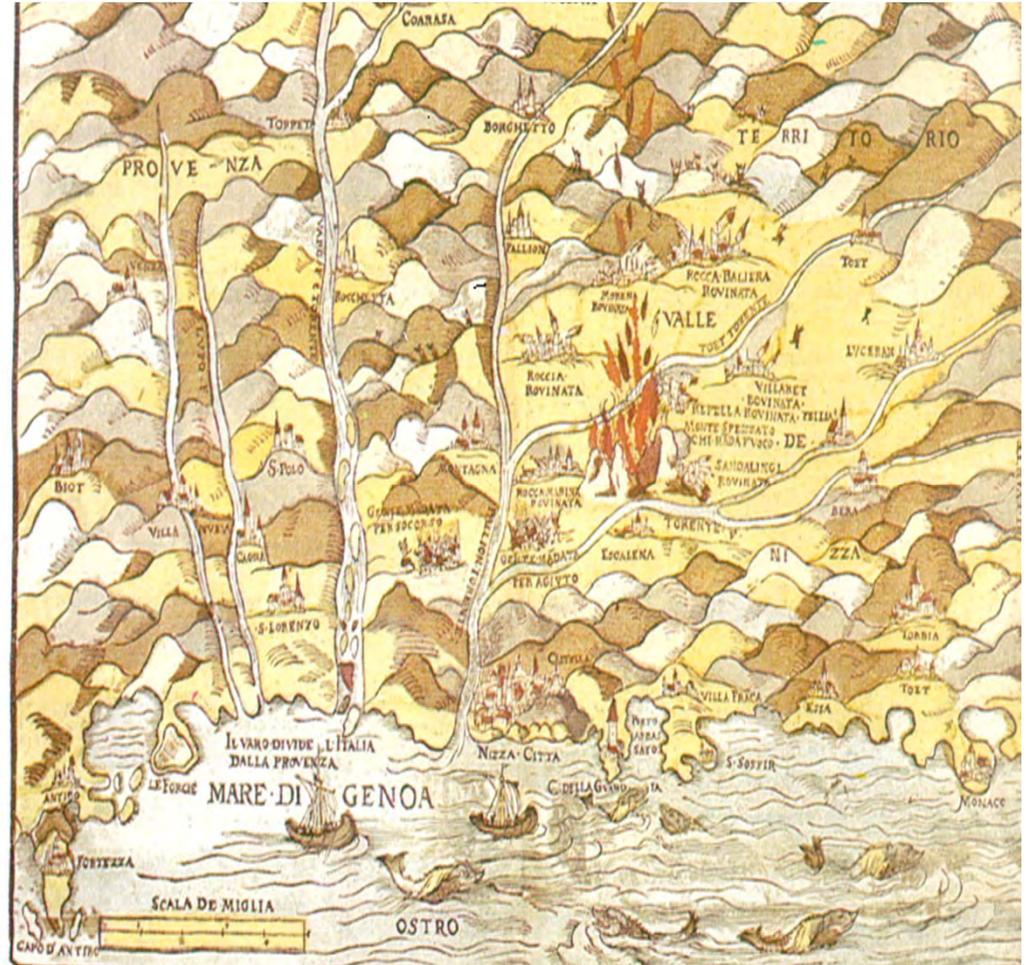


Les séismes dans le monde

Magnitude Nombre moyen par an Description

8 et plus	1	Séisme majeur
7 à 7.9	18	Séisme très fort
6 à 6.9	120	Séisme fort
5 à 5.9	800	Séisme modéré
4 à 4.9	6500	Séisme faible
3 à 3.9	50000 (estimé)	microséisme
2	environ 1000/jour(estimé)	
1	environ 8000/jour(estimé)	

Statistiques de 1900 à nos jours



Le séisme de Tohoku (2011) de magnitude 9.3

le 4^{ème} plus puissant séisme depuis 1900

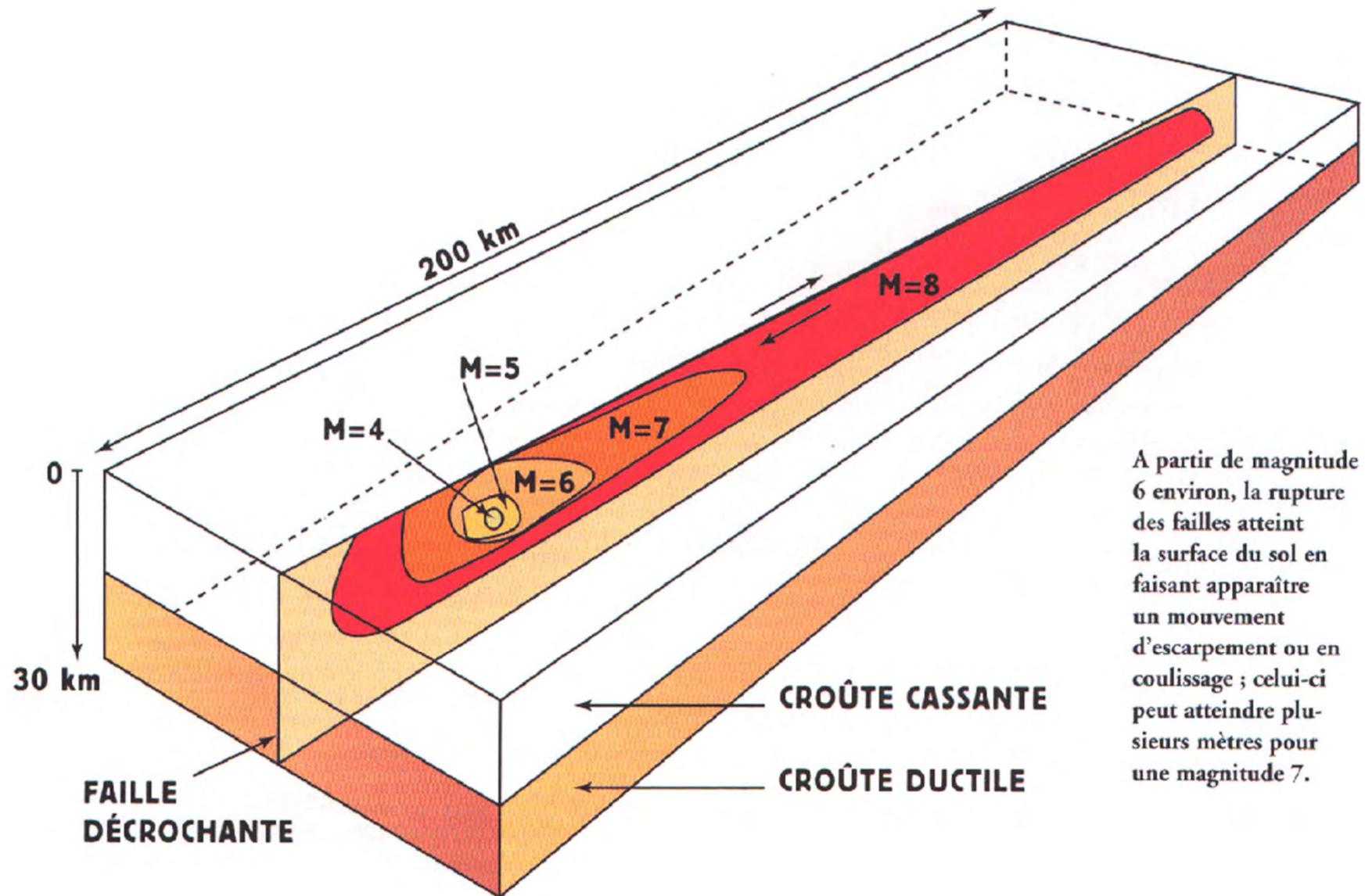
Magnitude

qui ne va pas de 0 à 9
Échelle ouverte

- Liée à la taille et à l'énergie libérée par le séisme
- Calculée en utilisant les enregistrements (sismogrammes)
- Un séisme = une magnitude et une seule
- Exprimée sur l'échelle de Richter
 - ◆ $M = 5$ Annecy 1995
 - ◆ $M = 6$ Lambesc 1909
 - ◆ $M = 7,2$ Haiti 2005
 - ◆ $M = 9$ Japon 2011
 - ◆ $M = 9,5$: plus gros séisme connu (Chili, 196; Sumatra 2004)

Ne pas confondre avec l'échelle des intensités en chiffres romains liée aux dégâts

MAGNITUDE ET SURFACE DE RUPTURE



A partir de magnitude 6 environ, la rupture des failles atteint la surface du sol en faisant apparaître un mouvement d'escarpement ou en coulissage ; celui-ci peut atteindre plusieurs mètres pour une magnitude 7.

Tout séisme est lié au « jeu » d'une faille

Le glissement sur la faille
dépend de la magnitude M :

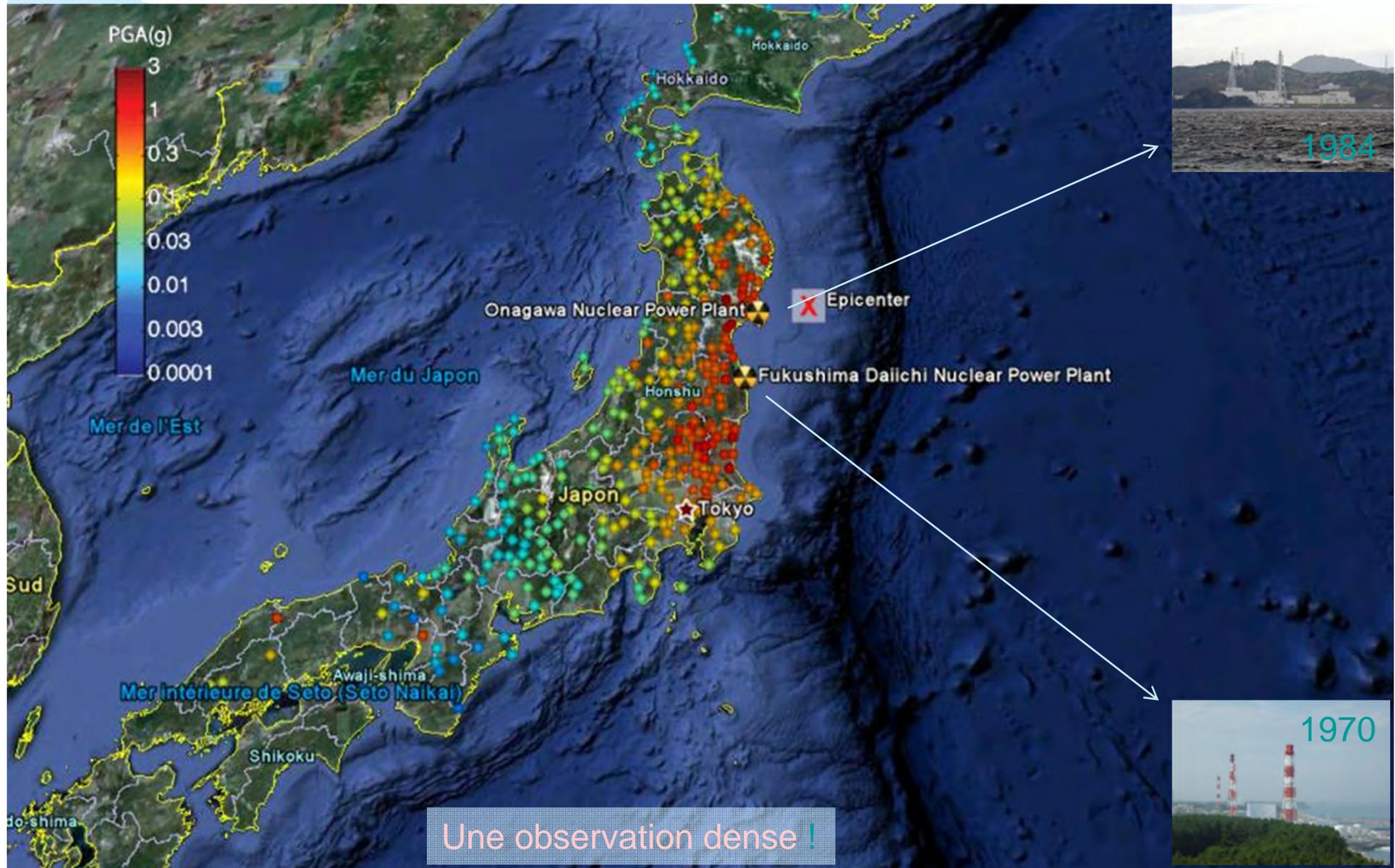
- $M = 2$: glissement de 0,3 cm
- $M = 4$: glissement de 3 cm
- $M = 6$: glissement de 30 cm
- $M = 9$: glissement de 15 mètres

LES LOIS D'ECHELLE

PARAMÈTRES CARACTERISTIQUES

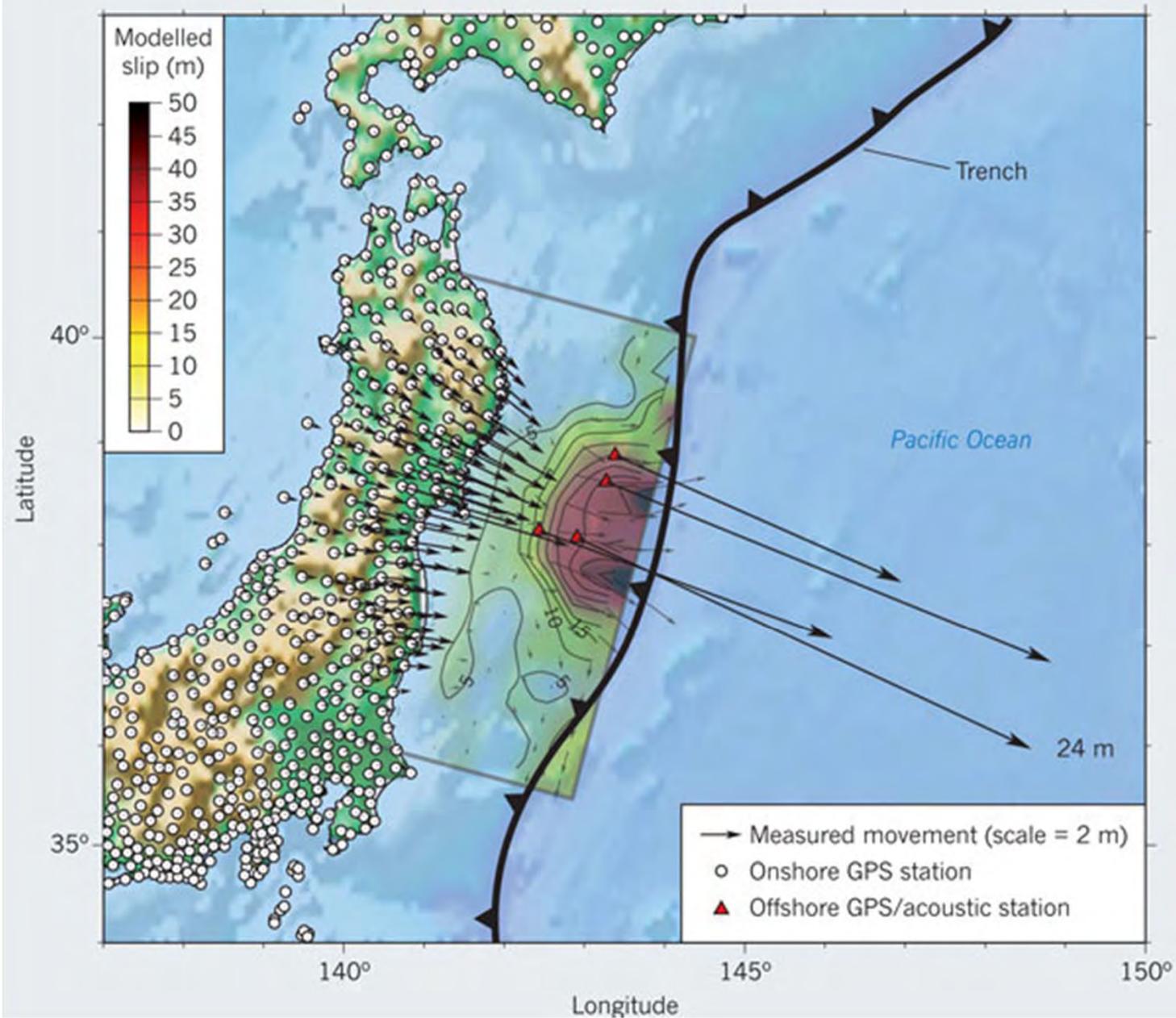
MAGNITUDE	LONGUEUR DE RUPTURE	GLISSEMENT EN SURFACE
5.0	3 - 4 km	--
6.0	10 - 15 km	~ 20 cm
7.0	40 - 50 km	1 -2 m
8.0	200 - 300 km	4 - 6 m
9.0	800 - 1000 km	15 - 20 m

