Annexe 2 Pourquoi la magnitude maximum probable du séisme et du tsunami du 11 Mars 2011 ont été sous-estimées ?

Rolando Armijo Institut de physique du globe de Paris

Pour introduire le problème, on peut considérer le contexte géologique et morphologique concernant le site de Fukushima :

L'image 2 est une photo aérienne prise au moment de la construction du réacteur 6 sur la centrale de Fukushima Daiichi (vers 1980). On voit que la centrale a été construite dans une encoche sur un système de terrasses face à la mer (images 2 et 3).

Il y a un plateau à 40 mètres d'altitude (image 4), qui a été surcreusé jusqu'à environ + 30 mètres, pour loger une partie des installations. Mais la partie qui fait l'interface avec la mer, et qui accueille les réacteurs (réacteurs 1 à 4) et les turbines, est à moins de 10 mètres d'altitude. On peut voir sur la carte l'inondation produite par le Tsunami d'environ 10 à 12 mètres, selon l'analyse des images haute résolution (image 5). Mais on peut apprécier (sur l'image 6) que

l'analyse des images haute résolution (image 5). Mais on peut apprécier (sur l'image 6) que les réacteurs sont seulement à une altitude d'environ 6 à 7 mètres au dessus du niveau de la mer.

L'image 7 est la photo distribuée par Google Earth (image haute résolution Digital Globe) avant le séisme du 11 mars et le tsunami, et l'image 8 illustre le même secteur après le tsunami (image prise le 12 mars).

Sur l'image 9, on voit plus en détail la trace la plus distale du tsunami (marque au travers de la route et partie mouillée sur la falaise). L'inondation a dû atteindre ici 10 à 12 mètres au dessus du niveau de la mer. Donc tout le plancher de la centrale (où sont situés les réacteurs 1 à 4) a été inondé par plusieurs mètres d'eau (probablement 5 mètres).

Il est donc évident que cet événement a été sous-évalué pour la construction de la centrale, et peut-être aussi pour d'autres qui sont à cette altitude au Japon.

Le problème est : pourquoi a-t-on ainsi sous-estimé le séisme et tsunami maximum possible au Japon ?

On doit réviser notre conception des séismes dans une région particulière et, de façon générale, dans toutes les zones de subduction.

Il y a schématiquement trois problèmes (image 10):

- 1) Un problème de perception de la sismicité historique et des tsunamis sur le plan local, comparée à l'expérience mondiale qui nous montre qu'il y a des « Megathrust-events », qui sont des ruptures totales, et non partielles, de l'interface de subduction.
- 2) Un problème causé par un consensus scientifique qui se base sur des concepts mécaniques en partie erronés, servis par un jargon bien accepté. Sont en question en particulier (1) le concept de couplage, plus précisément le couplage partiel défini généralement pour une période relativement courte (essentiellement la période couverte par la séismicité instrumentale), par la différence entre glissement sismique cumulé et le glissement à l'interface déduit de la tectonique des plaques, et (2) les concepts mécaniques communément utilisés pour la partie frontale de la zone de subduction.
- 3) Un problème avec les approches de modélisation qui sont assez complexes, mais sur lesquelles on a eu un excès de confiance. Les résultats de ces modèles ont contribué au consensus ambiant et on n'a pas envisagé un événement extrême au Japon.

4) Il est clair que la politique industrielle japonaise est cohérente avec le consensus scientifique.

Sur la liste (image 11) des 16 événements de magnitude \geq 8.5, établie par l'USGS, le séisme du 11 mars se situe en 4^e position, au même niveau que le séisme du Kamtchatka en 1952 (magnitude 9, tsunami comparable). Les deux séismes et leurs tsunamis associés sont en tous points comparables. L'image 12 montre que la rupture du Kamtchatka se situe sur le prolongement au nord-est de la même zone de subduction que la rupture de 2011 au Japon. L'événement de 1952 aurait pu interpeller, mais l'éventualité d'une rupture similaire à celle de Kamchatka n'a pas été retenue au Japon (rupture du 11 mars sur l'image 12, pour comparaison), parce que l'approche s'est basée surtout sur la connaissance et l'expérience locales.

Sur l'image 13, sont représentés avec des cercles rouges la position de l'hypocentre du séisme du 11 mars et ses premières répliques, dont la distribution indique approximativement l'extension de la zone de rupture. Sur la même image sont représentés les séismes précédents connus (traits noirs en pointillé), notamment le séisme de 1896, étudié par Kanamori (Kanamori, Phys. Earth Planet. Interiors, 6, 346-359, 1972), qui est une pièce importante de la construction du modèle d'occurrence des séismes dans ce secteur. Il a servi à définir un concept : un « tsunami earthquake » qui rompt uniquement la partie frontale de l'interface de subduction. Le glissement accumulé par ces séismes connus, qui correspondent tous (sauf 1933) à des ruptures partielles, relativement modestes, de l'interface de subduction, a été comparé avec le glissement pour la même période de temps déduit des données sur la convergence entre les deux plaques. La conclusion qui en a été tirée est un couplage partiel (seulement 10-20% de la convergence avait été absorbée par les séismes passés observés, représentés sur l'image). L'hypothèse communément acceptée était que le reste de la convergence devrait se dissiper par glissement asismique. Parmi les zones à faible couplage déterminées de cette façon, on peut compter aussi Sumatra, lieu comme on sait d'un autre séisme et tsunami géants en 2004.

Ces deux exemples montrent bien que ce raisonnement doit être totalement révisé et reformulé.

Autre concept erroné : des ruptures partielles pourraient tout expliquer et il n'y aurait pas lieu de considérer une rupture totale.

Sur les cartes japonaises officielles de séismes probables, publiées avant l'événement de 2011 (image 14, à gauche, tirée des documents officiels Japonais : *National Seismic Hazard Maps for Japan (2005), Seismic Hazard Map for Specified Seismic Source Faults*, carte actualisée en 2009) on peut apprécier l'impact du modèle de ruptures partielles. On envisage une segmentation complexe en petits secteurs limités par des lignes en pointillés (ce qui réduit la largeur et la longueur des ruptures probables, avec une partie frontale séparée).

Le segment dénommé Fukushima est un petit secteur parmi les autres, pour lesquels les magnitudes envisagées (en rouge) sont assez modestes.

L'image 14 à droite montre une estimation de déformation verticale associée au séisme de 2011, en particulier sur le fond marin, donc contribuant puissamment à l'excitation du tsunami. On déduit, pour le plancher marin, un soulèvement (dans la zone rouge) d'un maximum de 5 mètres (selon les modèles, ce soulèvement pourrait être supérieur à cela), et une subsidence de la côte japonaise de 50 cm à 1 m. L'ampleur de l'événement est représentée schématiquement (sur l'animation de l'image 14) à gauche, montrant comment le séisme de 2011 a rompu entièrement l'interface de subduction, recouvrant l'ensemble des ruptures partielles envisagées. C'est un séisme qui rompt sur 500 km du nord au sud, le long de la zone de subduction, mais avec des déplacements considérables concentrés dans un secteur (en couleur plus foncée) où il y a des pics de glissement de l'ordre de 30 m. Et en

même temps les stations GPS montrent que la côte du Japon s'est déplacée horizontalement vers l'Est d'un maximum de 5 m.

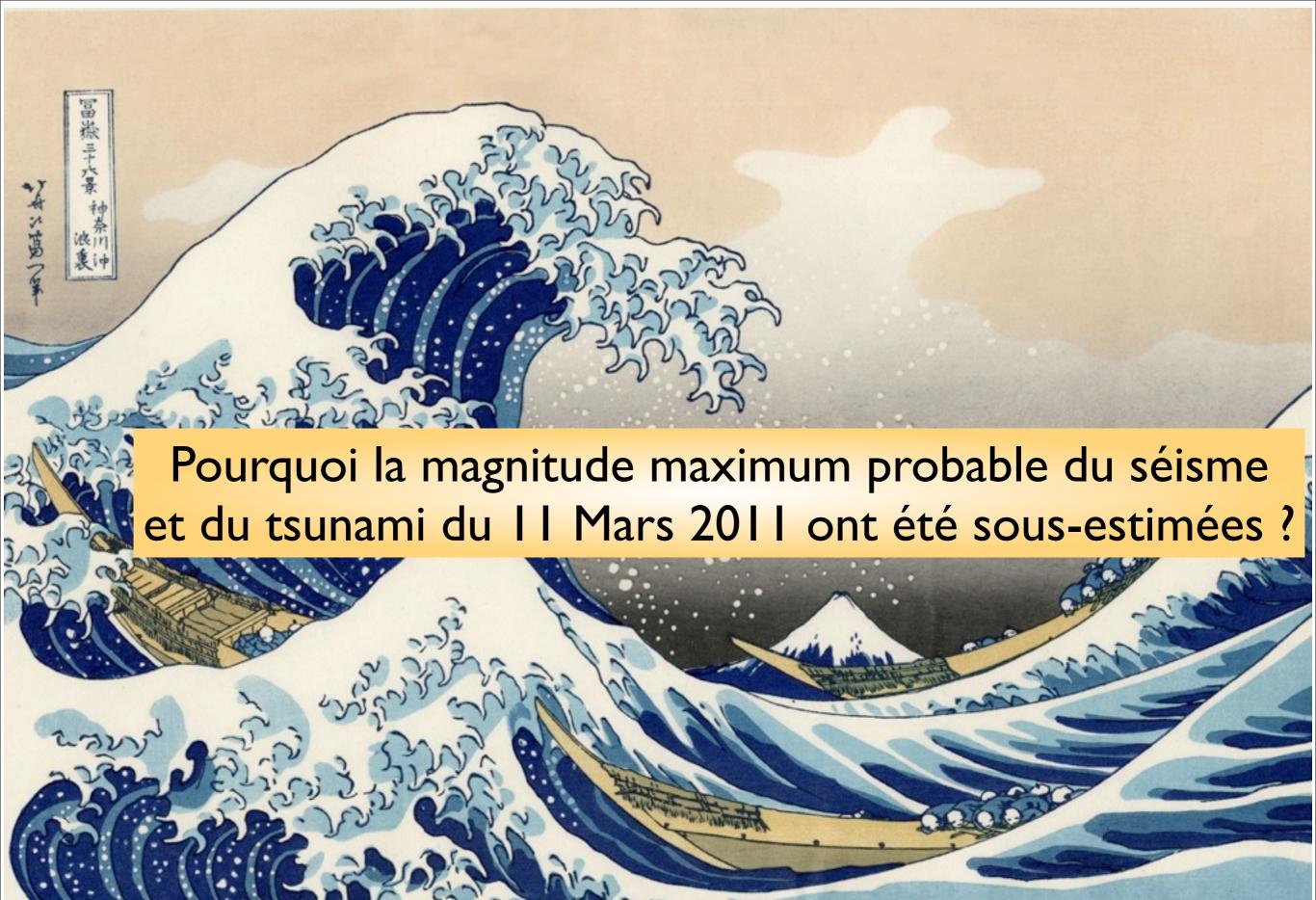
L'image 15 représente une vue en coupe de la rupture totale (ligne jaune) de l'interface de subduction, depuis une profondeur d'environ 40 km jusqu'à la fosse. On peut contraster cette vue avec le concept de segmentation avec la profondeur de la subduction (illustré sur l'image 16), dans lequel la partie frontale apparaît comme un système ayant un comportement séparé (stable sliding friction, velocity-strengthtening behavior) pouvant réduire sensiblement la largeur d'une rupture de l'interface, donc (conformément à une loi d'échelle bien connue) minimiser sa dimension totale, son glissement moyen et sa capacité à engendrer de grands tsunamis.

Il y a aussi parfois des problèmes avec la modélisation des données : un exemple important est celui des données géologiques sur un tsunami particulièrement bien documenté qui s'est produit dans la baie de Sendai en 869 de notre ère, associé à un grand séisme dénommé Jogan (image 17). Les références citées sont : Minoura et al., J. Natural Disaster Sci., 23, 83-88, 2001 ; Sawai et al., A study on paaeotsunami using handy geoslicer in Sendai Plain (Sendai, Natori, Iwanuma, Watari, and Yamamoto), Miyagi, Japan (en Japonais avec résumé en Anglais), Ann. Rep. Active Fault Paleoearthquake Res., 7, 47-80, 2007; Satake et al., Numerical simulation of the AD 869 Jogan tsunami in Ishinomaki and Sendai plains (en Japonais avec résumé en Anglais), Ann. Rep. Active Fault Paleoearthquake Res., 8, 71-89, 2008. Ce grand tsunami a profondément inondé la plaine de Sendai jusqu'à 3-4 km à l'intérieur des terres et l'indication d'autres tsunamis comparables implique une récurrence de l'ordre de plusieurs siècles, voire de l'ordre du millénaire, pour ce type d'événement exceptionnel. Cependant, la modélisation de ces données (modélisation sophistiquée mais réductrice, car l'unicité de la solution es questionnable) a conduit à déduire une source de magnitude Mw maximum de 8.4 (rectangle superposé sur l'image 17), donc encore une rupture relativement modeste, conforme au consensus. La dimension de la rupture de 2011 est illustrée schématiquement par l'animation (image 17) et le moment sismique de la rupture attribuée à 869 peut être comparé à celui de 2011.

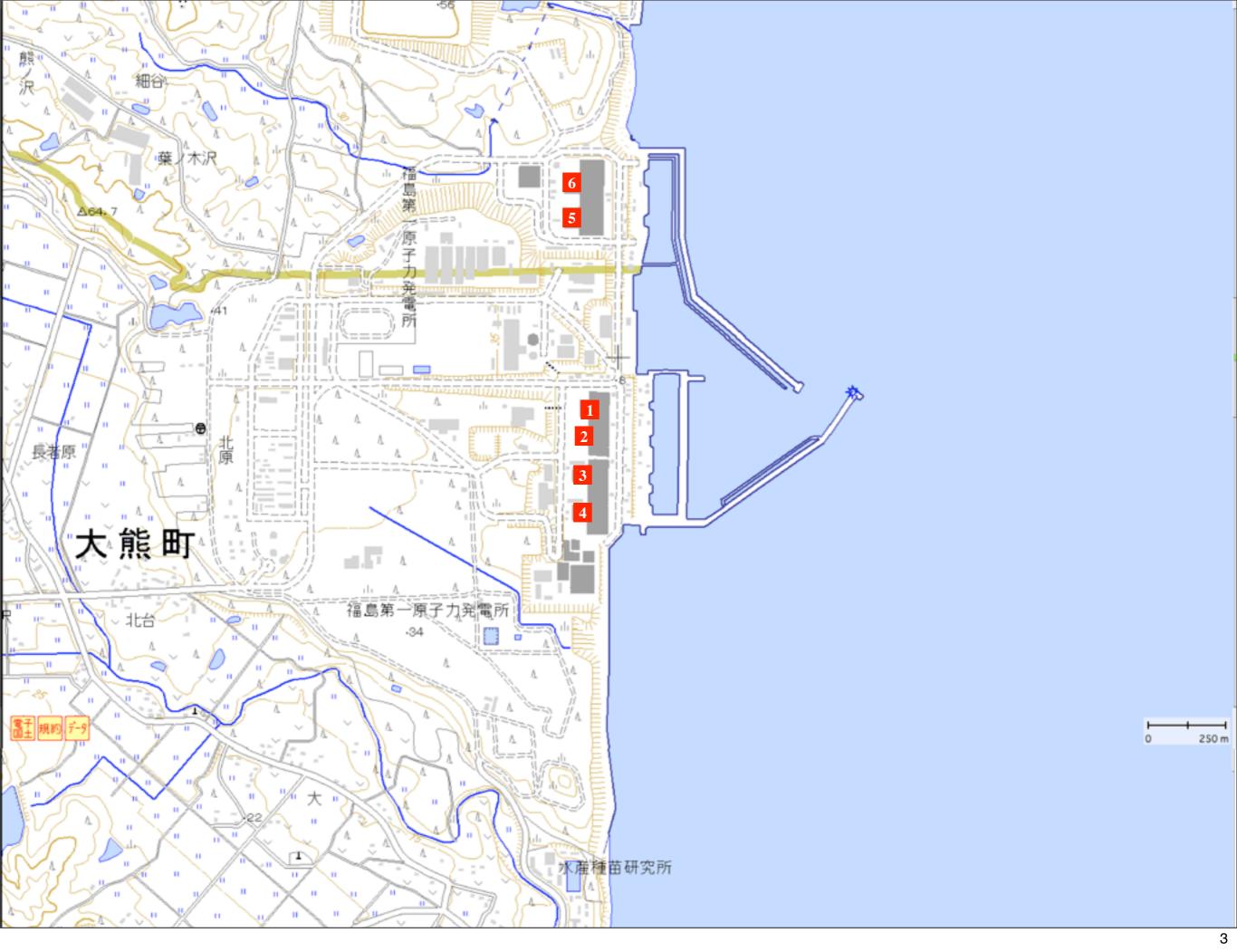
L'image 18 montre à gauche une carte de l'inondation de 869 dans la plaine de Sendai avec indication des points sur lesquels les observations géologiques ont été collectées (voir en particulier la zone de l'aéroport). À droite de la même figure, on peut voir les différentes alternatives testées avec la modélisation de ces données.