Une position géographique à risques

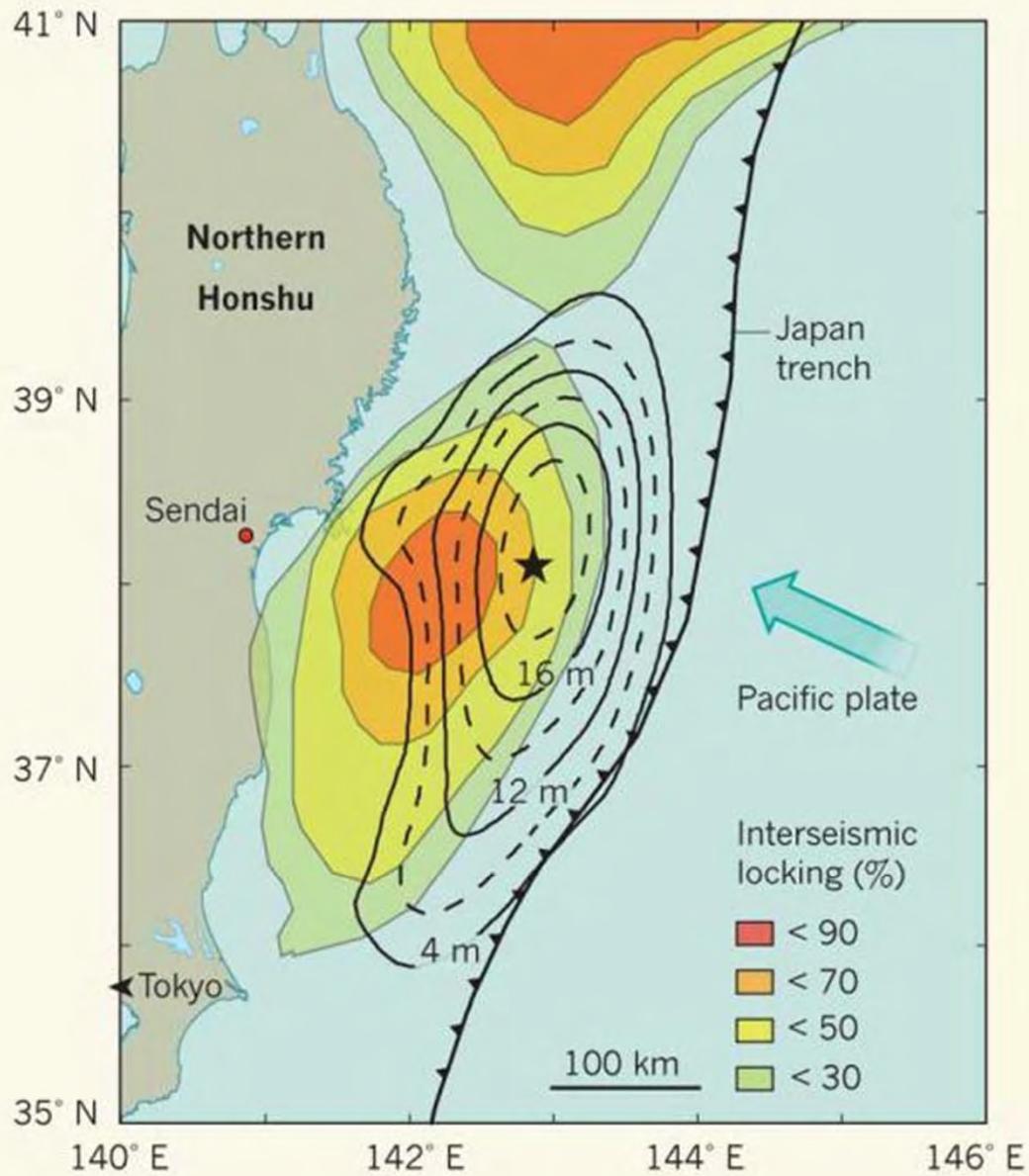


LOPSIDED MEASURES

Most of the action during the 11 March 2011 tsunami-forming earthquake that hit Japan was offshore, but the vast majority of ground-deformation sensors are on land.



Newman,
Nature, 2011



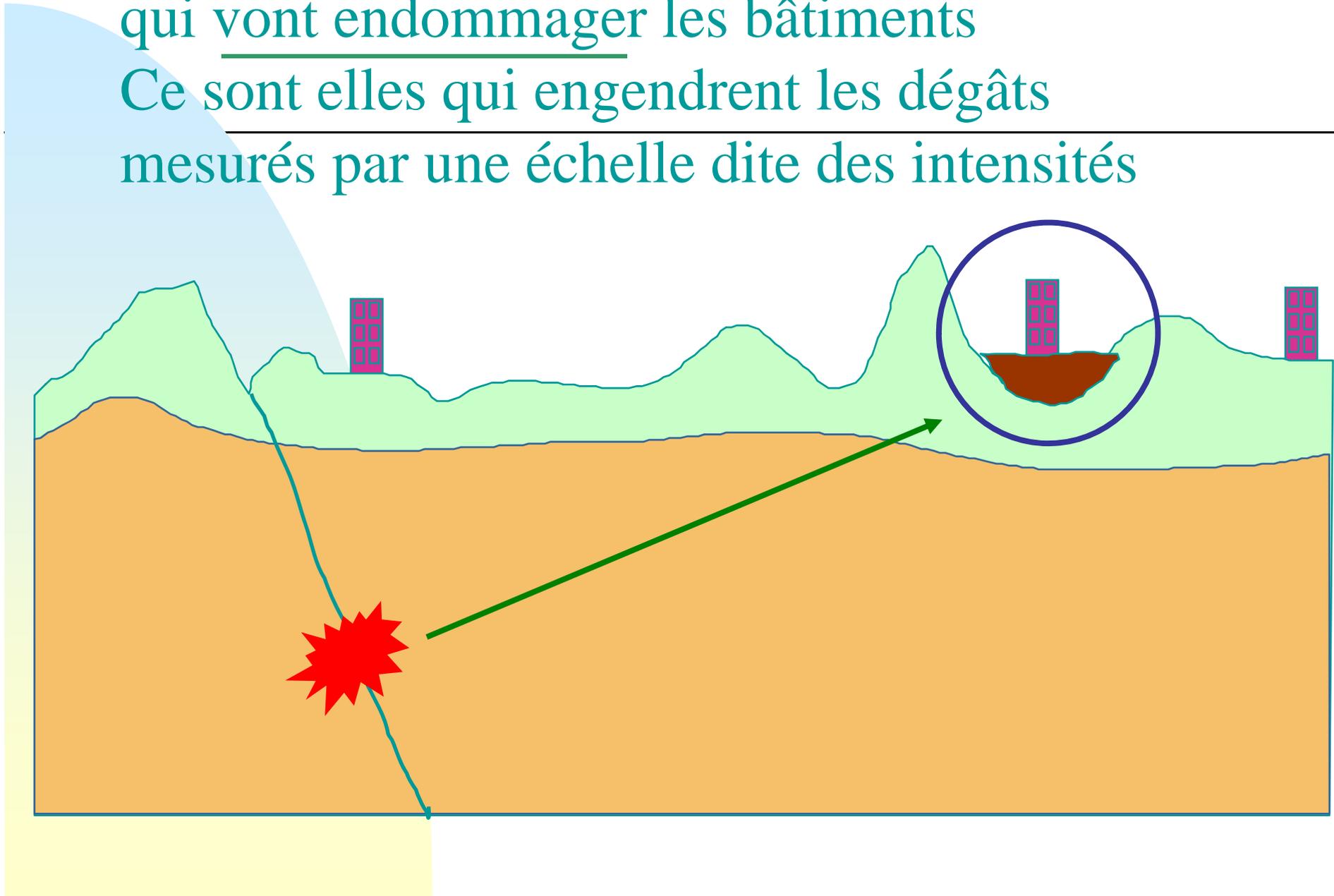
Glissement entre les deux lèvres de la faille a dépassé les 20 mètres, voire 40 mètres

Avouac
2011, Nature

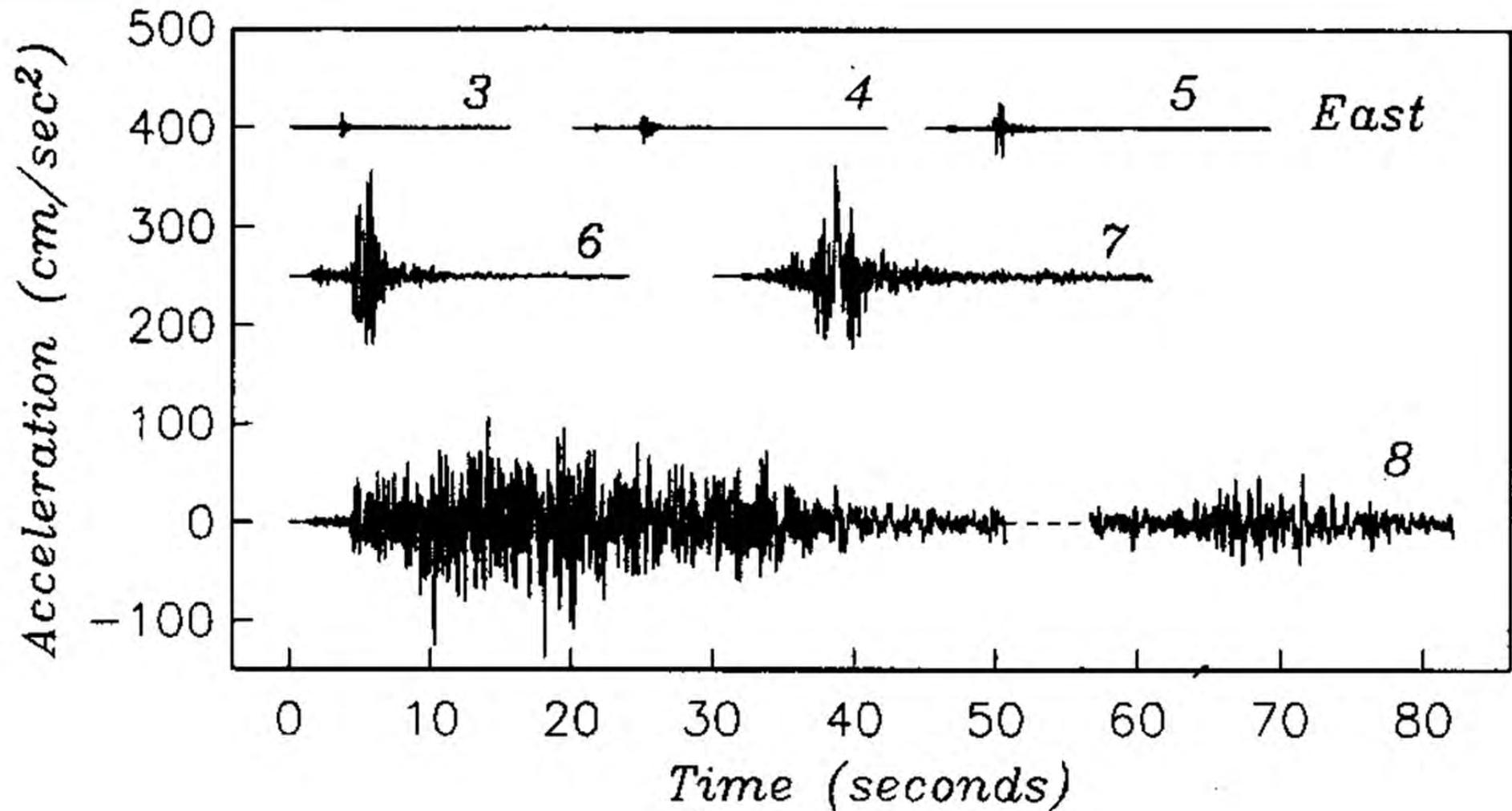


Les effets du séisme

Le séisme crée des ondes (vibrations du sol)
qui vont endommager les bâtiments
Ce sont elles qui engendrent les dégâts
mesurés par une échelle dite des intensités