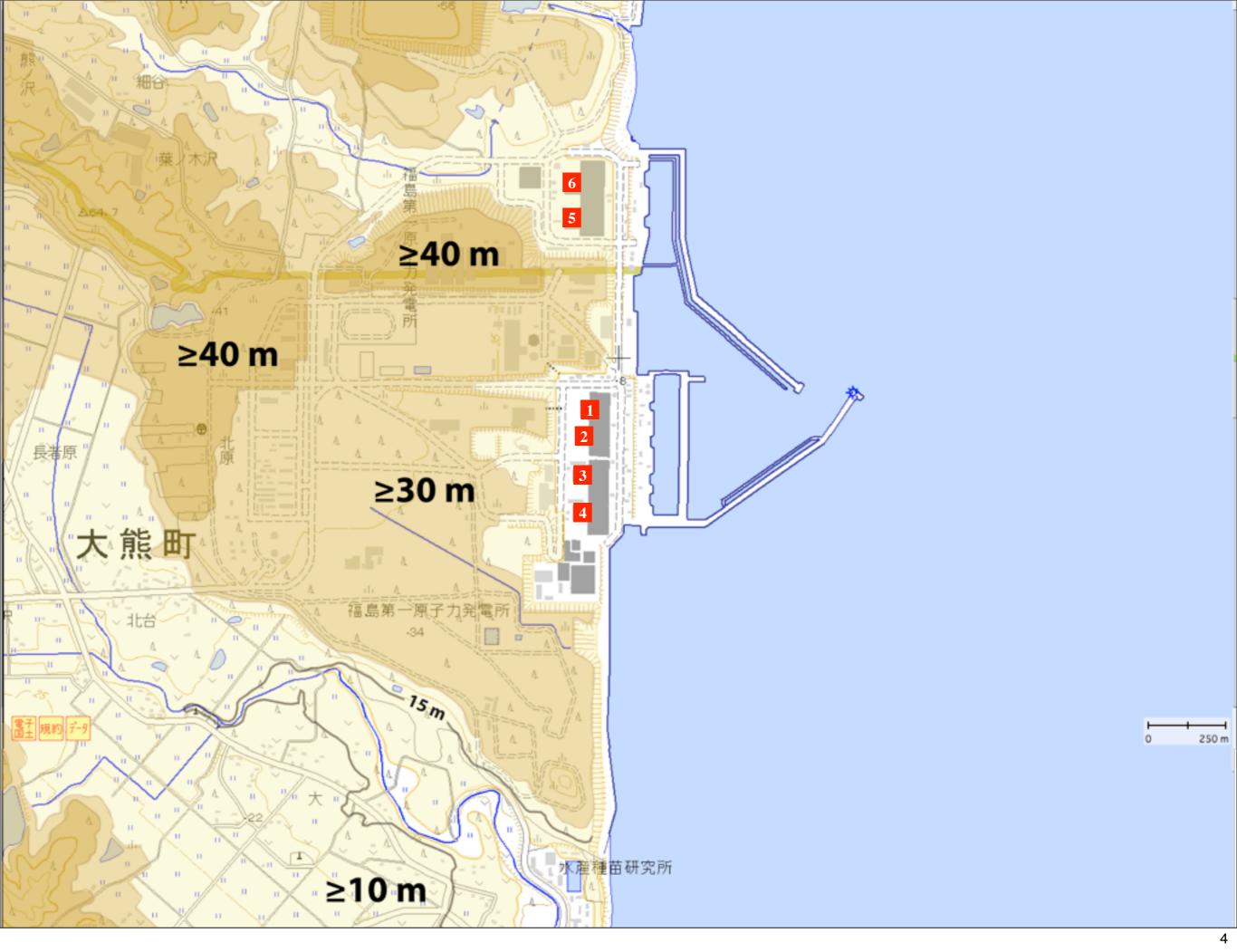
Sur l'image 19 on voit à gauche une image TerraSAR-X de la plaine de Sendai prise après le tsunami de 2011, qui permet de distinguer clairement (en bleu) la zone inondée. La zone de l'aéroport de Sendai est agrandie (carré). On peut comparer avec, à droite, une carte montrant la distribution des observations (tranches de sédiments témoins, collectées avec un instrument nommé « geoslicer ») sur le grand tsunami de 869 (selon Sawai *et al.* 2007). On peut aisément constater que les deux tsunamis (869 et 2011) ont produit sur la plaine de Sendai la même inondation (comparer les petits cercles rouges sur l'image à droite avec les lignes rouges reportées sur l'image à gauche). Donc, une modélisation de ces observations sur le tsunami de 2011 dans la plaine de Sendai avec la même approche que celle utilisée pour 869 devrait nous indiquer également une source minimisée, bien différente de la réalité des faits.

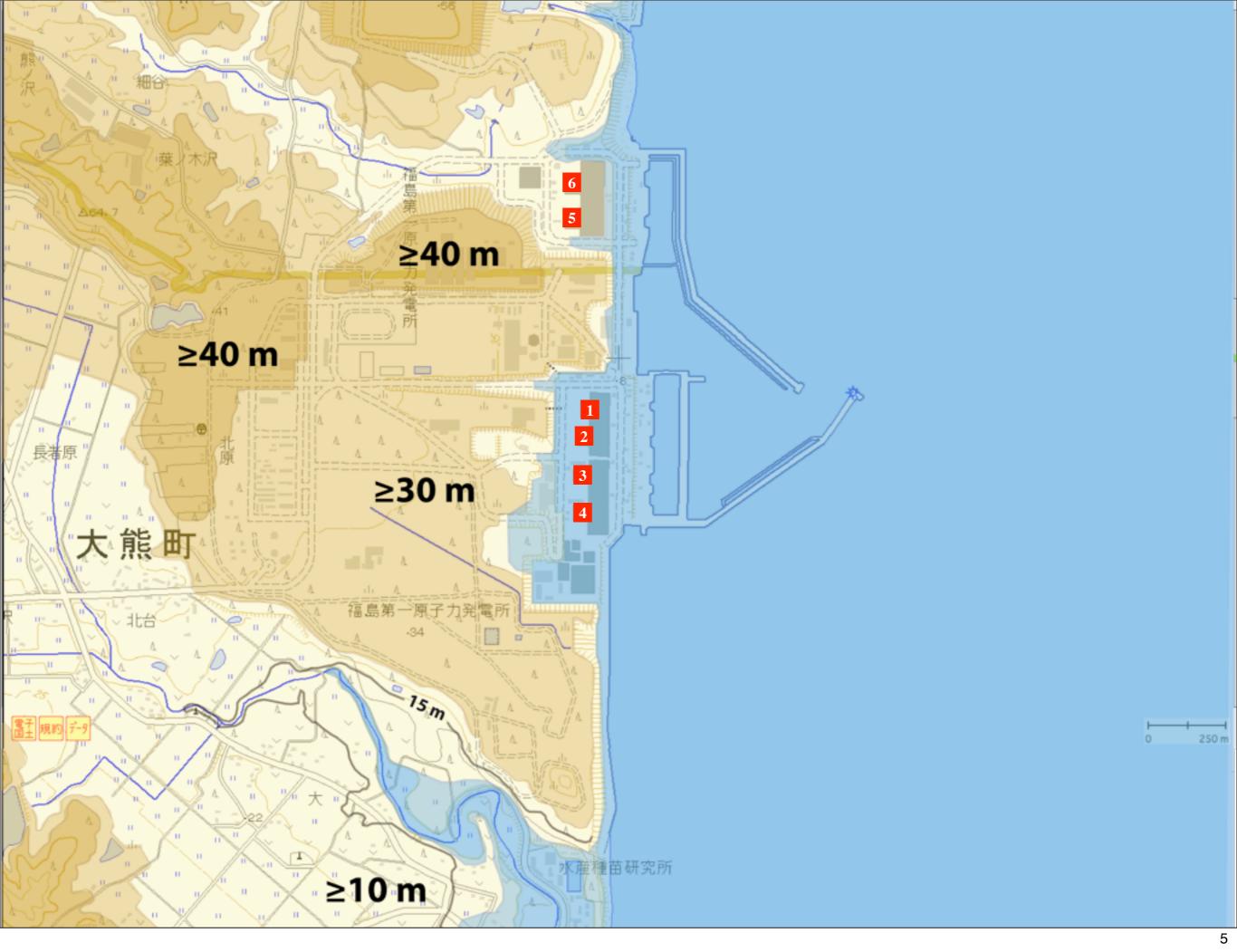
Pour terminer (image 20), il convient de répéter que notre mémoire sismologique est très courte, en particulier pour les événements exceptionnels, tels que les « megathrust » avec rupture totale d'une interface de subduction. Pour pallier cela il faut regarder l'occurrence de ces événements à l'échelle mondiale et explorer de façon bien plus approfondie le passé géologique.























Pourquoi la magnitude maximum probable du séisme & tsunami ont été sous-estimées ?

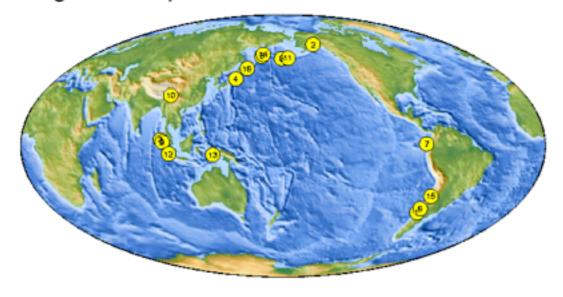
- Perception de tsunamis et sismicité historiques sur le plan local vs. mémoire planétaire des Séismes Géants «Megathrust» et tsunamis
- Consensus, concepts et jargon:
 couplage partiel & chevauchement frontal des zones de subduction
- Modèles utilisés

très complexes, mais excès de confiance

Important:

Politique industrielle cohérente avec consensus scientifique

Largest Earthquakes in the World Since 1900



«Megathrust Earthquakes»

Séismes produits par Chevauchements Géants (Mw ≥ 8.5)

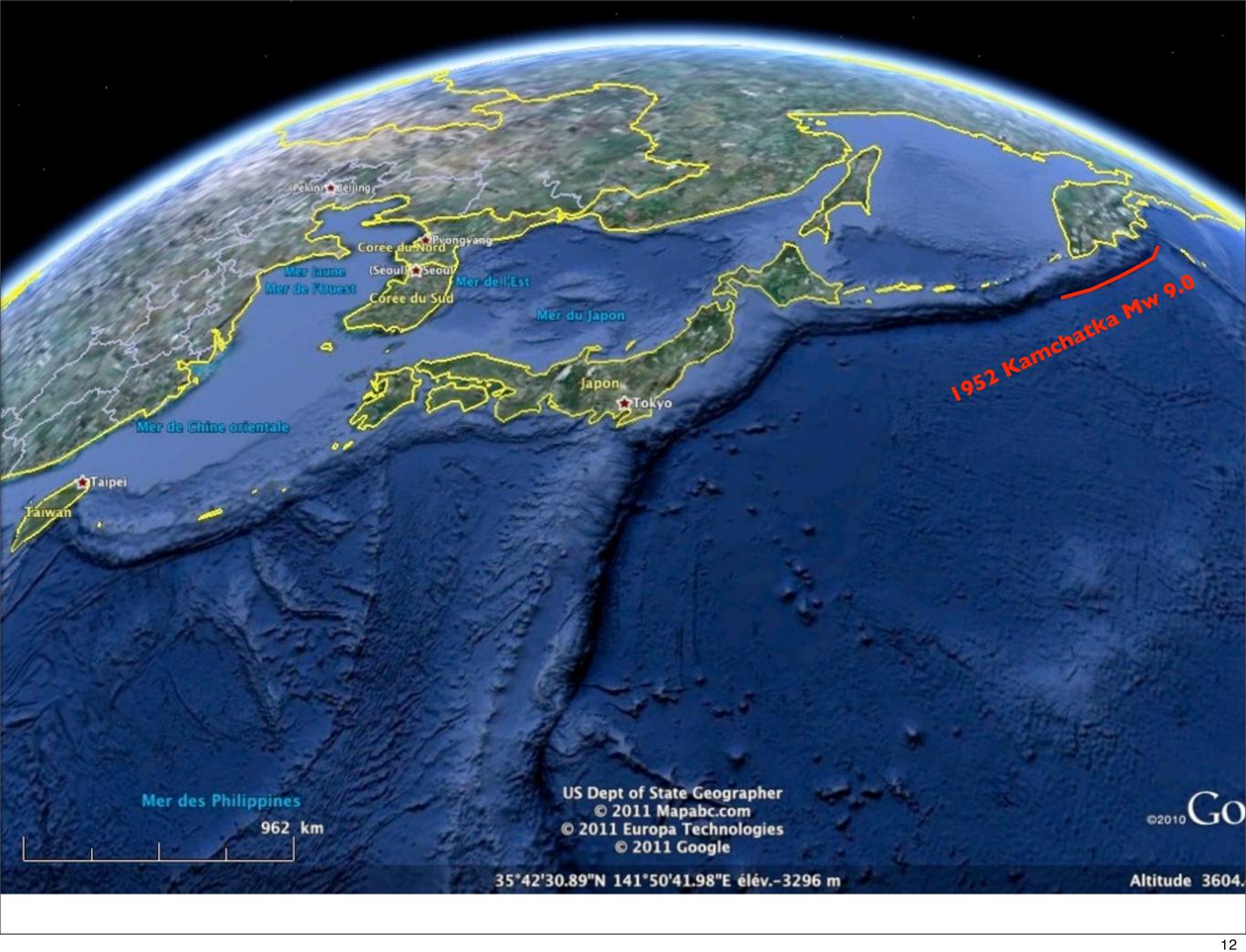
USGS National Earthquake Information Center