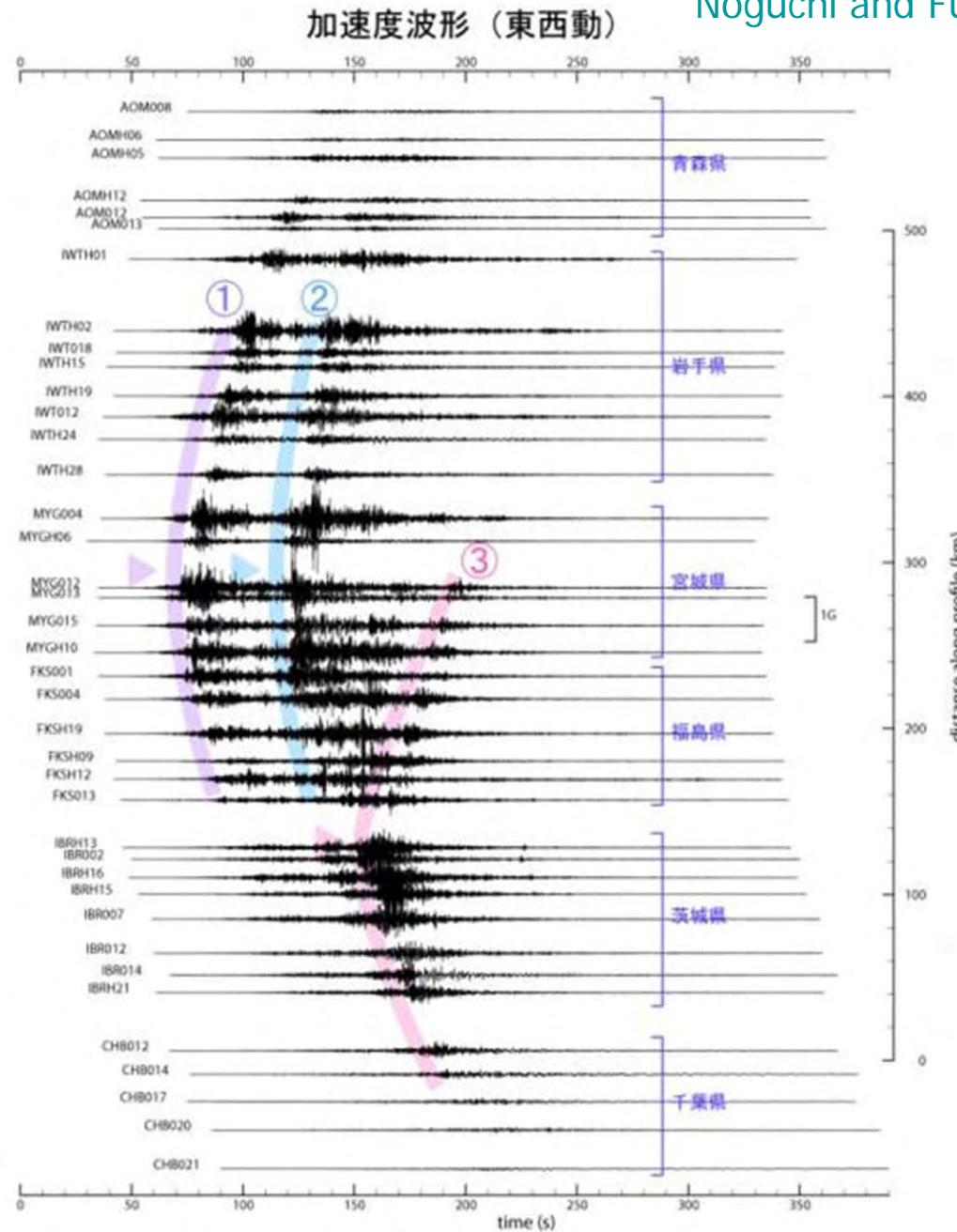
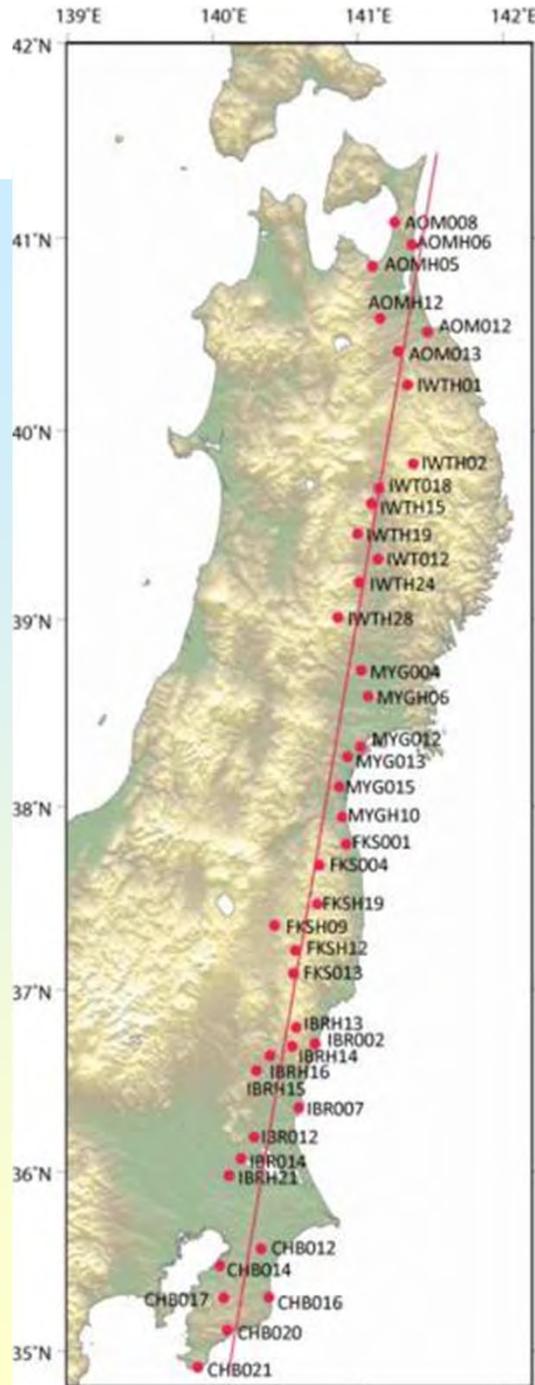
Accélération du sol en fonction de la magnitude



Le Japon : un effort exceptionnel depuis KOBE (1995)

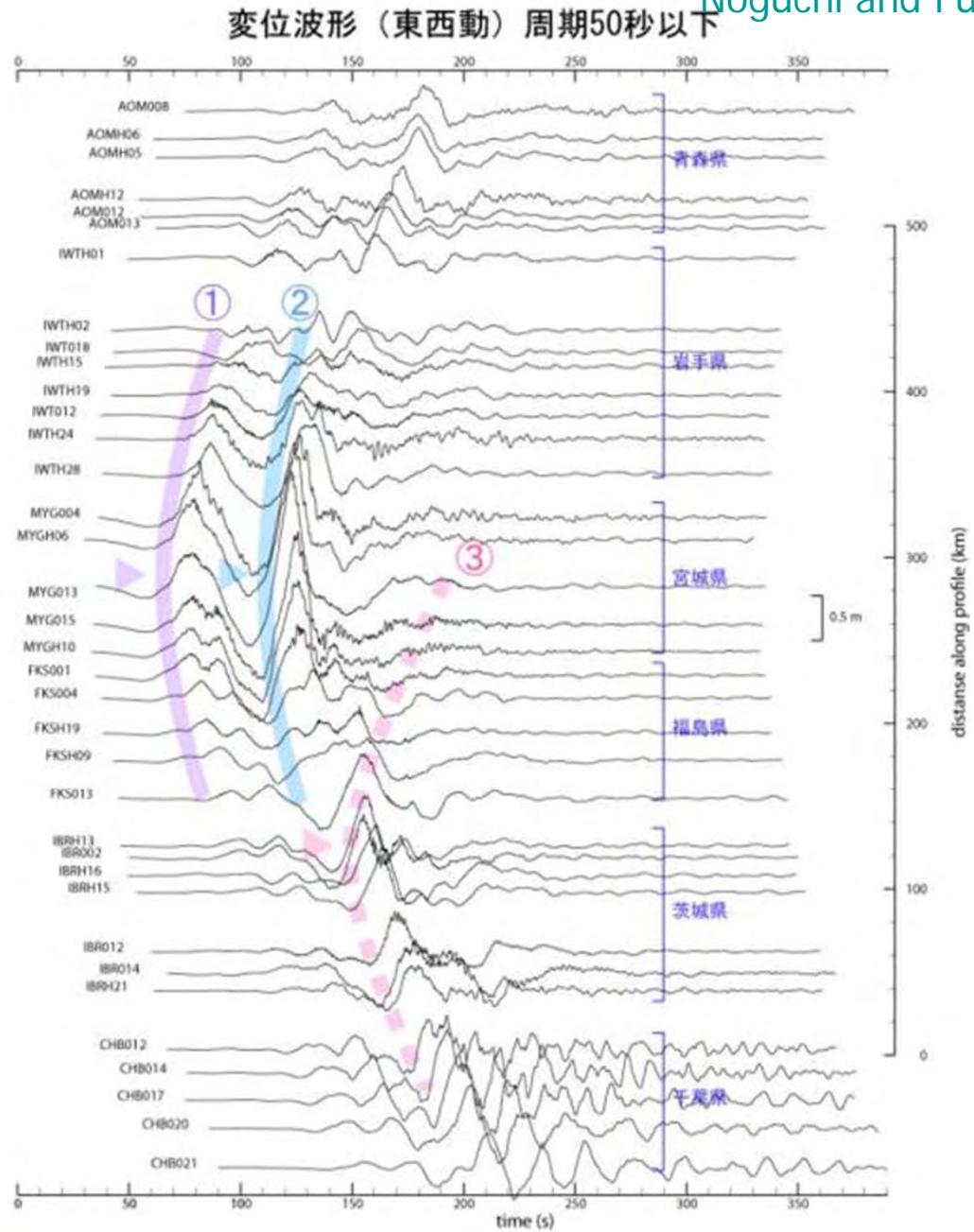
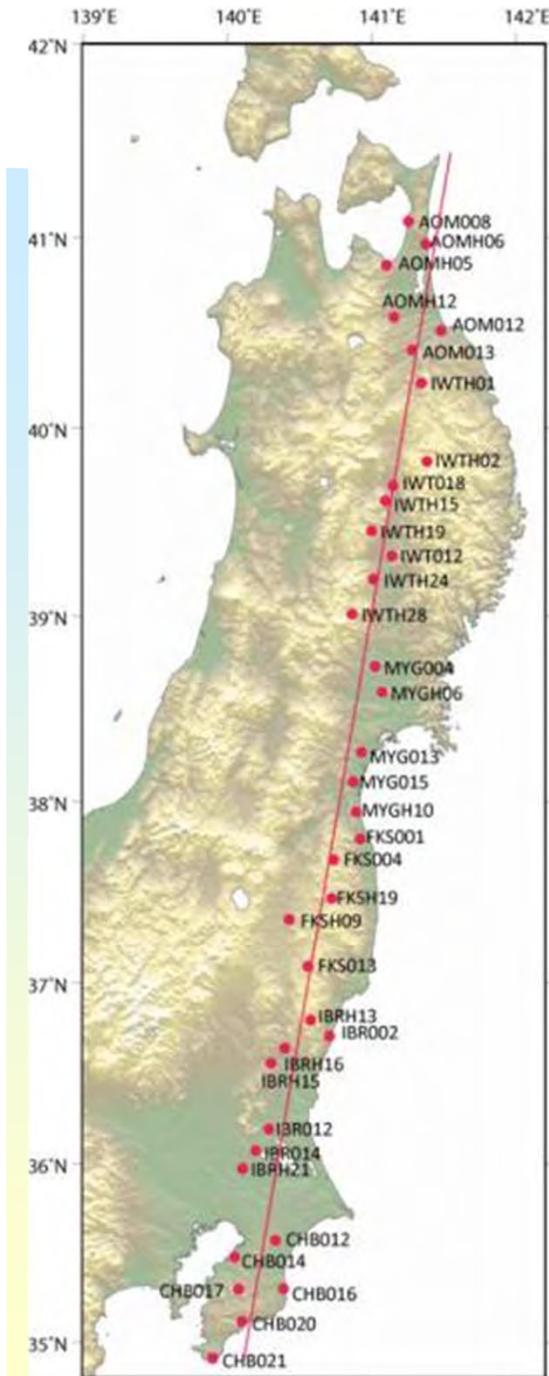


K-NET/KiK-net acceleration (EW) for the 2011 Tohoku eq.
 Noguchi and Furumura (2011)



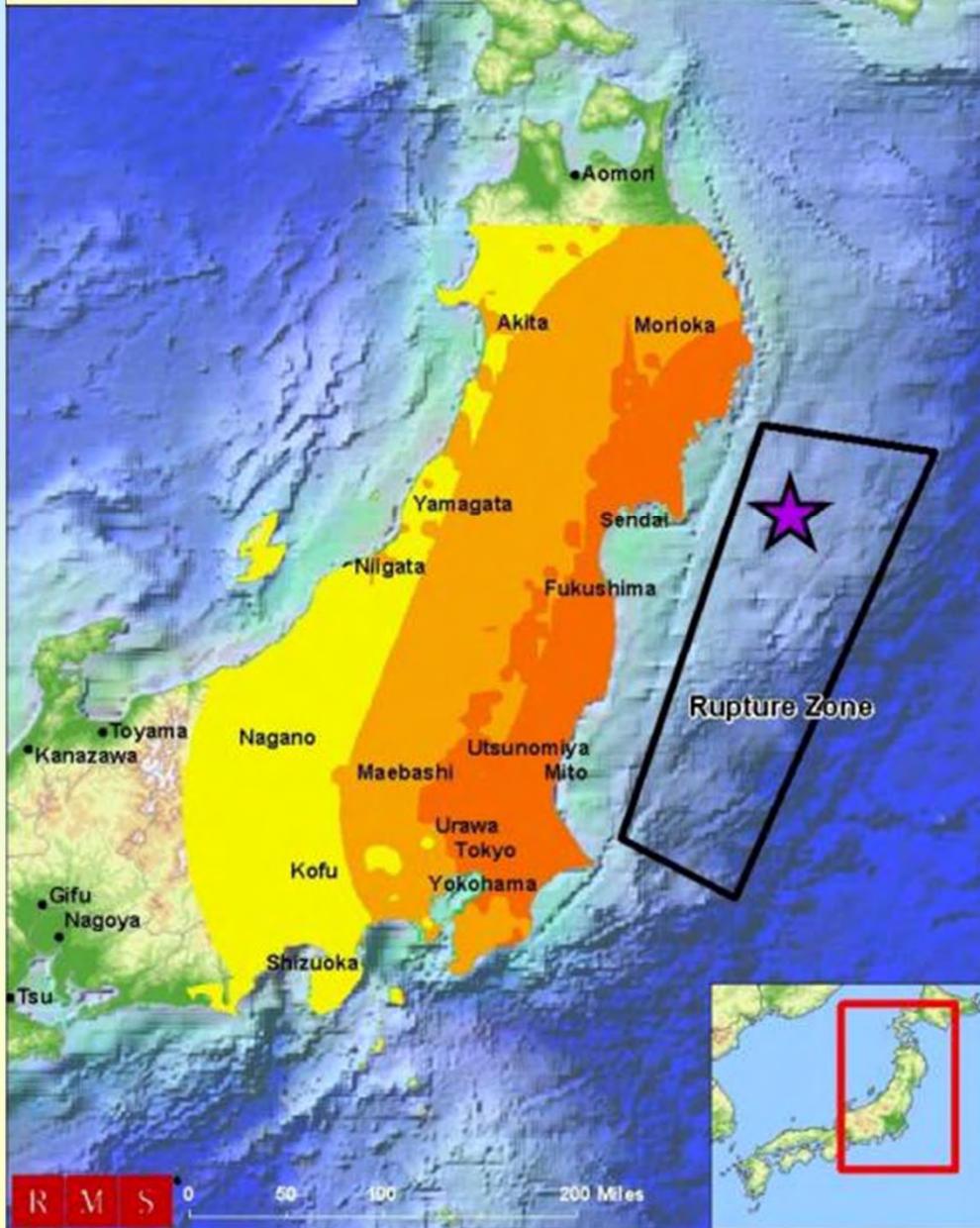
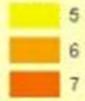
Plusieurs Chocs, expliquant la rupture de plusieurs segments

K-NET/KiK-net displacement (EW) for the 2011 Tohoku eq.
 Noguchi and Furumura (2011)



Honshu Earthquake Mw8.9

MMI Intensity



Un séisme monstrueux

comme celui de Sumatra (2004)

Mieux construire pour mieux protéger

The detected acceleration at Fukushima Daiichi/Daini sites(draft)

Comparison between detected value and design basis value

Place		Detected maximum acceleration value (Gal) (Tentative estimate)			Design basis acceleration value(Gal)=>(see (d))			
		N-S	E-W	Vertical	N-S	E-W	Vertical	
Daiichi	Foundation of reactor building	Unit1	(c)	(c)	(c)	487	489	412
		Unit2	(c)	(c)	(c)	441	438	420
		Unit3	507 (a)		231 (a)	449	441	429
		Unit4	319 (a)		200 (a)	447	445	422
		Unit5	(c)	(c)	(c)	452	452	427
		Unit6	290 (b)	431 (b)	244 (b)	445	448	415
Daini	Foundation of reactor building	Unit1	251 (b)	230 (b)	186 (b)	434	434	512
		Unit2	221 (b)	196 (b)	232 (b)	428	429	504
		Unit3	277 (b)	216 (b)	209 (b)	428	430	504
		Unit4	210 (b)	205 (b)	288 (b)	415	415	504