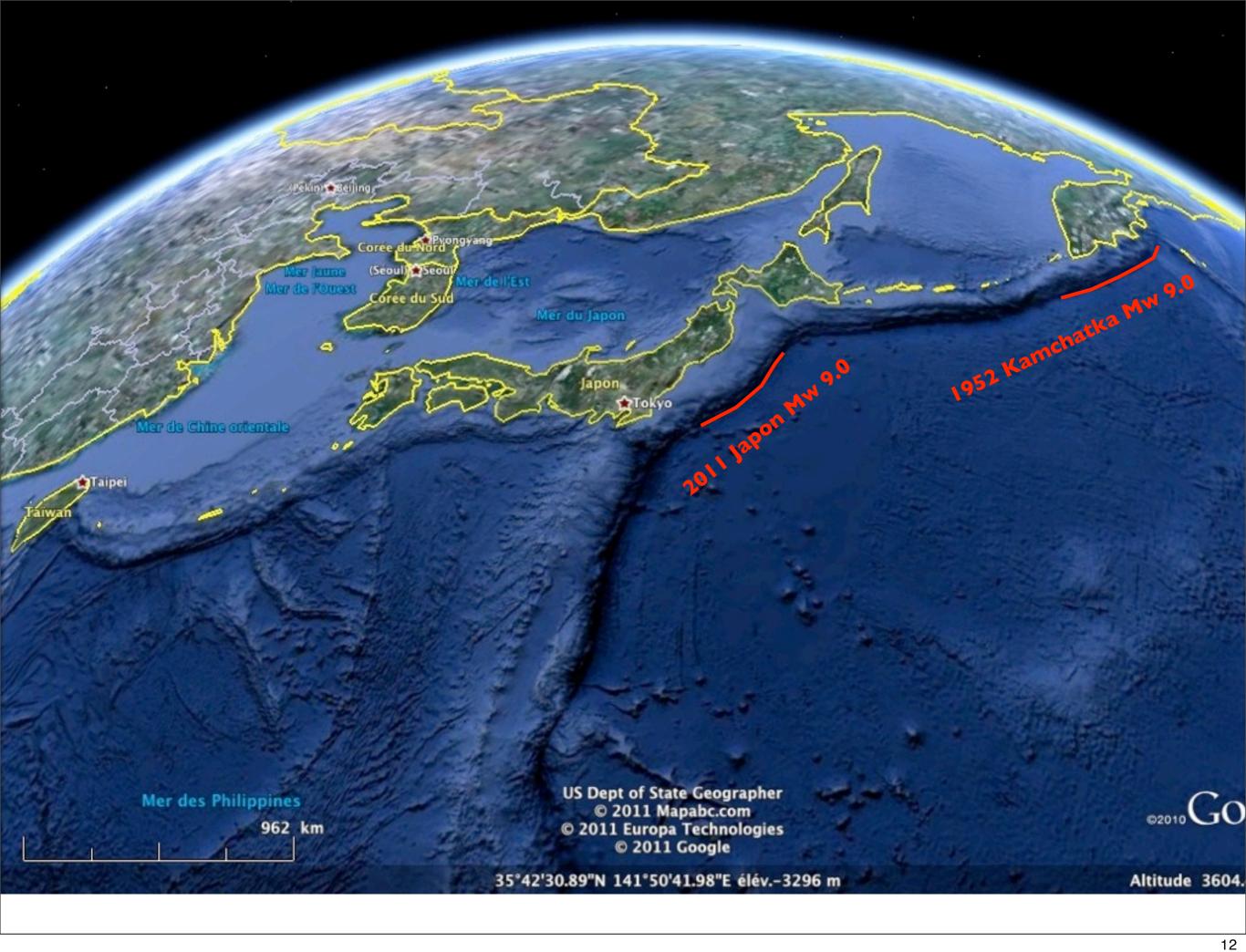


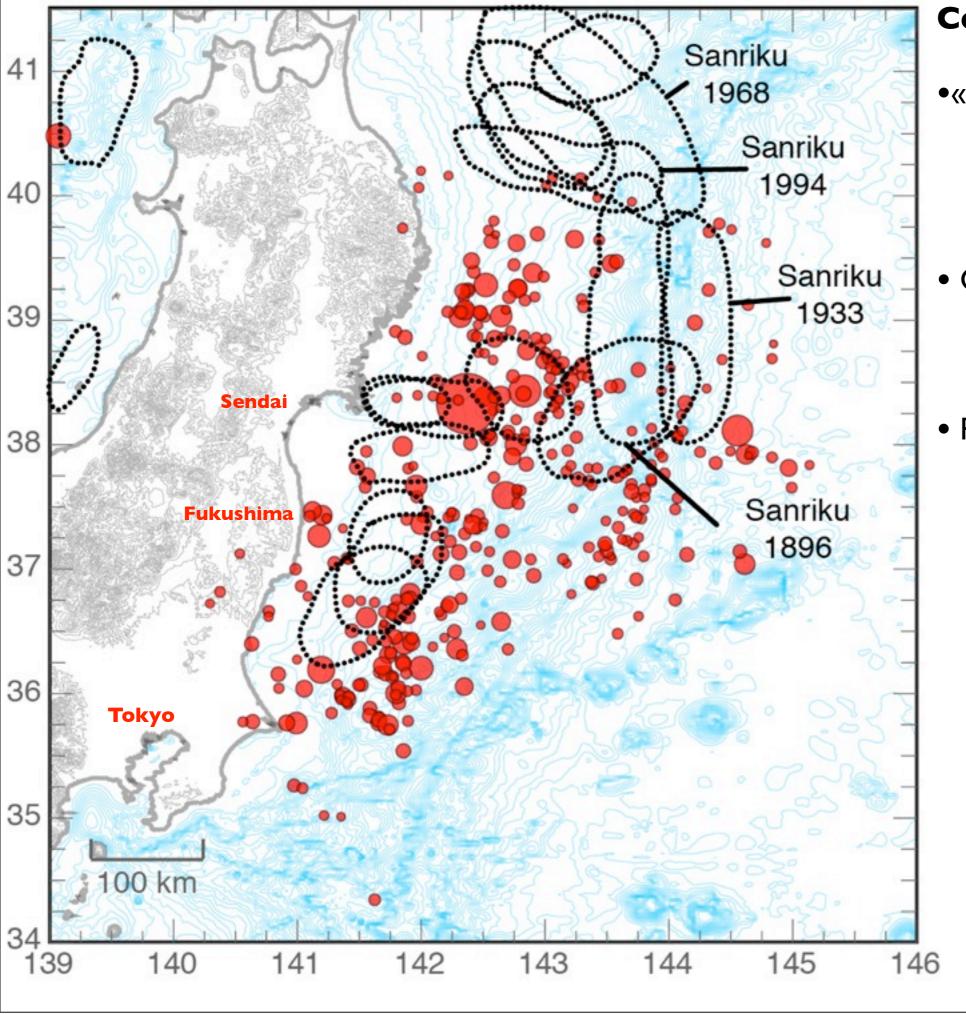
(requires Google Earth)

	Location	Date UTC	Magnitude	Lat.	Long.	Reference	
1.	Chile	1960 05 22	9.5	-38.29	-73.05	Kanamori, 1977	
2.	Prince William Sound, Alaska	1964 03 28	9.2	61.02	-147.65	Kanamori, 1977	
3.	Off the West Coast of Northern Sumatra	2004 12 26	9.1	3.30	95.78	Park et al., 2005	
4.	Near the East Coast of Honshu, Japan	2011 03 11	9.0	38.322	142.369	PDE	
5.	Kamchatka	1952 11 04	9.0	52.76	160.06	Kanamori, 1977	
6.	Offshore Maule, Chile	2010 02 27	8.8	-35.846	-72.719	PDE	
7.	Off the Coast of Ecuador	1906 01 31	8.8	1.0	-81.5	Kanamori, 1977	
8.	Rat Islands, Alaska	1965 02 04	8.7	51.21	178.50	Kanamori, 1977	
9.	Northern Sumatra, Indonesia	2005 03 28	8.6	2.08	97.01	PDE	
10.	Assam - Tibet	1950 08 15	8.6	28.5	96.5	Kanamori, 1977	
11.	Andreanof Islands, Alaska	1957 03 09	8.6	51.56	-175.39	Johnson et al., 1994	
12.	Southern Sumatra, Indonesia	2007 09 12	8.5	-4.438	101.367	PDE	
13.	Banda Sea, Indonesia	1938 02 01	8.5	-5.05	131.62	Okal and Reymond, 2003	
14.	Kamchatka	1923 02 03	8.5	54.0	161.0	Kanamori, 1988	
15.	Chile-Argentina Border	1922 11 11	8.5	-28.55	-70.50	Kanamori, 1977	
16.	Kuril Islands	1963 10 13	8.5	44.9	149.6	Kanamori, 1977	
Upda	Updated 2011 March 15						



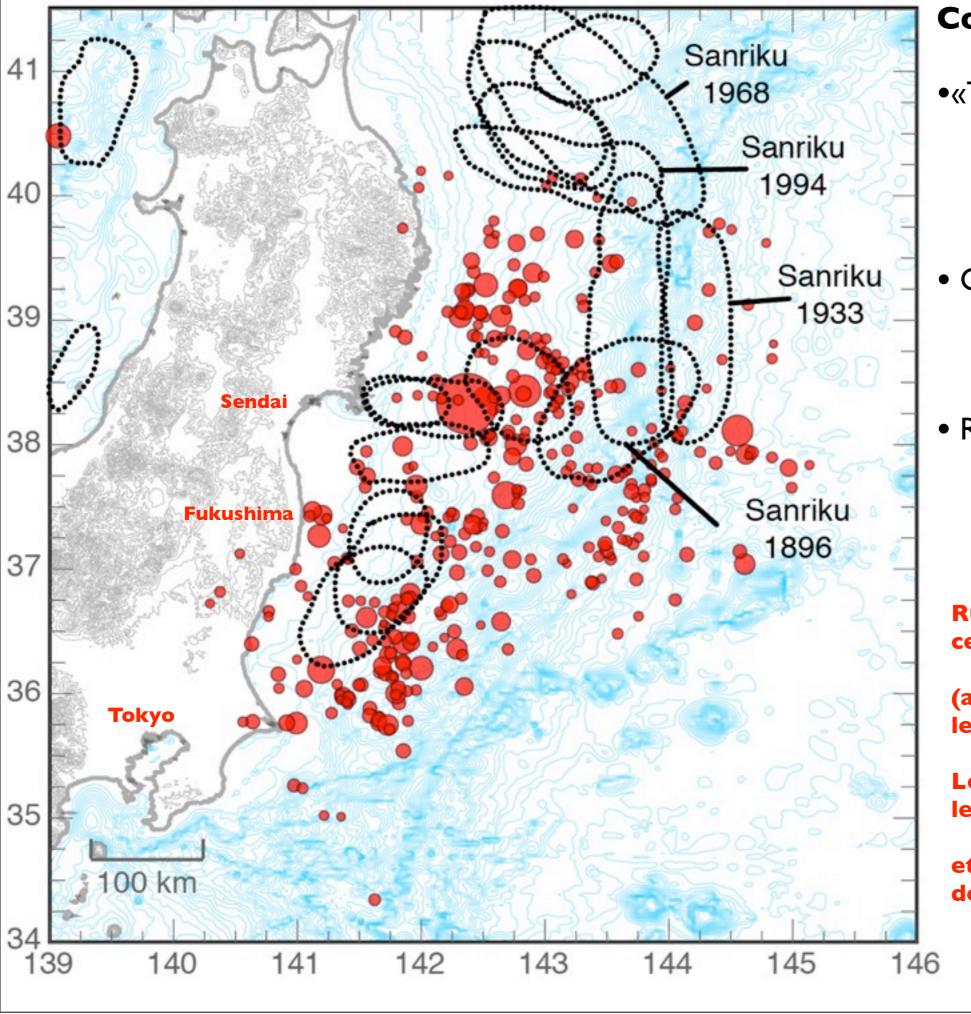






Concepts critiquables

- «Tsunami Earthquake»
 (selon le séisme de 1896)
 chevauchement frontal
 fonctionnement indépendant
- Couplage partiel seulement 10-20% de la convergence
- Rupture partielle
 de l'interface de subduction
 Pas de Séisme Géant
 No Megathrust



Concepts critiquables

- «Tsunami Earthquake»
 (selon le séisme de 1896)
 chevauchement frontal
 fonctionnement indépendant
- Couplage partiel seulement 10-20% de la convergence
- Rupture partielle
 de l'interface de subduction
 Pas de Séisme Géant
 No Megathrust

Rupture totale est exclue pour ce système de failles

(alors qu'elle est acceptée pour les failles à terre !)