(a) detail analysis on going (b) data missing partially (c) data not obtained yet

$$100 \text{ (Gal)} = 1 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

(d) Design basis acceleration

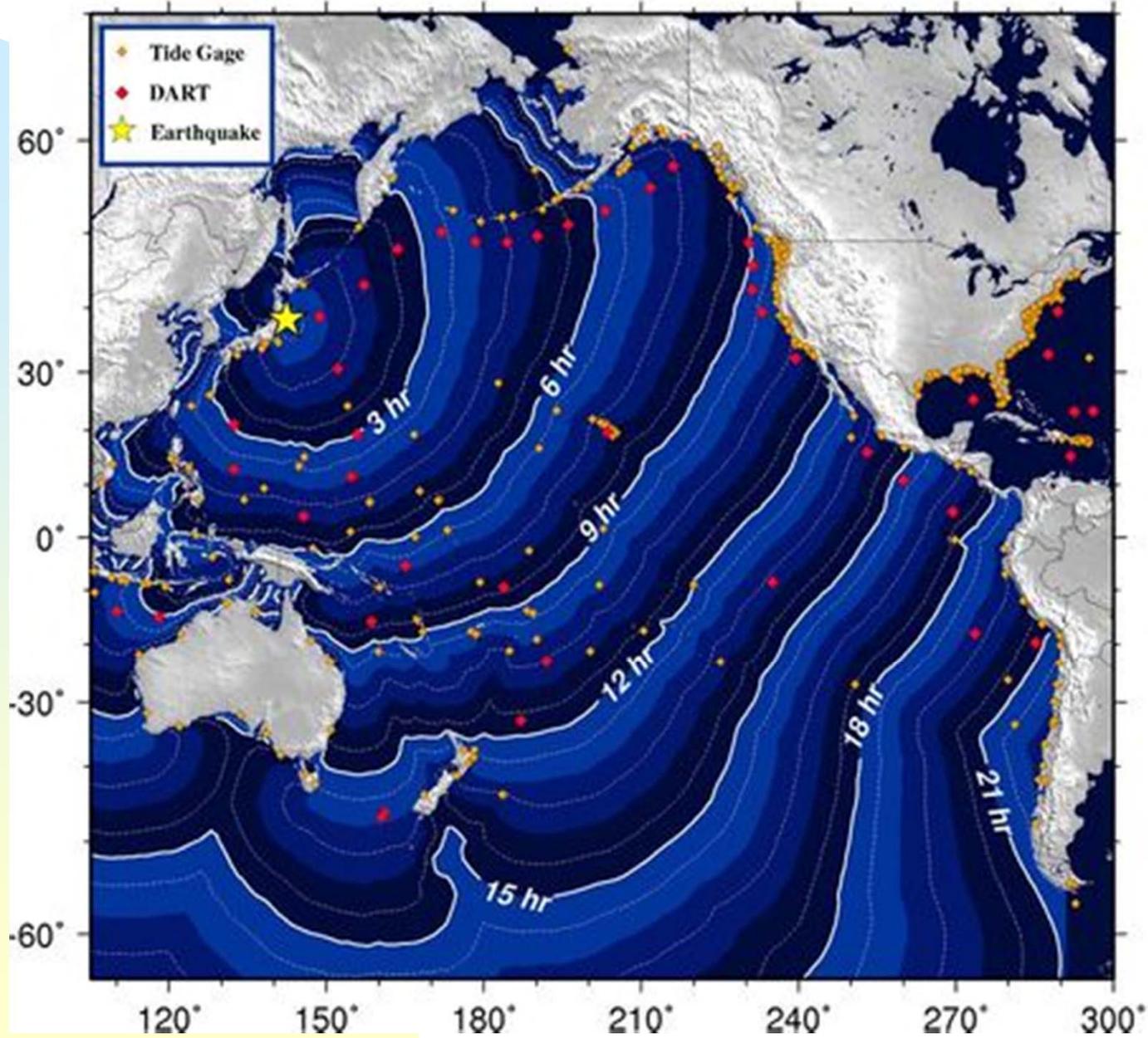
This vibration data is the input data (not the withstand limit) that is necessary to be taken into account for seismic analysis according to the guideline.

Plants safety was confirmed by numerical analysis with the input data. (with some margin)

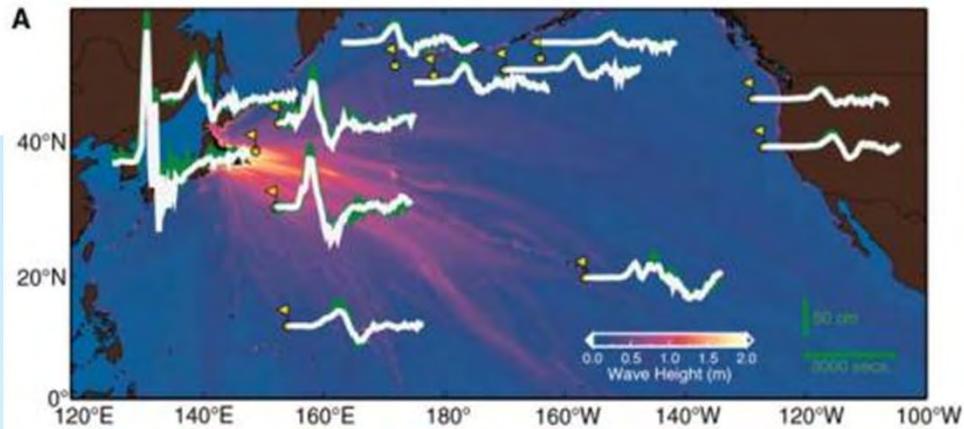
Vibrations sismiques

- Très fortes (>1g en de nombreux points)
- Très longues durées ... plus de 2 minutes !
- Sur une zone très grande
(500 kmx300km ... voire plus)

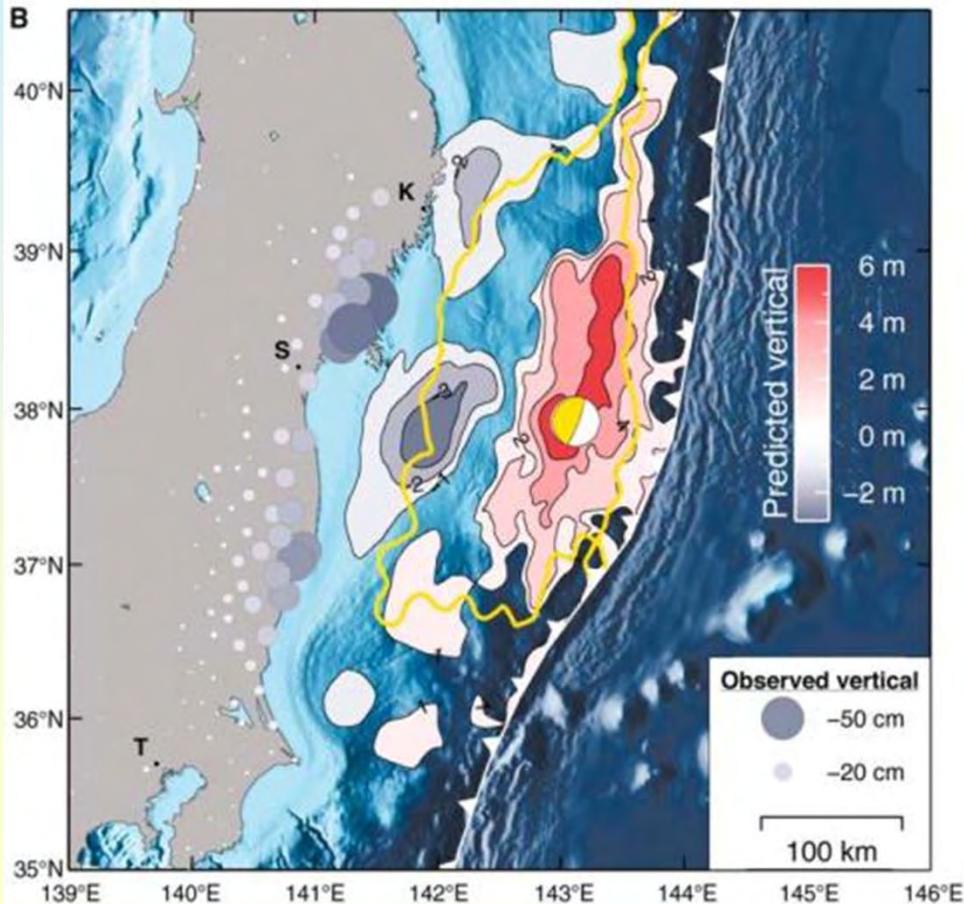
Tsunami Travel Times



Alerte
Précoce



Données (en vert) et prédictions (en blanc)
 Pour les enregistrements en océan profond
 Pour le tsunami déclenché par le
 Séisme de Tohoku-Oki



Modèle de déplacement vertical du fond
 marin déclenchant la vague tsunami

M Simons et al. Science
 2011;332:1421-1425



Tableau II Les plus gros tsunamis des trois derniers siècles

Séisme	Victimes	Année	Magnitude
Sumatra	226.000	2004	9.3
Lisbonne	60.000	1755	8.5
Mer de Chine	40.000	1782	7.0
Tokai-Nakai, Japon	30.000	1707	8.4
Sanriku, Japon	26.030	1868	8.5
Arica, Chile	25.674	1868	8.5
Kyushu, Japon	15.030	1792	6.4
Ryuku, Japon	13.466	1771	7.4
Philippines	10.000	1976	7.6

Source : National geophysical data center, NOAA, US

1946 à Hawaii – 2004 en Thaïlande



Qu'avons-nous appris
depuis Sumatra (2004) ?

**Ca. 300000
fatalities!**

**Hundred thousands
of destroyed
houses!**

**Several
million people
homeless!**

26. Dec. 2004

The Day
That Has Changed Our Thinking!



Effets du séisme du Japon

- Des bâtiments qui résistent plutôt bien aux vibrations du fait des marges liées à la qualité des normes parasismiques
- Des digues trop petites
- Des réseaux (eau, électricité) difficiles à réparer du fait de l'extension des dommages

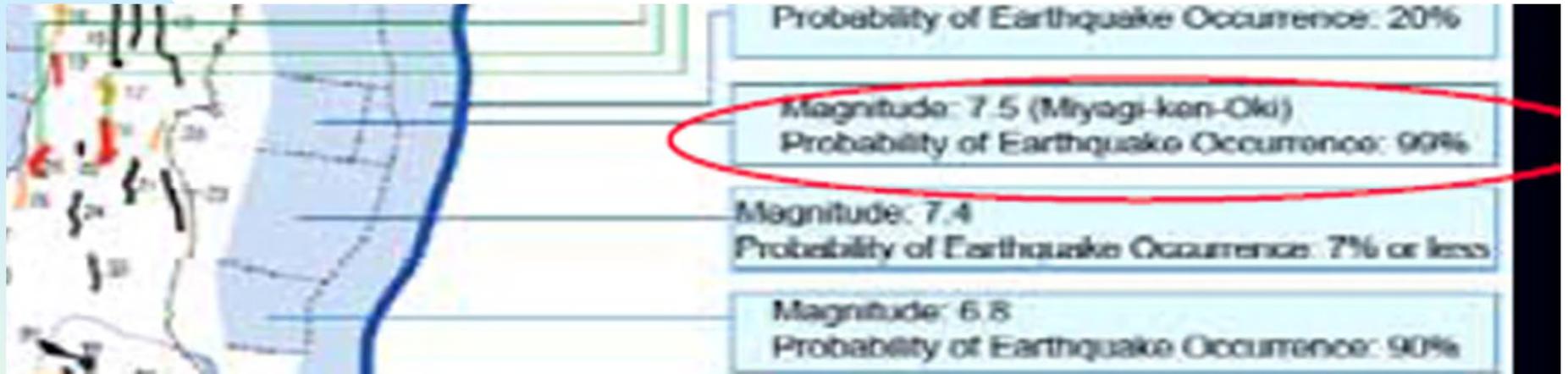
Bilan Séisme Tohoku (2011)

- Accélération horizontale légèrement dépassée
- Durée du mouvement (150-200 sec)
- Séisme de magnitude 9 non prévu
- Séisme de magnitude 8.4 prévu (7.5 avant)
le confinement devait être assuré car les centrales nucléaires doivent résister à un 9.4
- Arrêt de la centrale : suite aux secousses sismiques, elle fut sous contrôle lors du séisme de Tohoku (2011) (barres d'arrêt enclenchées) ... mais nécessité de refroidir ...
- Quête pour une meilleure estimation (probabiliste ou déterministe) des séismes de référence

Le risque zéro: une chimère

- Le risque zéro n'existe pas
- On doit toujours envisagé un accident possible et donc ses conséquences (secours des populations, zone irradiée interdite, impact environnemental)
- Les risques cumulés sont sous-estimés (Tempête Xynthia)

Le Japon: le pays le mieux préparé?



D'après Earthquake Research Committee of Japan ERCJ

D'après H. Fujiwara (NIED)

Six segments qui n'en ont fait qu'un lors du séisme de Tohoku (2011)

Une constante ré-évaluation ... scientifique

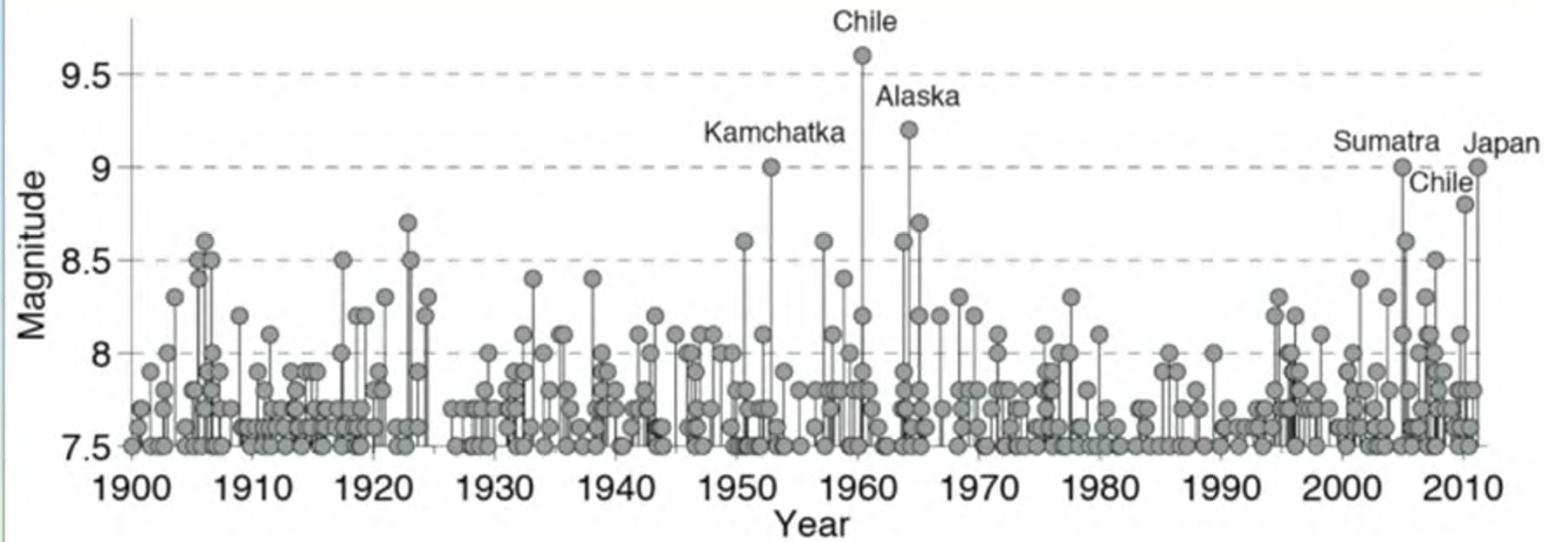
HERP 2004 : augmentation de l'ampleur d'une magnitude 7.5 à 8.4

NSC 2006 : actualisation des accélérations horizontales suite à KOBE (1995)



Quels scénarii étaient prévus ?

A History Of Large Earthquakes

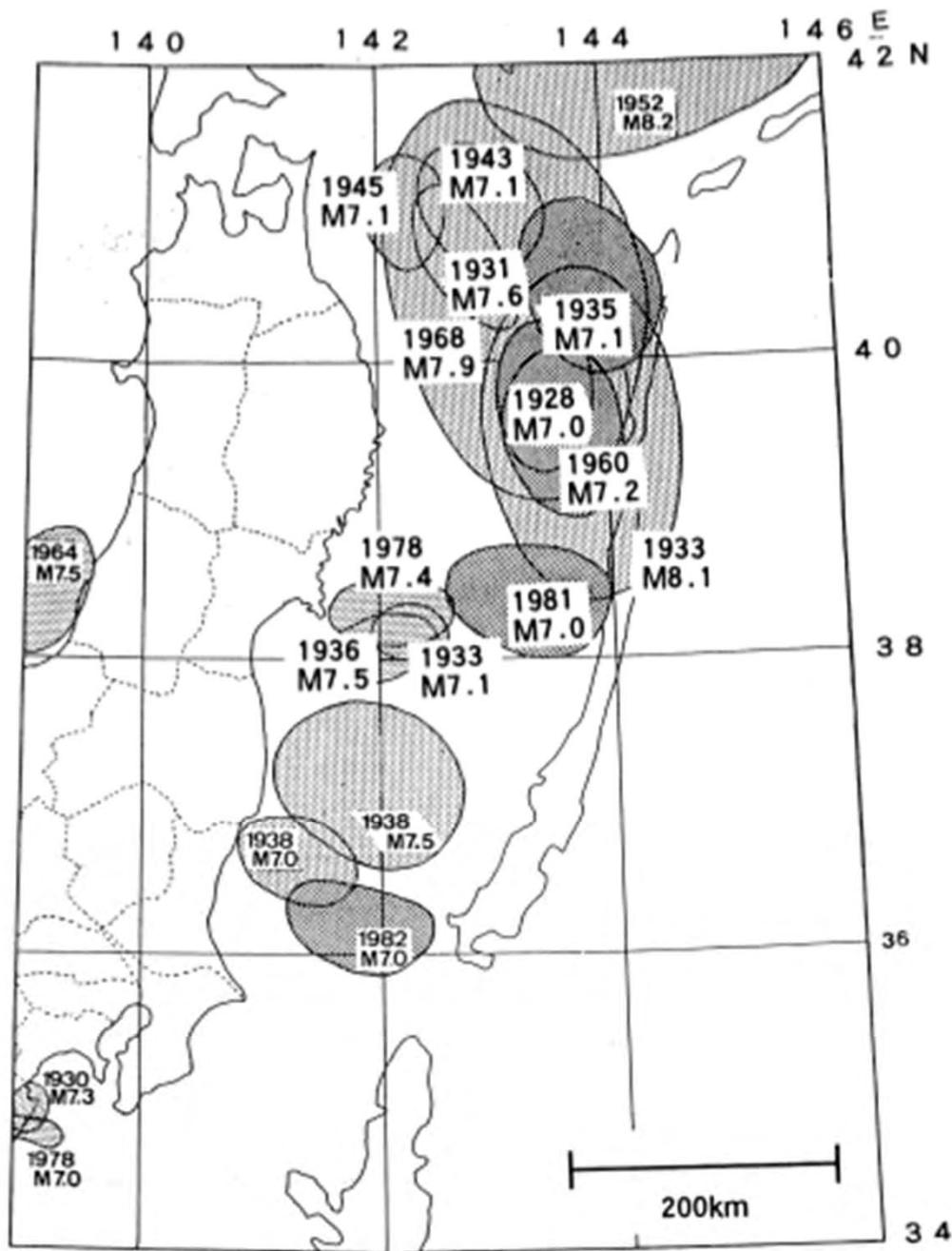


Data: USGS PAGERCAT 1900-2008, USGS-NEIC & gCMT 2008-present

Figure courtesy of Charles Ammon, after Ammon et al., SRL, 2010

L'activité sismique est constante au cours du temps

1926-1982

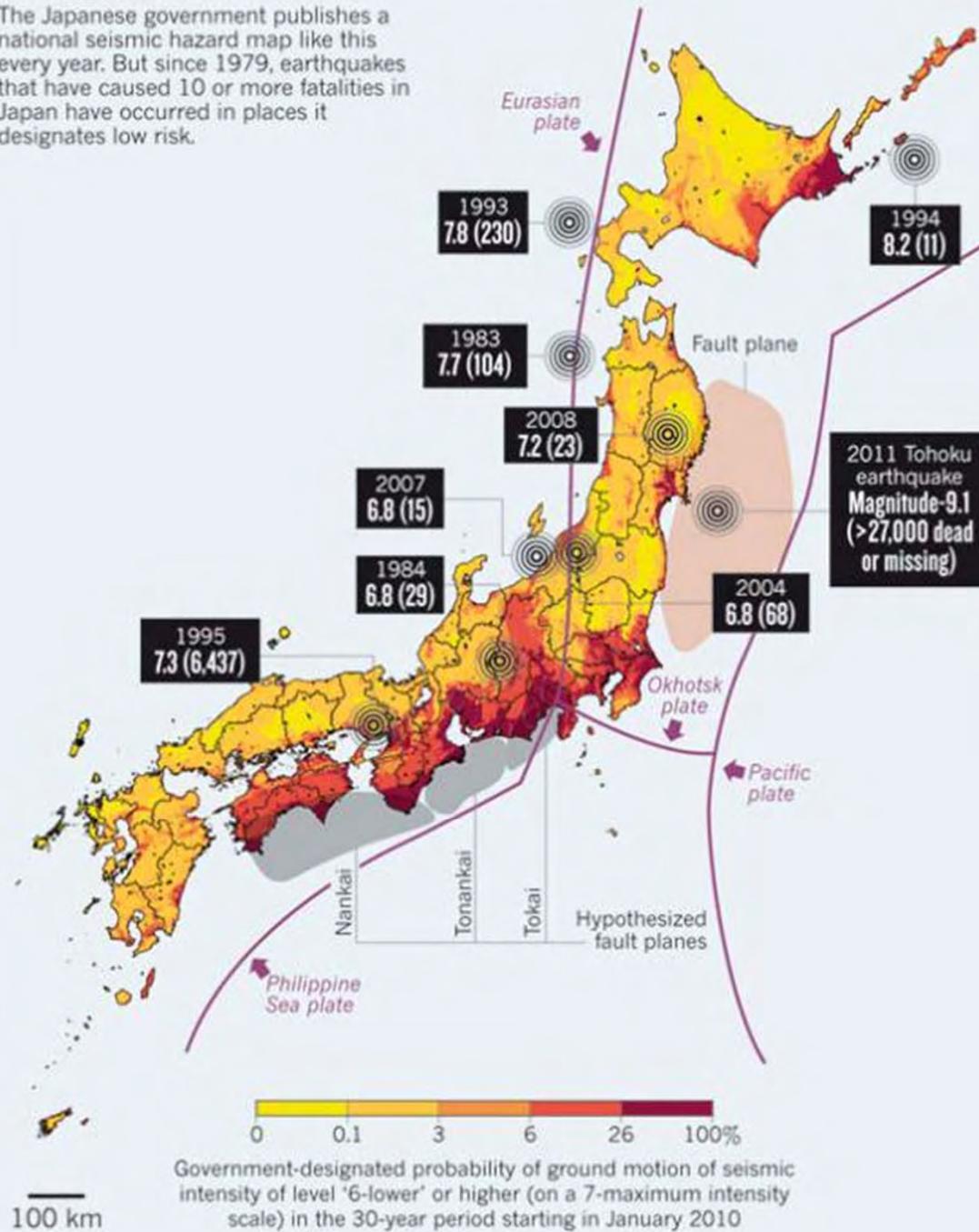


Les forts séismes tsunamigènes ($M > 8$ étaient surtout connus au nord de Sendai)

Les scénarii près de Fukushima étaient construits pour des séismes de magnitude inférieure de 7.5 initialement à 8.4 en cours

REALITY CHECK

The Japanese government publishes a national seismic hazard map like this every year. But since 1979, earthquakes that have caused 10 or more fatalities in Japan have occurred in places it designates low risk.

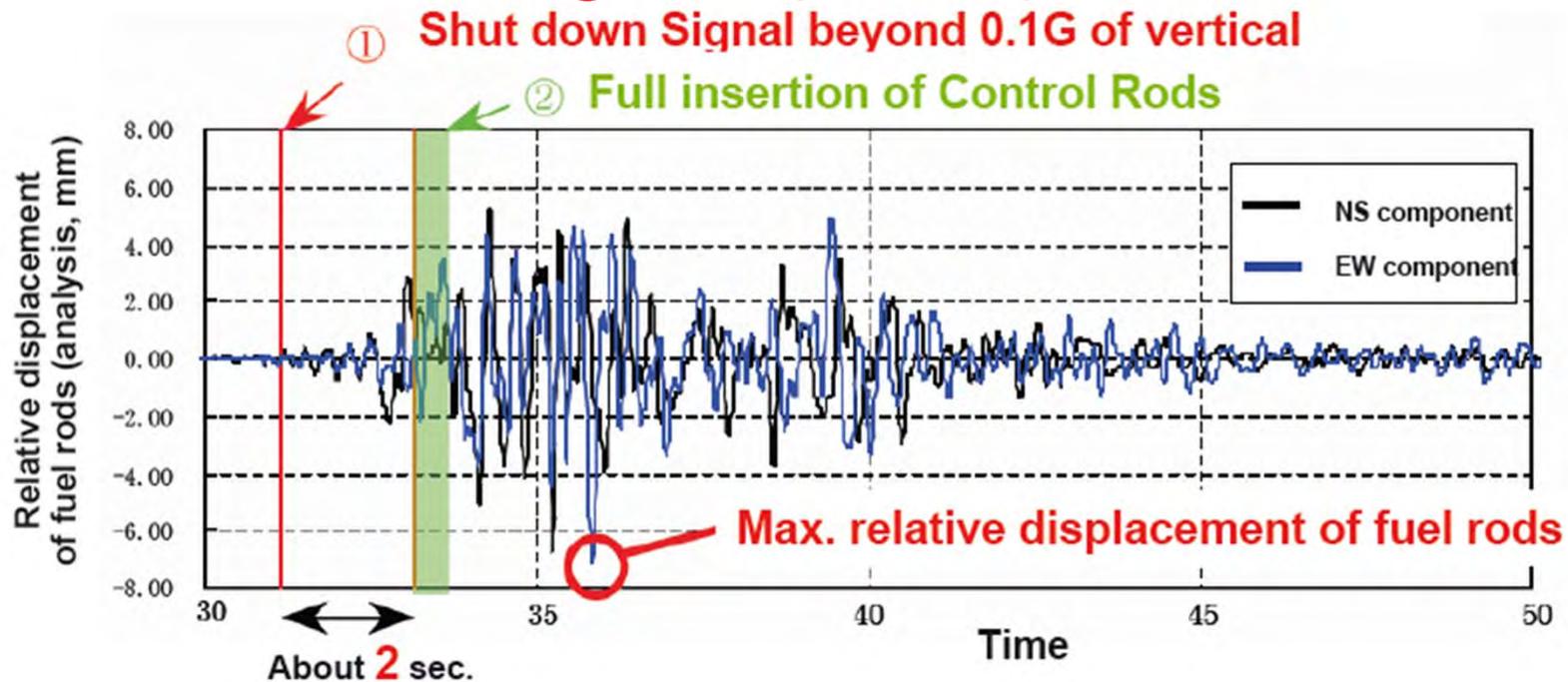


Geller,
Nature, 2011

Automatic shut down system is adopted in NPPs in Japan.

Working Group on the Operational Management and Evaluation of the Facilities Integrity

Séisme de Niigata (2007)



Insertion time evaluation of control rods for K-7

External power supply was continued from out of grid in the region, therefore emergency diesel generators did not start-up at the NCO earthquake,

After Y. Fukushima (2010)

NSC actualisation (2006)

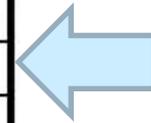
Nuclear Safety
commission



Japan Nuclear Energy Safety Organization

New Design Basis Ground Motions

Plant sites	Contributing earthquakes	New DBGM Ss *	Old DBGM S2
Tomari	Defuse seismicity	550 Gal	370 Gal
Onagawa	Soutei Miyagiken-oki (M8.2)	580	375
Higashidori	Defuse seismicity	450	375
Fukushima	Earthquake near the site (M7.1)	600	370
Tokai	Defuse seismicity	600	380
Hamaoka	Assumed Tokai (M8.0), etc.	800	600
Shika	Sasanami-oki Fault (M7.6)	600	490
Tsuruga	Urazoko-Uchiikemi Fault (M6.9), etc. → Mera-Kareizaki-Kaburagi	650→800**	532
Mihama	F (M7.8) C, Fo-A Fault (M6.9)→B-Fault(M7.7)	600→750**	405
Ooi	C, Fo-A Fault (M6.9)→Fo-A+Fo-B (M7.4)	600→700**	405
Takahama	Fo-A Fault (M6.9)	550	370
Shimane	Shinji Fault (M7.1)	600	456
Ikata	Median Tectonic Line (M7.6)	570	473
Genkai	Defuse seismicity	500	370
Sendai	Defuse seismicity	540	372
Kashiwazaki-Kariwa	F-B Fault (M7.0), expanded NCO Nagaoka-plain-west Fault (M8.1)	2300 (#1 side) 1209 (#5 side)	450



After Y. Fukushima (2010)