Les Scientifiques ont centré leurs études sur les branches...

et ont oublié le tronc principal de l'arbre!

Prévision officielle pour la région en 2009: seulement ruptures partielles



図1 三陸沖北部から房総沖の評価対象領域

地震調査委員会(2009) : 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(一部改訂) (平成21年3月9日公表)

Prévision officielle pour la région en 2009: seulement ruptures partielles

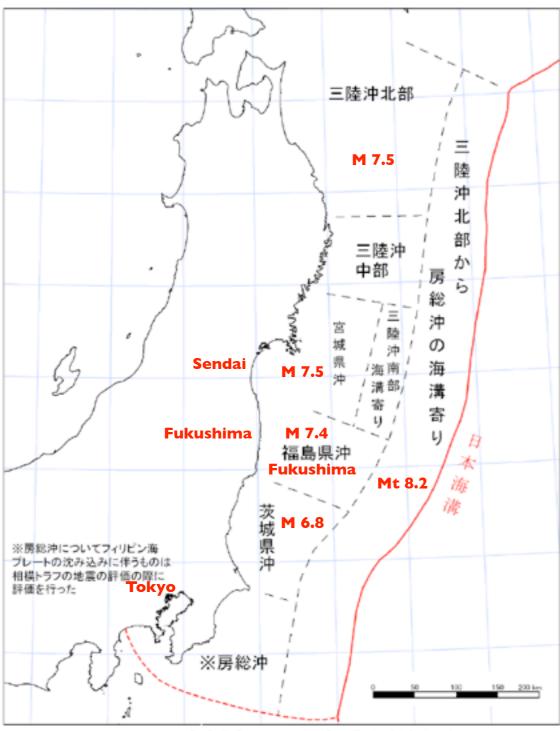
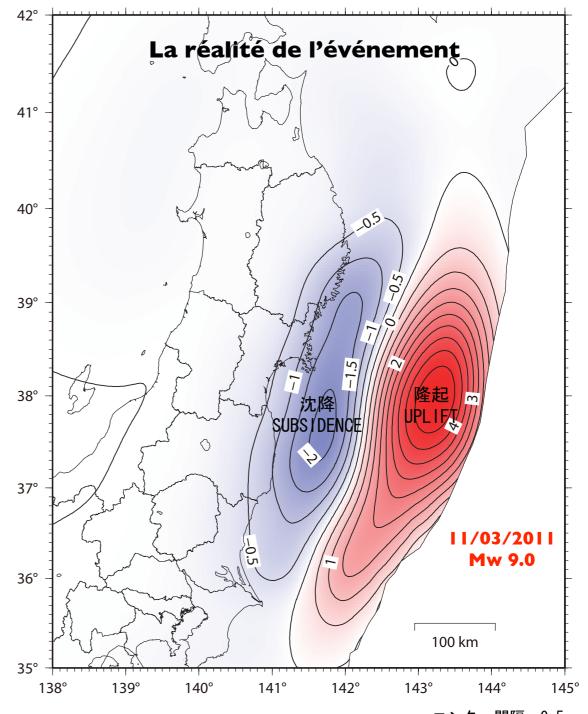


図1 三陸沖北部から房総沖の評価対象領域

地震調査委員会(2009) : 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(一部改訂) (平成21年3月9日公表)

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake 滑り分布モデル(暫定)から想定される上下変動 Vertical deformation calculated from slip distribution model (preliminary result)



コンター間隔:0.5 m Contour interval: 0.5 m

※この上下変動図は、電子基準点(GPS連続観測点)データからプレート境界面上での滑り分布モデルを推定し、そのモデルから想定される上下変動の推定値を図示したものです。従って実際の変動量とは必ずしも一致するものではありません。

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

Prévision officielle pour la région en 2009: seulement ruptures partielles

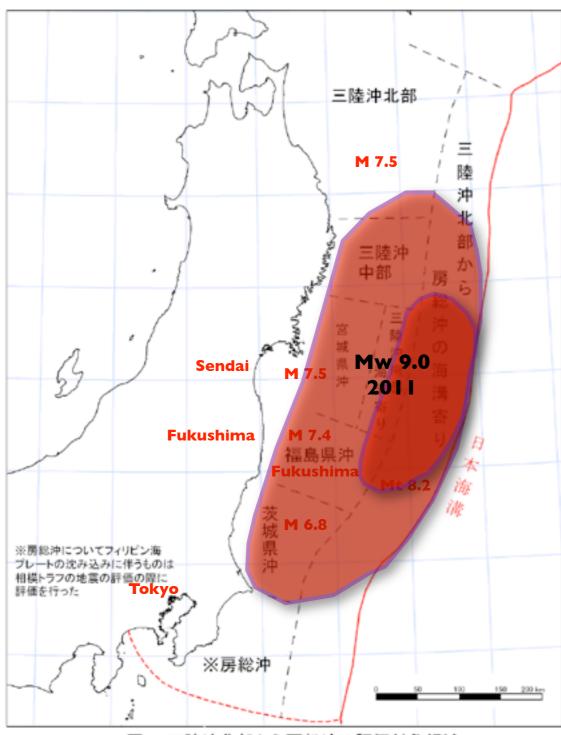


図1 三陸沖北部から房総沖の評価対象領域

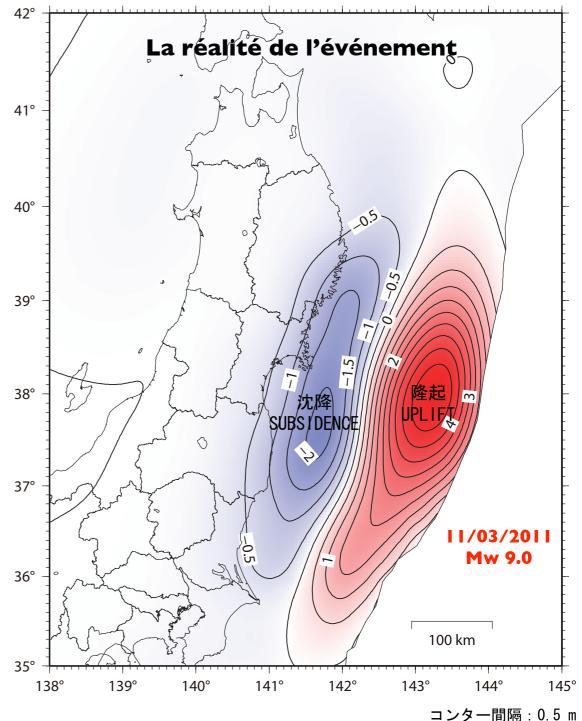
地震調査委員会(2009) : 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(一部改訂) (平成21年3月9日公表)

RUPTURE TOTALE:

Un ordre de grandeur de différence!

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake 滑り分布モデル(暫定)から想定される上下変動 Vertical deformation calculated from slip distribution model

(preliminary result)



コンター間隔:0.5 m Contour interval: 0.5 m

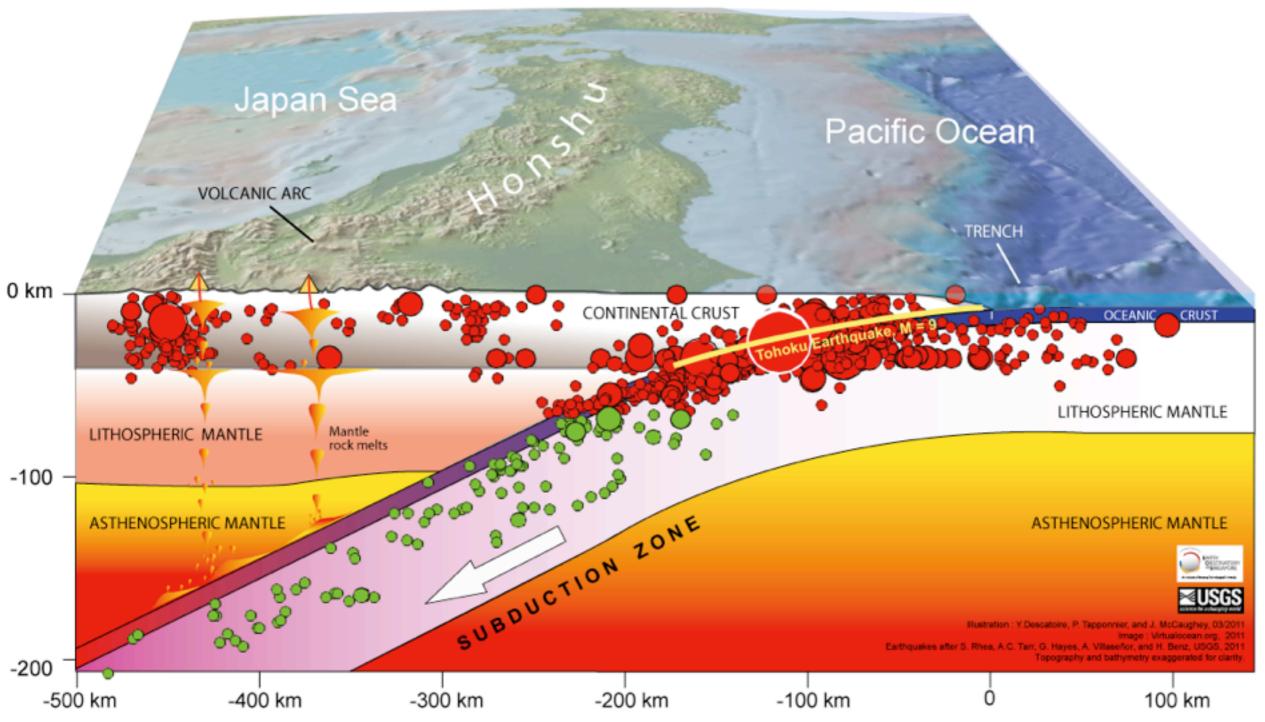
※この上下変動図は、電子基準点(GPS連続観測点)データからプレート境界面上での滑り分布モデルを推定し、そのモデルから想定される上下変動の推定値を図示したものです。従って実際の変動量とは必ずしも一致するものではありません。