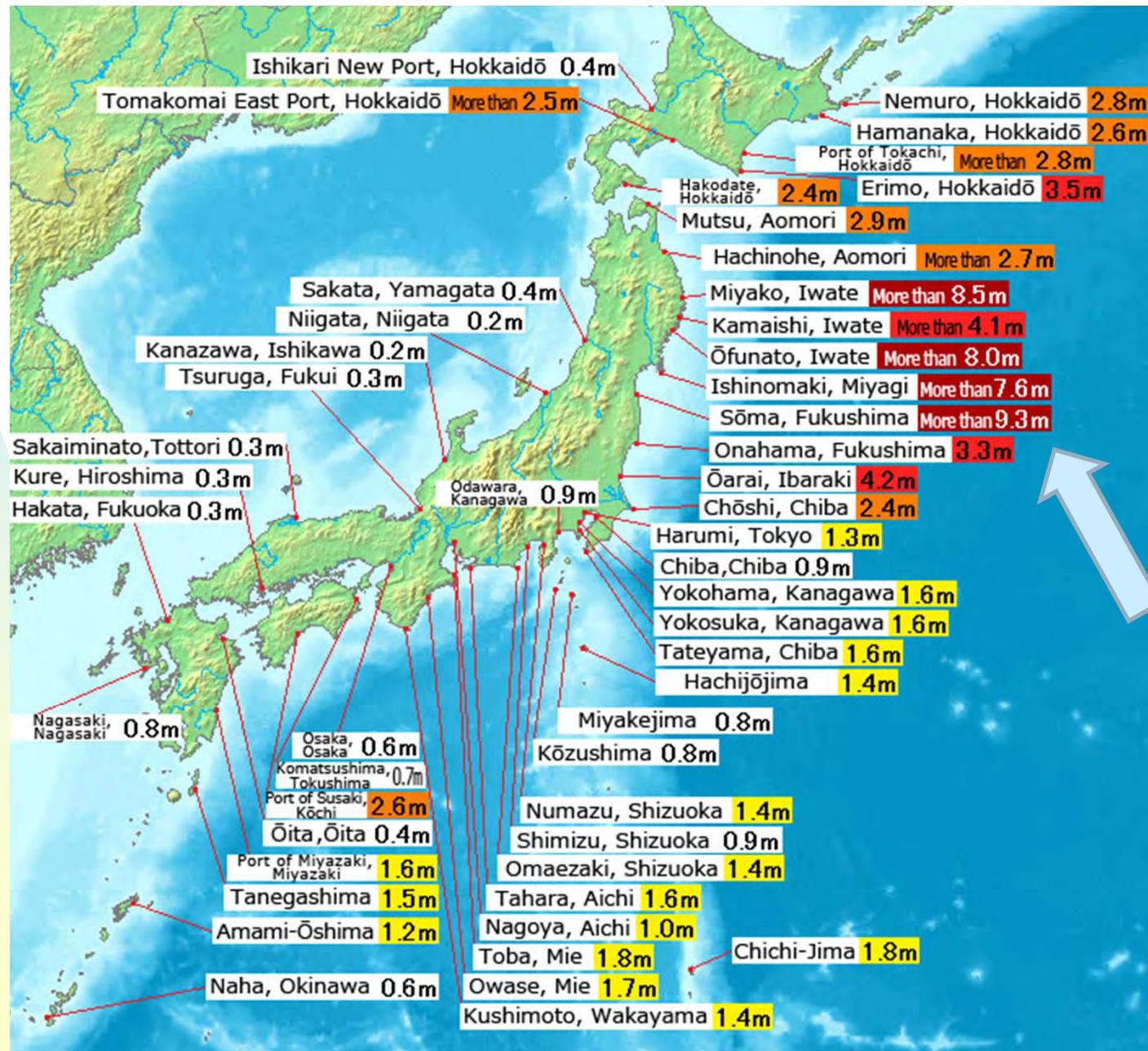
Note: * Black : Ss by interim report (March 2008).
** Red : still under examination (29 June 2009)

Les hauteurs de vagues (tsunami)

Centrales
construites pour
résister à des
vagues de 6
mètres

Vagues de
tsunami jusqu'à 14
m

Risque
totalement sous-
estimé et
pourtant ...



Tsunami analysis 2001

Journal of Natural Disaster Science, Volume 23, Number 2, 2001, pp83-88

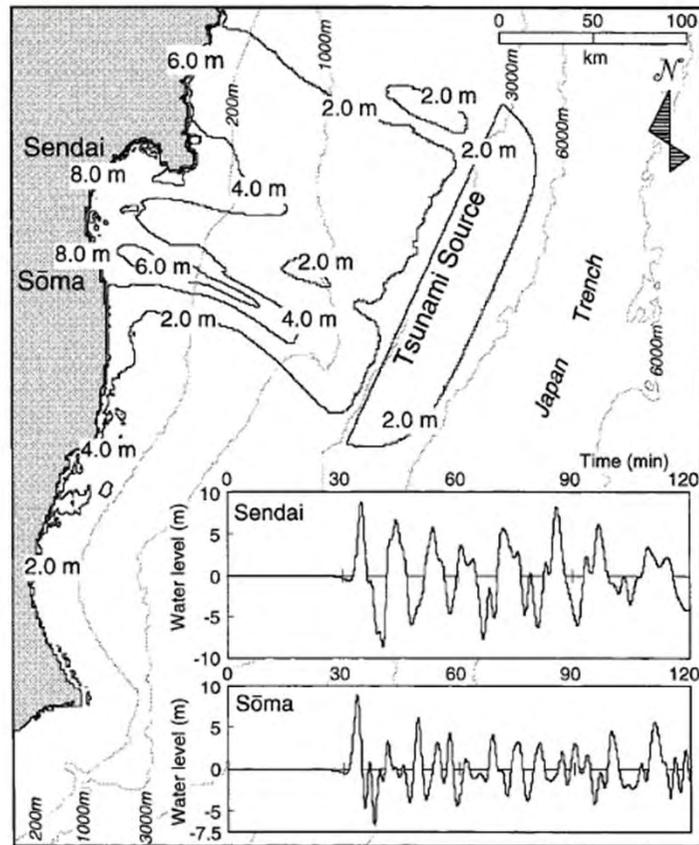


Fig. 3 Results of the numerical simulation of the Jōgan tsunami. Based on historical documents and proposed fault parameters of the Jōgan tsunami (Satō, 1989), a model of the tsunami source was established. The computational region covers the area 37°N to 39°N and 143°E to 144°30'E. An interval of 2 s and spatial grid size of 1 km were used. The simulation covers wave propagation for 5 hours. The maximum water-elevation contours and the time history of the water levels at Sendai and Sōma are shown for 2 hours. After 30 min, a tsunami with waves 8 m high struck the Sendai plain. Thin dotted lines show submarine contours in meters of depth.



On July 2011, the location of the simulation is shown in 4 km scale. The scale invasion by old tsunami as recorded in the coastal sequences of the Sendai plain show about a 1000-year recurrence interval. We suggest that the Jōgan tsunami was much larger than tsunami generated by normal earthquakes in the subduction interface.

Information pas assez confirmée mais principe de précaution ...

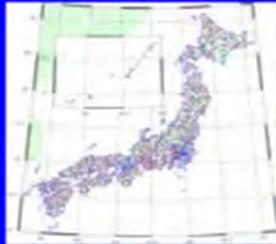
Une faillite

- Protection contre les tsunamis (scénario peu étudié)
- Et pourtant ... c'est plus facile ... car l'impact est sur la côte (ironie du sort !)
- Est-il sage de construire des centrales juste en bord de mer ?
- Est-il sage que les **deux** diesels de secours ne puissent pas fonctionner en situation extrême ?

Une vision hachée

Seismic Hazard Information Station

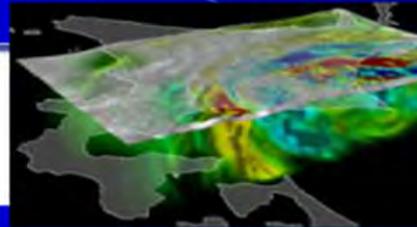
Strong-motion Monitoring



+



Strong-motion simulator



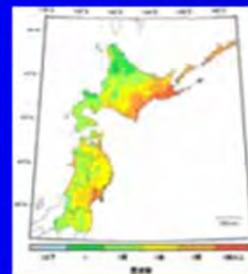
+

Integrated Geological Information System

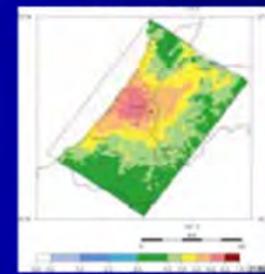


Seismic Hazard Station

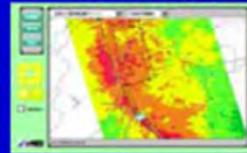
Probabilistic



Scenario



Publication



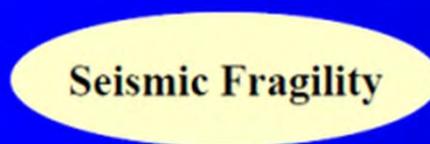
University Research



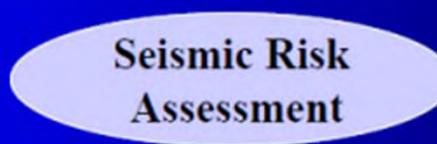
Local government Hazard Assessment



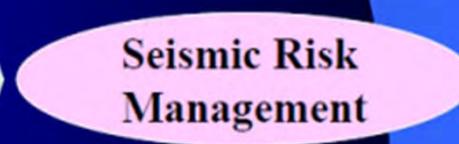
Seismic Fragility



Seismic Risk Assessment



Seismic Risk Management



Une trop grande complexité

JNES

NISA

NSC

ERCJ

HERP

NIED



Japan Nuclear Energy Safety Organization

Seismic Safety Regulation System in Japan

International Atomic Energy Agency

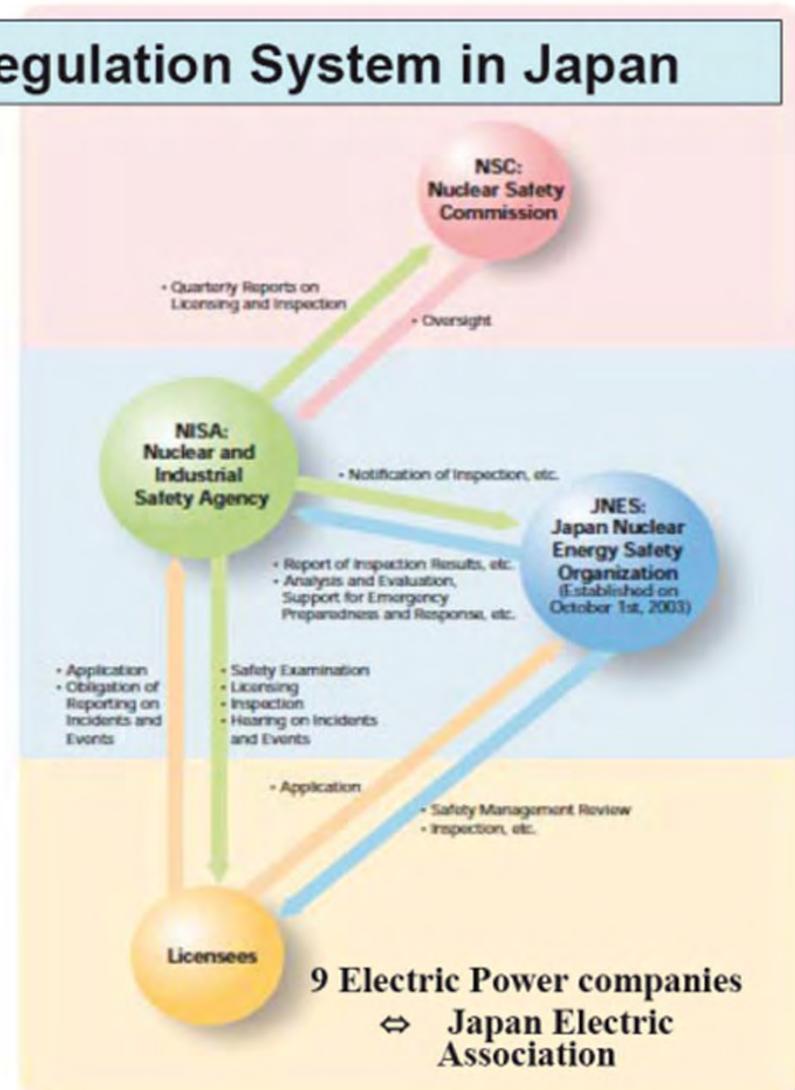
Following Reviewing

IAEA
(ISSC)



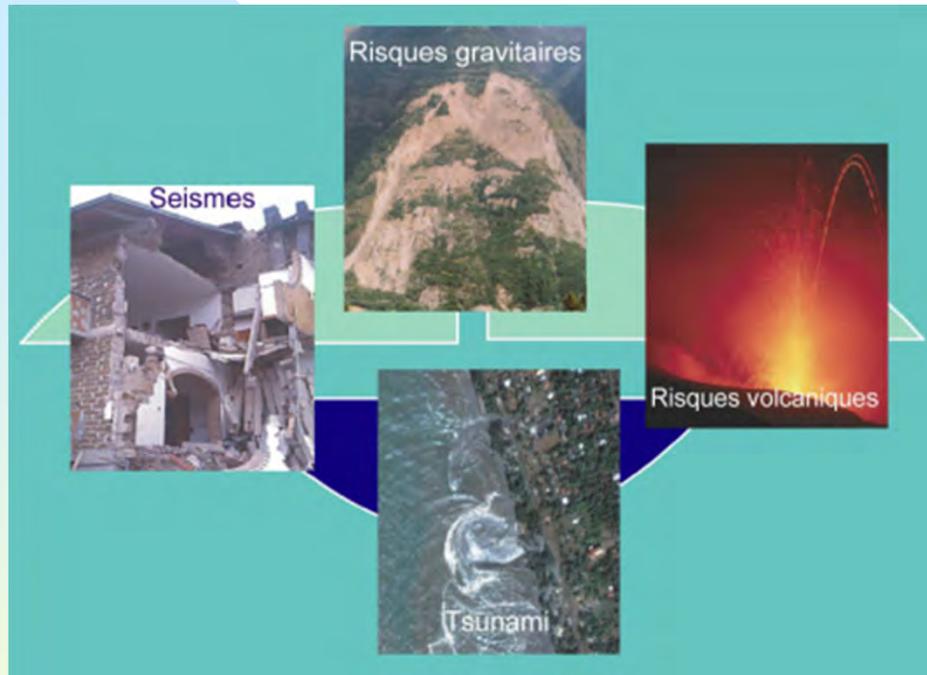
Lesson learned

Joint closely!



After Y. Fukushima (2010)

Multi-risques: prise en compte ?



- Les risques cumulés – séismes; glissements de terrain; éruptions volcaniques; tsunamis
- La tempête XYNTHIA comme exemple type
- Le séisme Tohoku (séisme et tsunami ... pas de glissement de terrain)

Aussi en France : séisme & glissement sous-marin en Mer Ligure

Une information dense au Japon

- Une fenêtre d'observation importante (100-1000 ans)
- Un effort sans précédent de recherche et d'observation (réseau Hi-Net)

mais

- Un schéma trop compartimenté des structures en charge des risques ...
- Un temps de latence trop important entre découvertes et mises en application des dispositions/réglementations
- Une vision trop spécialisée

Règles ou normes évolutives

- Evolution de l'état des connaissances
 - ◆ Le soutien à la recherche scientifique
- Prise en compte des nouvelles connaissances et informations
 - ◆ La veille technologique de structures/autorités de contrôle – implication des scientifiques
- Adaptation du design (changement des normes)
 - ◆ Un cycle qui doit être court et réactif...

Rôle des différents acteurs

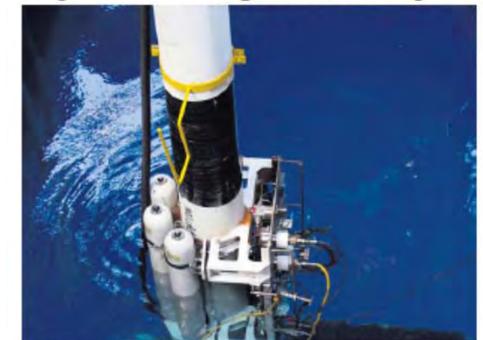
- **Scientifiques** : une implication forte aux différents niveaux et pas seulement en amont pour la R&D.
- **Politiques** : une prise de conscience de la nécessité d'être entourés de scientifiques indépendants.
- **Sociétés privées** : soutien à la recherche en amont via des impôts ciblés pour assurer l'indépendance et réactivité forte pour évolution rapide (comme en Californie !)
- **Structures de surveillance**: autorités indépendantes

Quel modèle économique ?