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

Séime Géant «Megathrust» du 11/03/2011 Mw 9.0

Rupture Totale de l'interface de subduction

JAPAN



longueur rupture ~500 km; largeur ~200 km toute la croûte, de ≥40 km de profondeur jusqu'au plancher océanique

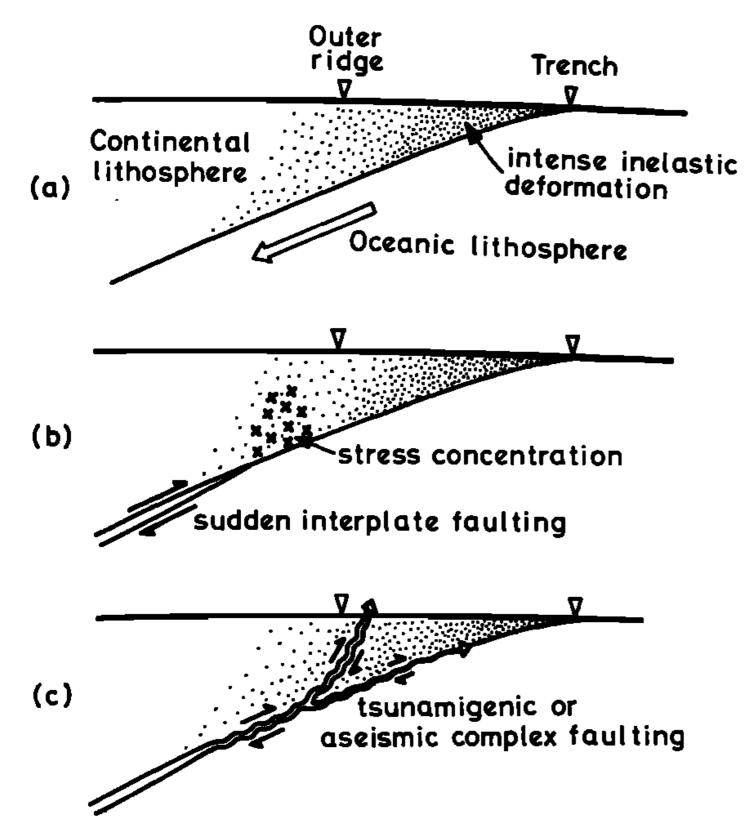
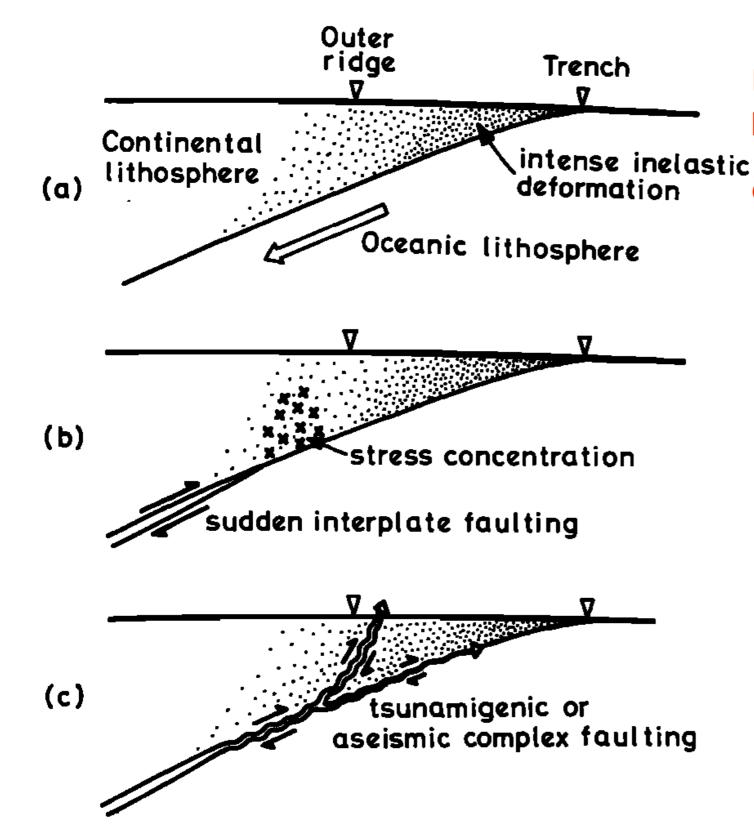


Fig. 19. A model for a great earthquake sequence showing (a) interseismic stage, (b) coseismic stage, and (c) postseismic stage. See the text for details.



Modèle de Segmentation avec la profondeur

Conséquences:

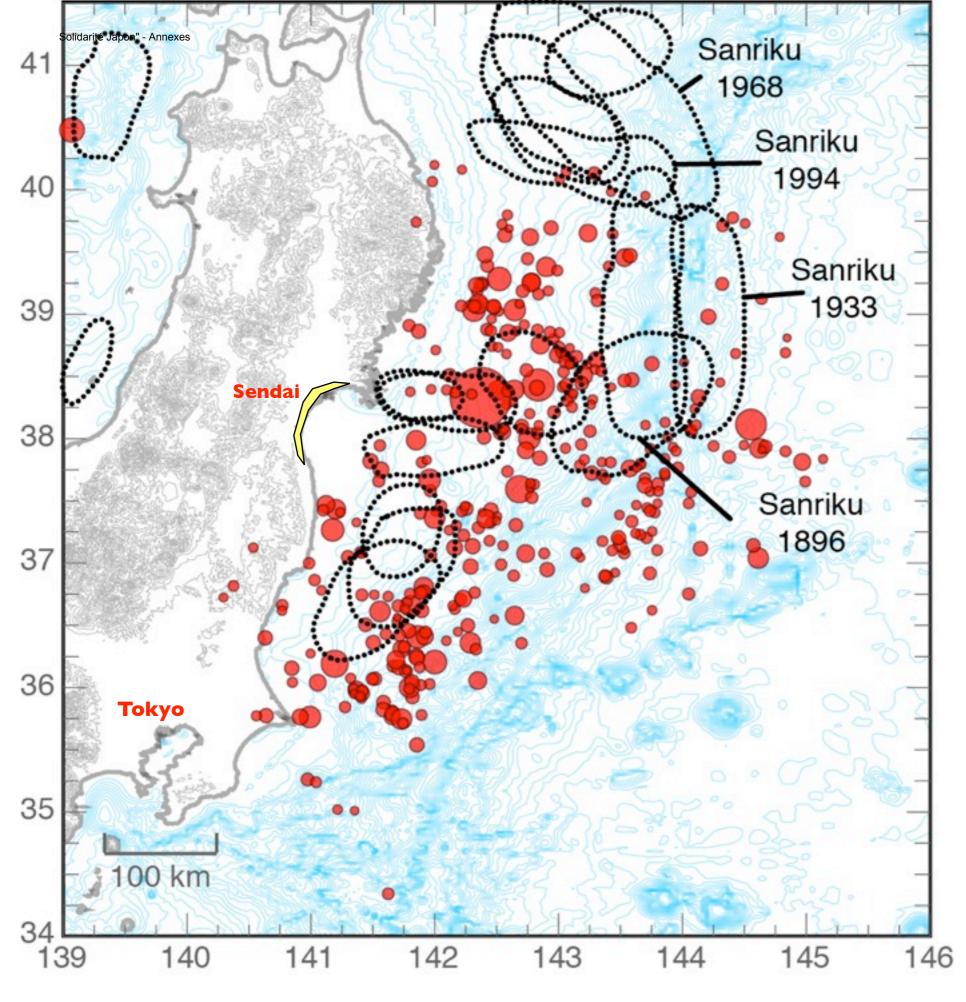
Chevauchement Frontal
 Considéré système séparé

avec frottement stable (stable sliding friction)

& durcissement avec la vitesse de glissement (velocity-strenghtening behavior)

- Réduisant la largeur de rupture d'un facteur 2
- Réduisant la puissance des tsunamis envisagés

Fig. 19. A model for a great earthquake sequence showing (a) interseismic stage, (b) coseismic stage, and (c) postseismic stage. See the text for details.