Les catastrophes naturelles: pas de richesses attendues

- « Business plan » comme pour les entreprises privées
- Rentabilité et profits (Deep water-BP; Fukushima-Tepco)
- Structures indépendantes de contrôle
- Rôle de la puissance politique au-delà d'un modèle économique strict.
- Implication des scientifiques dans les structures de contrôle
- Veille technologique et scientifique

Marée noire
Un nouvel entonnoir pour la fuite
de pétrole dans le golfe du Mexique



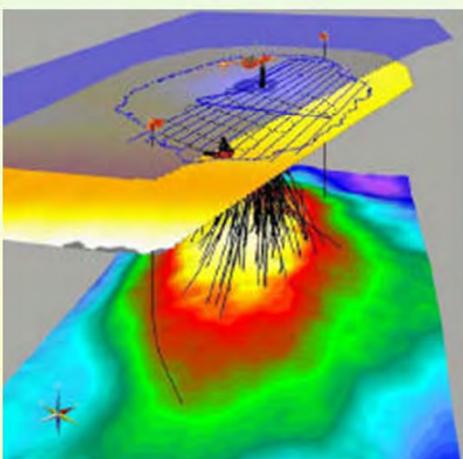
Un exemple d'un modèle économique

Enjeu économique

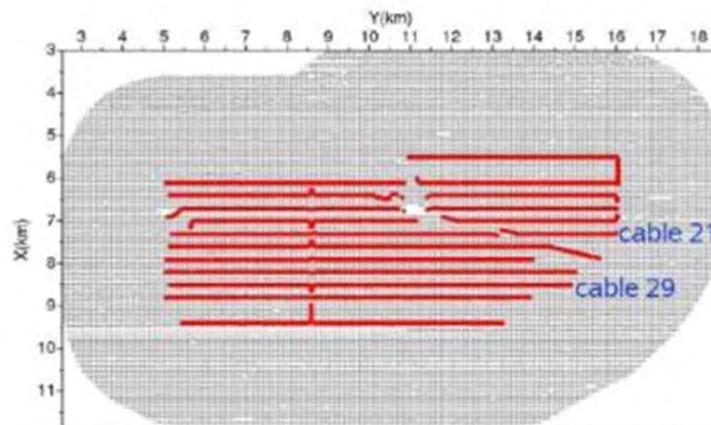


Valhall, Mer du Nord

Imagerie Haute Résolution

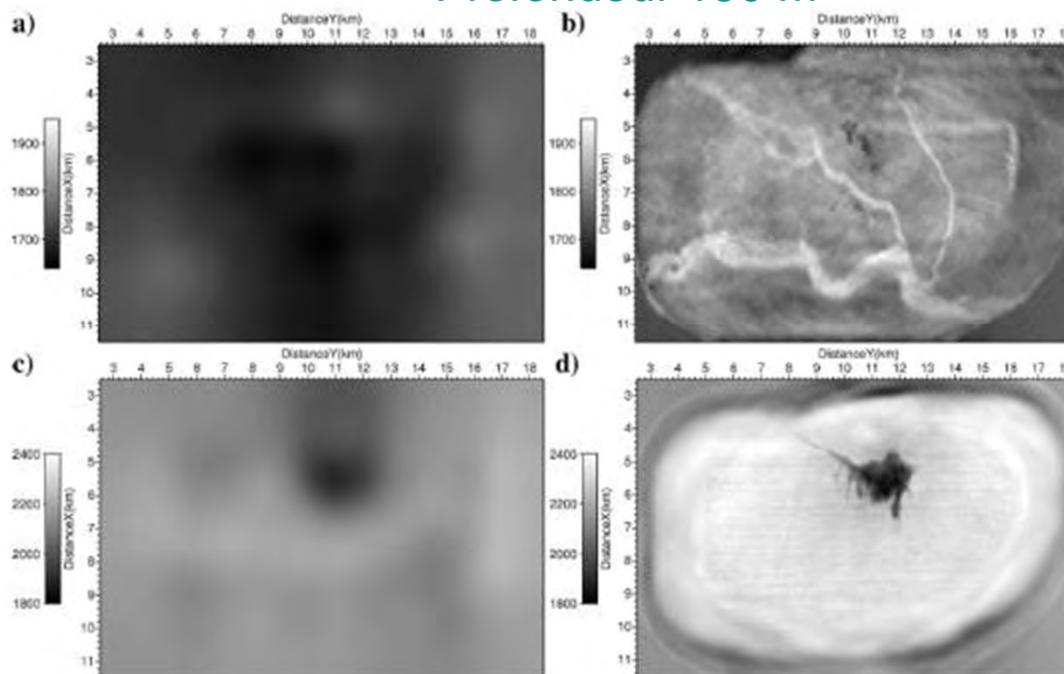


(Courtesy Laurent Sirgue BP)



Un effort d'acquisition sans précédent disponible pour les scientifiques
55000 tirs
(autres cibles 130000 tirs)

Profondeur 150 m



avant

Profondeur 1 km

après

Veille scientifique et technologique

- **Domaine scientifique** : avancée des connaissances vers la publication
- **« Domaine de la valorisation »** : Segment manquant (?) Au niveau national (qui !) et au niveau régional PARN en Rhône-Alpes; ARGAL en PACA ... mais initiatives bien timides et bien fragiles
- **Domaine politique (législatif-exécutif)**
- **Domaine opérationnel** : protection civile; entreprises, collectivités territoriales

La France un pays sous-équipé !

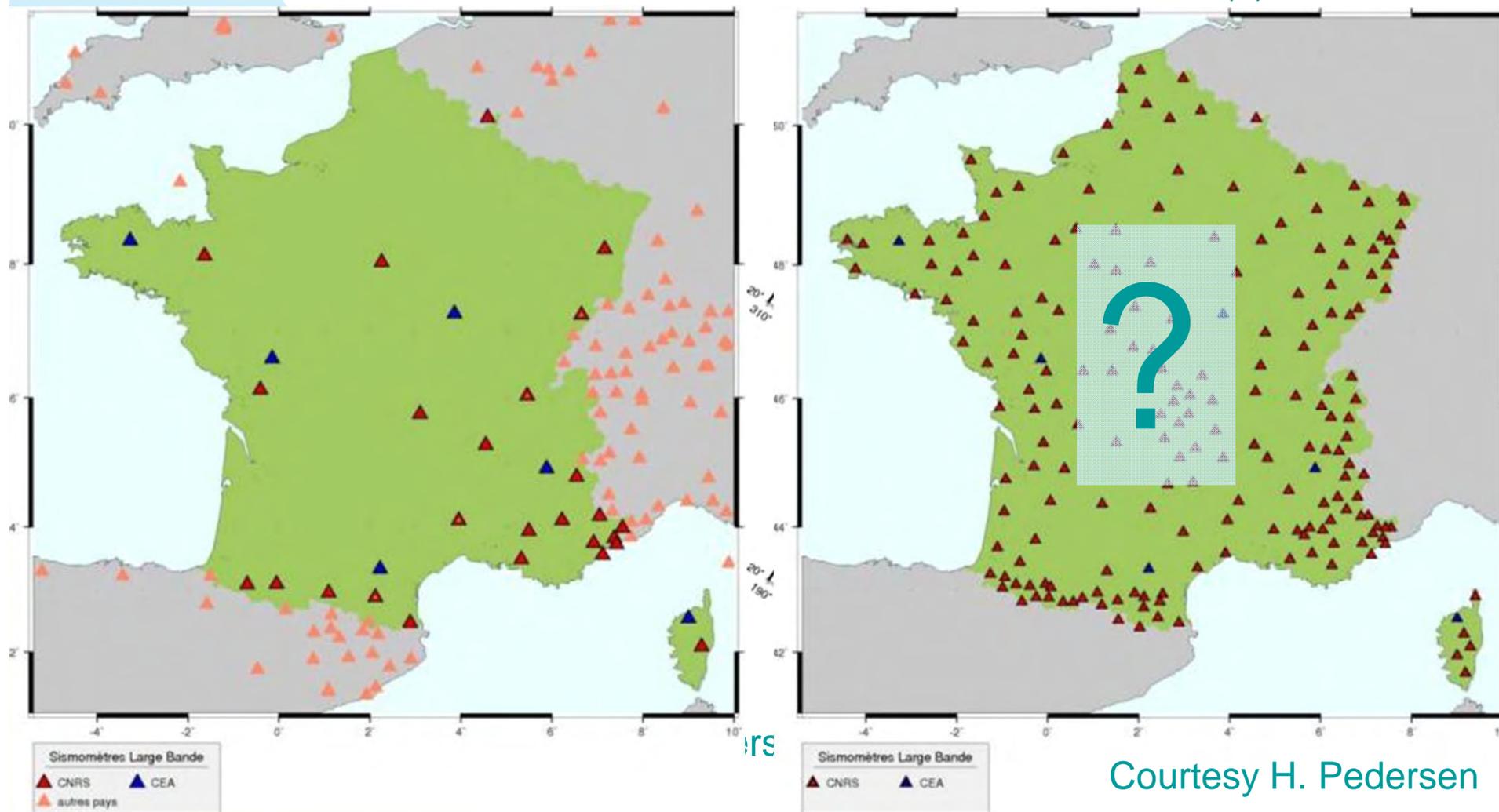
TGIR : RESIF dans la « ROADMAP » EPOS de l'UE

<http://www.resif.fr>

(INSU/CNRS)

PRESENT

FUTUR (?)



Courtesy H. Pedersen

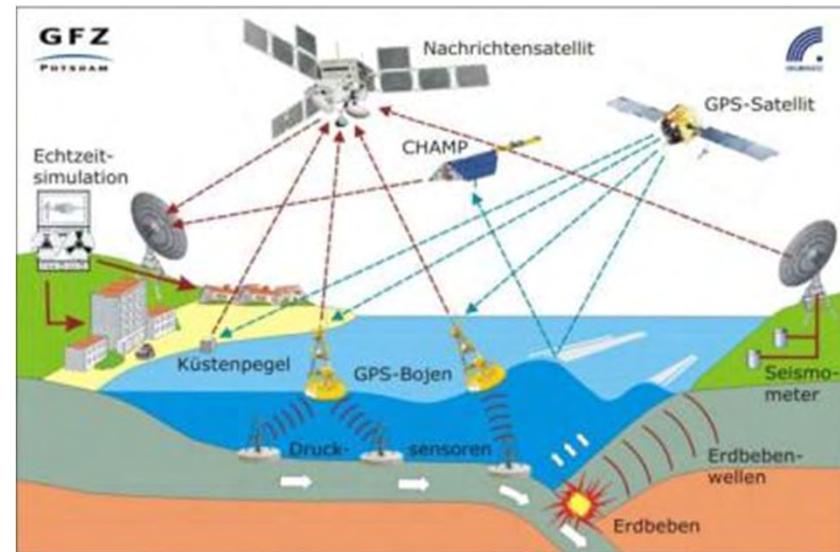
VERS UN OBSERVATOIRE VIRTUEL

- La mondialisation de l'observation
- Terre, Mer, Atmosphère et Espace

La qualité et la fiabilité des données passent par des réseaux denses connectés



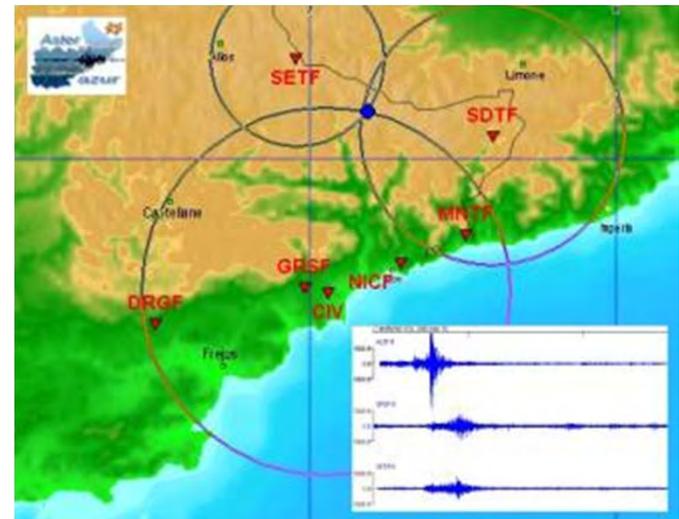
Courtesy M. Diament



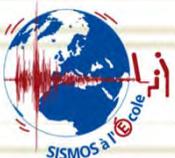
Courtesy J. Zschau

Pas de restriction de diffusion de l'information ?

Le projet



Un programme éducatif en milieu scolaire,
autour de la culture du risque majeur,
par une approche scientifique et technologique



Sophia-Antipolis – 16 mai 2007

Il nous faut mieux écouter la Terre
et les scientifiques qui l'étudient ...

MERCI de votre attention

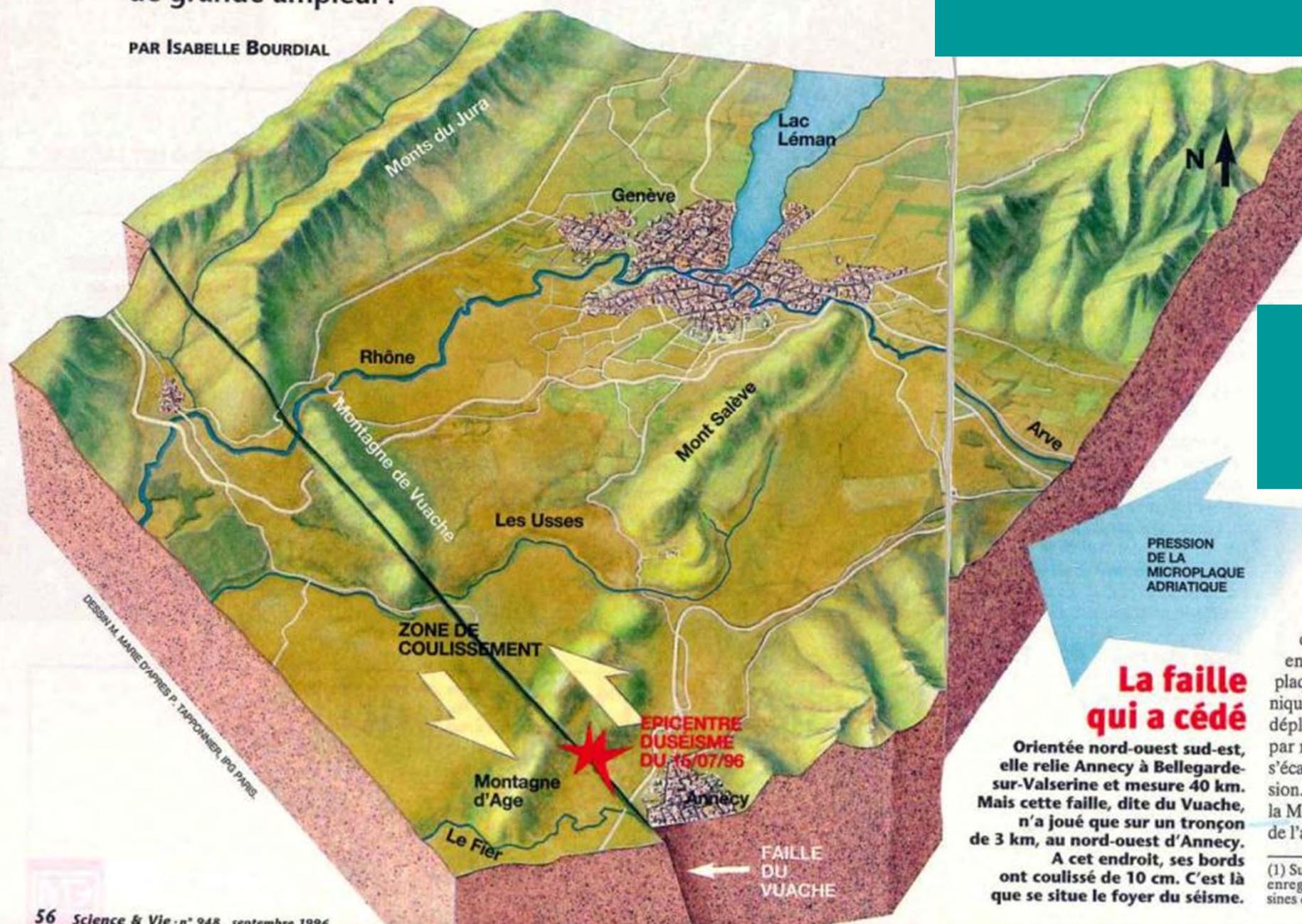
- 1. Preparation of seismic hazard maps based on surveys of active faults, long-term evaluations of the probability of earthquake occurrence, and evaluations of strong ground motion**
- 2. Promotion of real-time transmission of earthquake information**
- 3. Improvement of observation system for earthquake disaster prevention**
- 4. Promotion of observation and research for earthquake prediction**

Recommandation des sismologues japonais ...
avant le séisme de Tohoku (2011)

Séisme d'Annecy, M=5

de grande ampleur?

PAR ISABELLE BOURDIAL



La faille qui a cédé

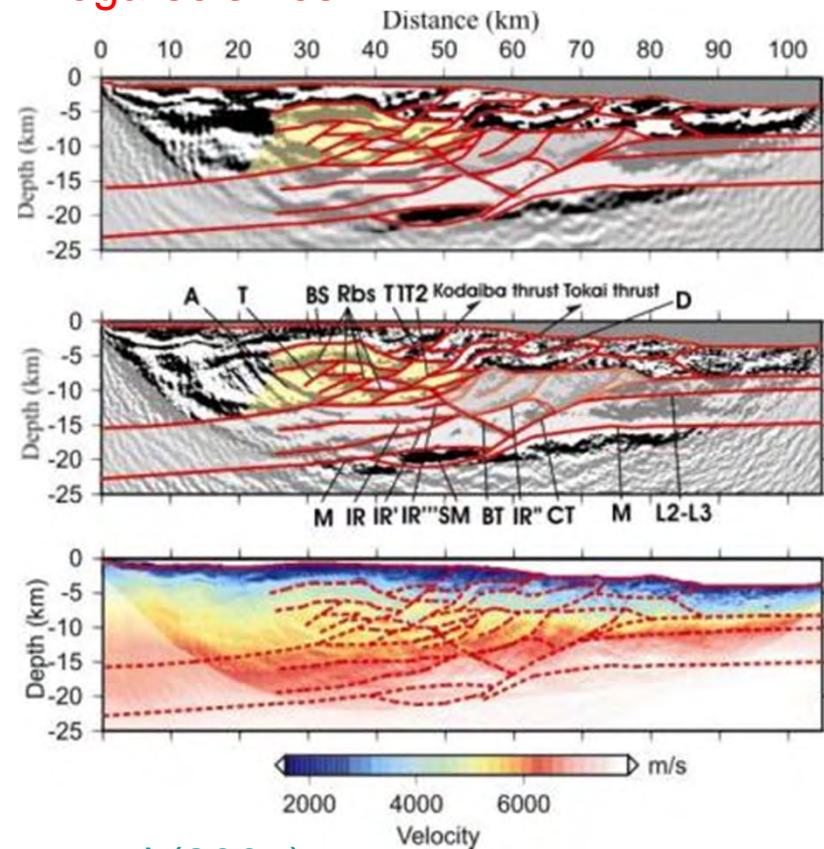
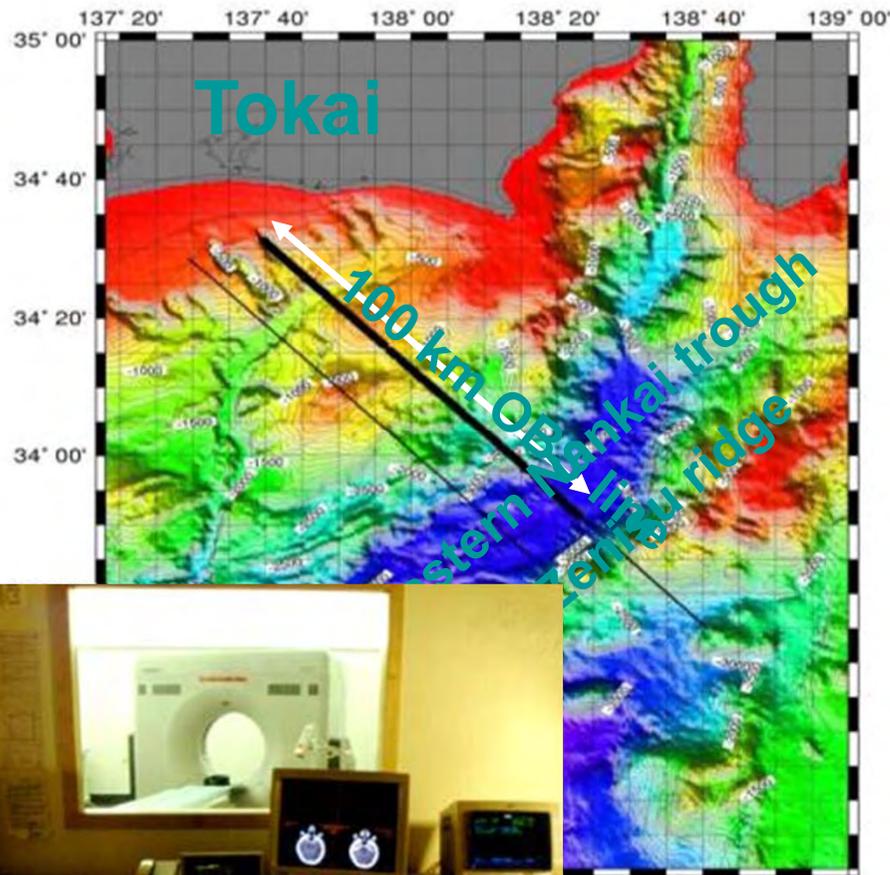
Orientée nord-ouest sud-est, elle relie Annecy à Bellegarde-sur-Valserine et mesure 40 km. Mais cette faille, dite du Vuache, n'a joué que sur un tronçon de 3 km, au nord-ouest d'Annecy. A cet endroit, ses bords ont coulé de 10 cm. C'est là que se situe le foyer du séisme.

(1) Sur enregistrements av sines de 8,5.

Un projet de recherche typique en amont

- The SFJ-OBS experiment – August 2001 –
 - RV Kayio (JAMSTEC – Japan – Chief-scientist: A. Nakanishi)

Une meilleure compréhension du contact entre plaques pour les futurs méga-séismes ...

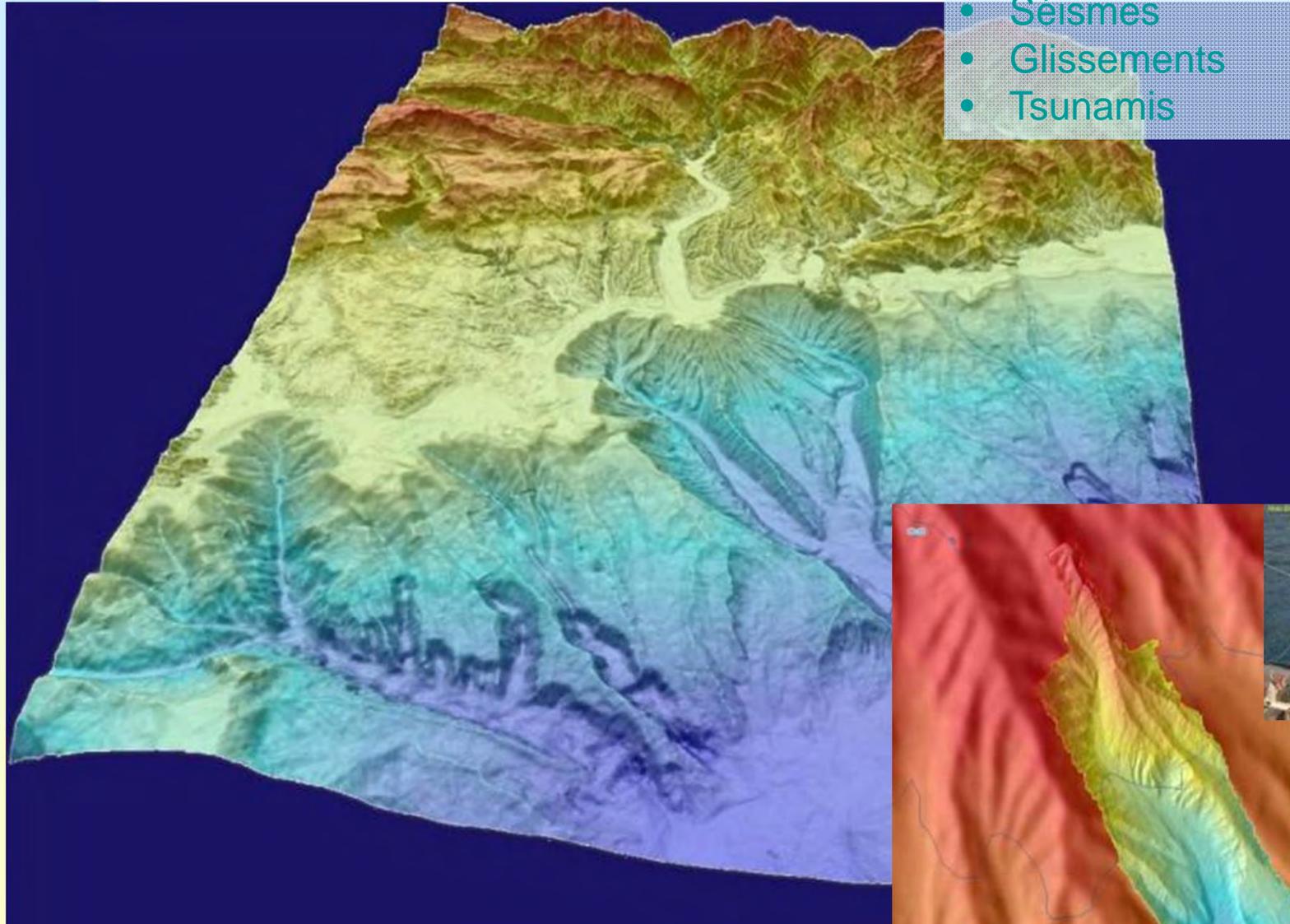


D'après Operto et al (2007)

La région niçoise

Risques couplés

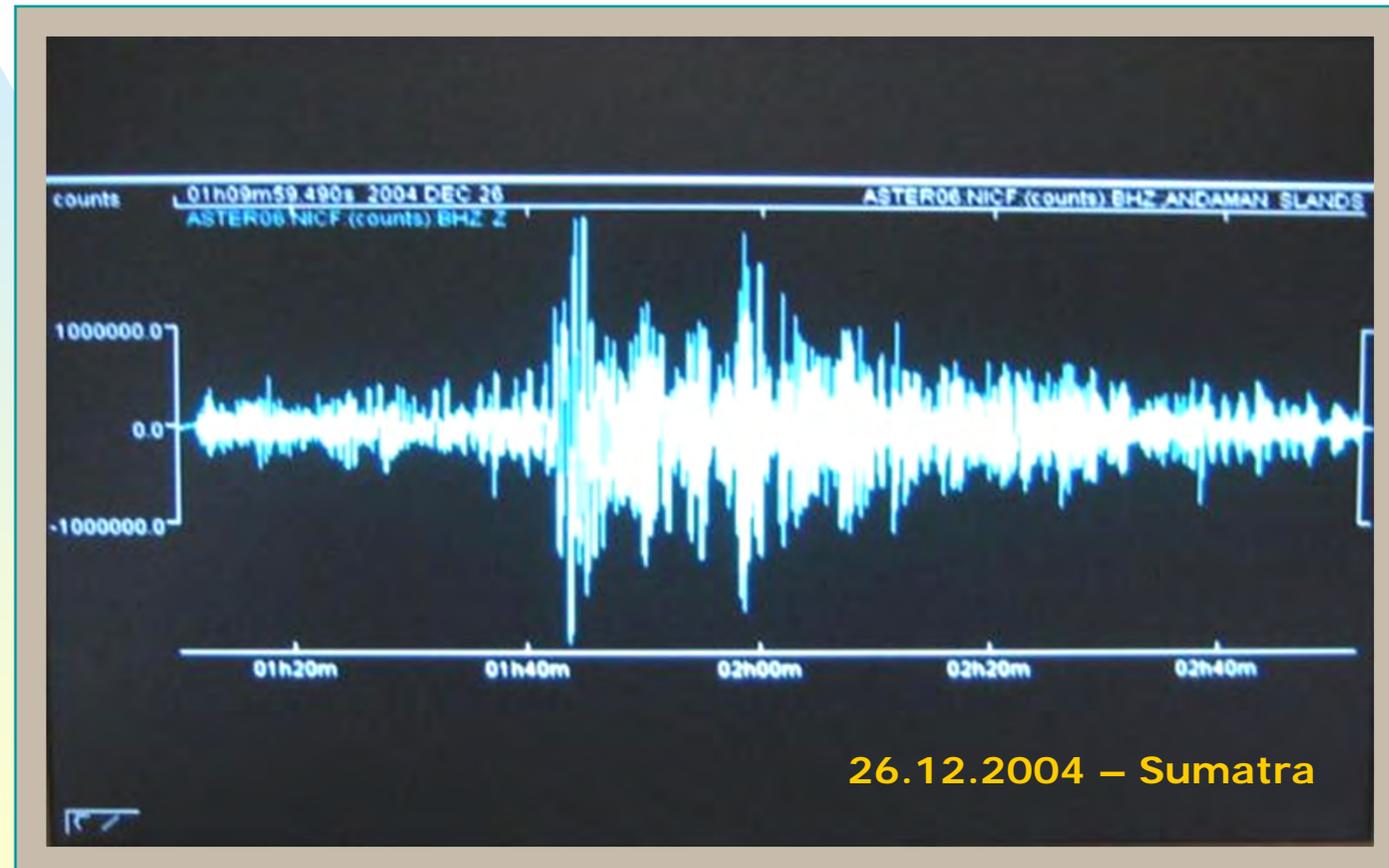
- Séismes
- Glissements
- Tsunamis



Le projet

... à l'écoute sismique de la Terre

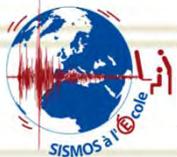
Les élèves enregistrent des séismes au quotidien.



Sophia-Antipolis – 16 mai 2007

de la culture scientifique à l'éducation au risque naturel

- ✓ **Promouvoir les sciences expérimentales et les nouvelles technologies à l'École.**
- ✓ Renforcer et développer les liens avec les partenaires régionaux et internationaux dans les domaines scientifiques, éducatifs et culturels.
- ✓ **Favoriser une prise de conscience rationnelle des problèmes liés à l'évaluation et la prévention des risques naturels.**
- ✓ Développer le sens de l'autonomie et de la responsabilité chez les jeunes à travers la gestion d'un projet.



Hauteur de la vague du Tsunami

- Magnitude 8 : 3-5 mètres
- Magnitude 9 : 9-15 mètres