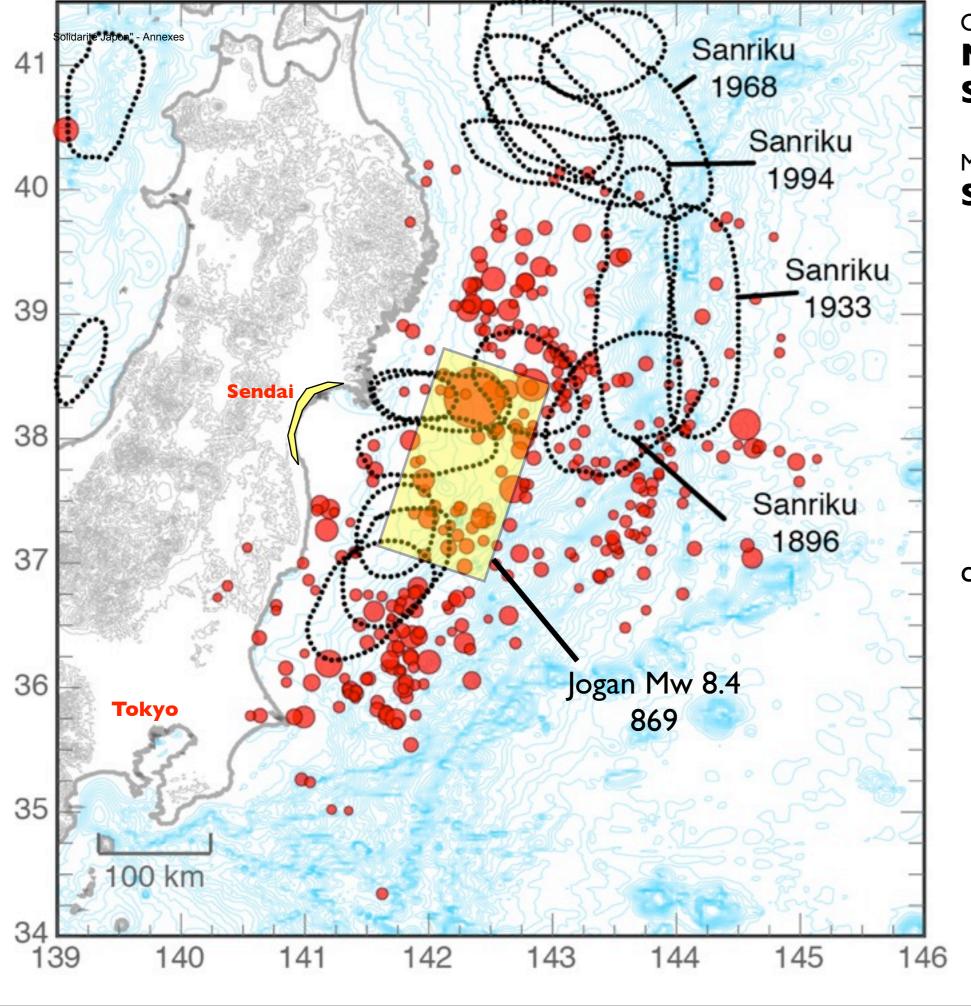
Observations par:

Minoura et al. 2001 Sawai et al. 2007

Modèle par:

Satake et al. 2008

MODÈLE du Tsunami année 869

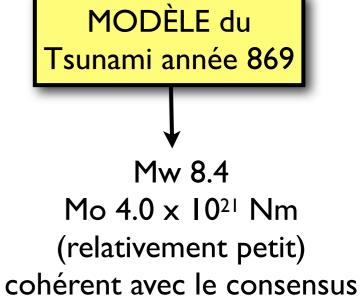


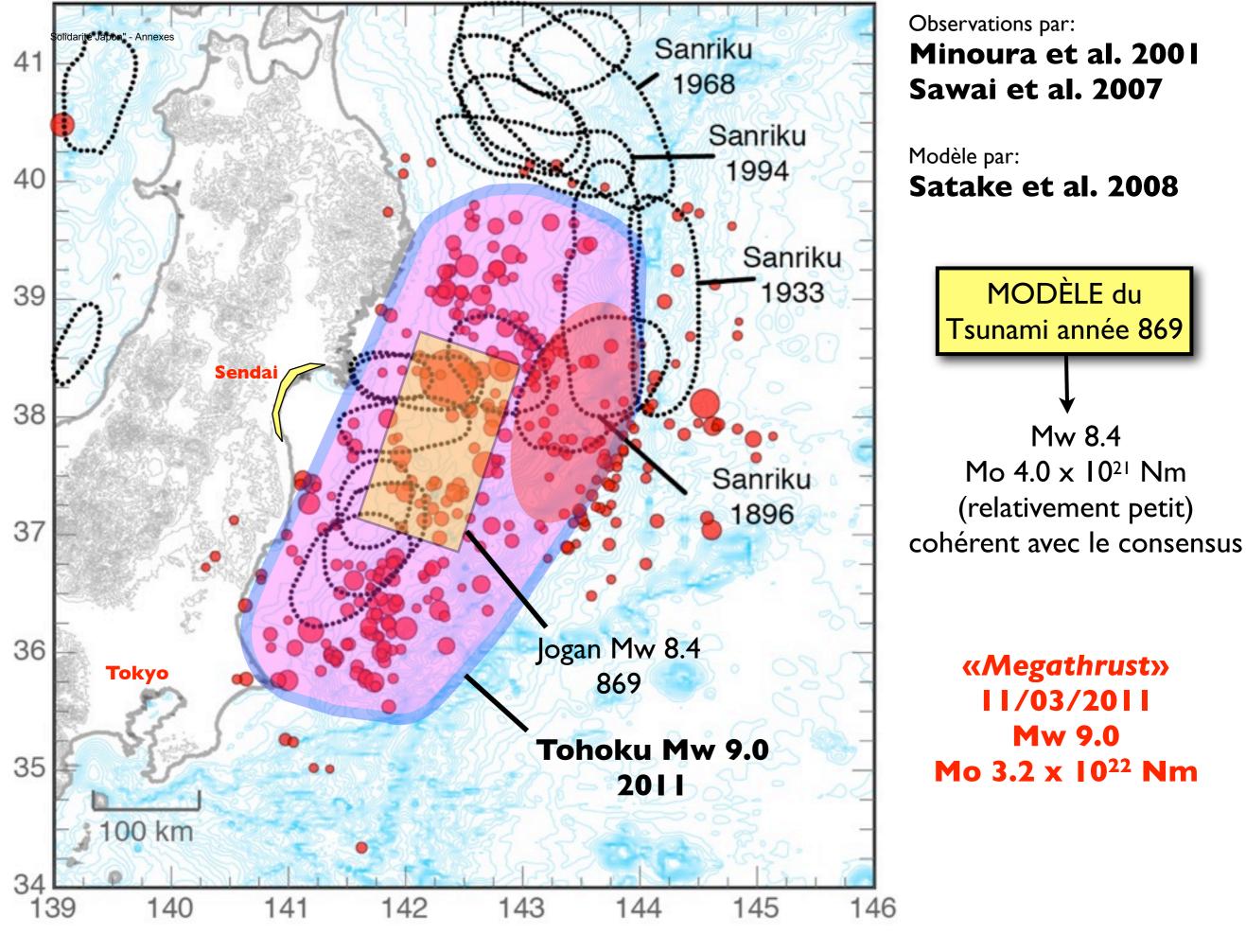
Observations par:

Minoura et al. 2001 Sawai et al. 2007

Modèle par:

Satake et al. 2008



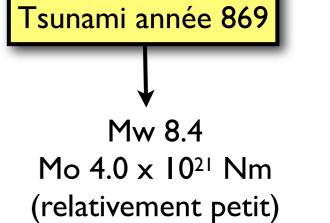


Observations par:

Minoura et al. 2001 Sawai et al. 2007

Modèle par:

Satake et al. 2008



MODÈLE du

«Megathrust» 11/03/2011 Mw 9.0 Mo 3.2 x 10²² Nm

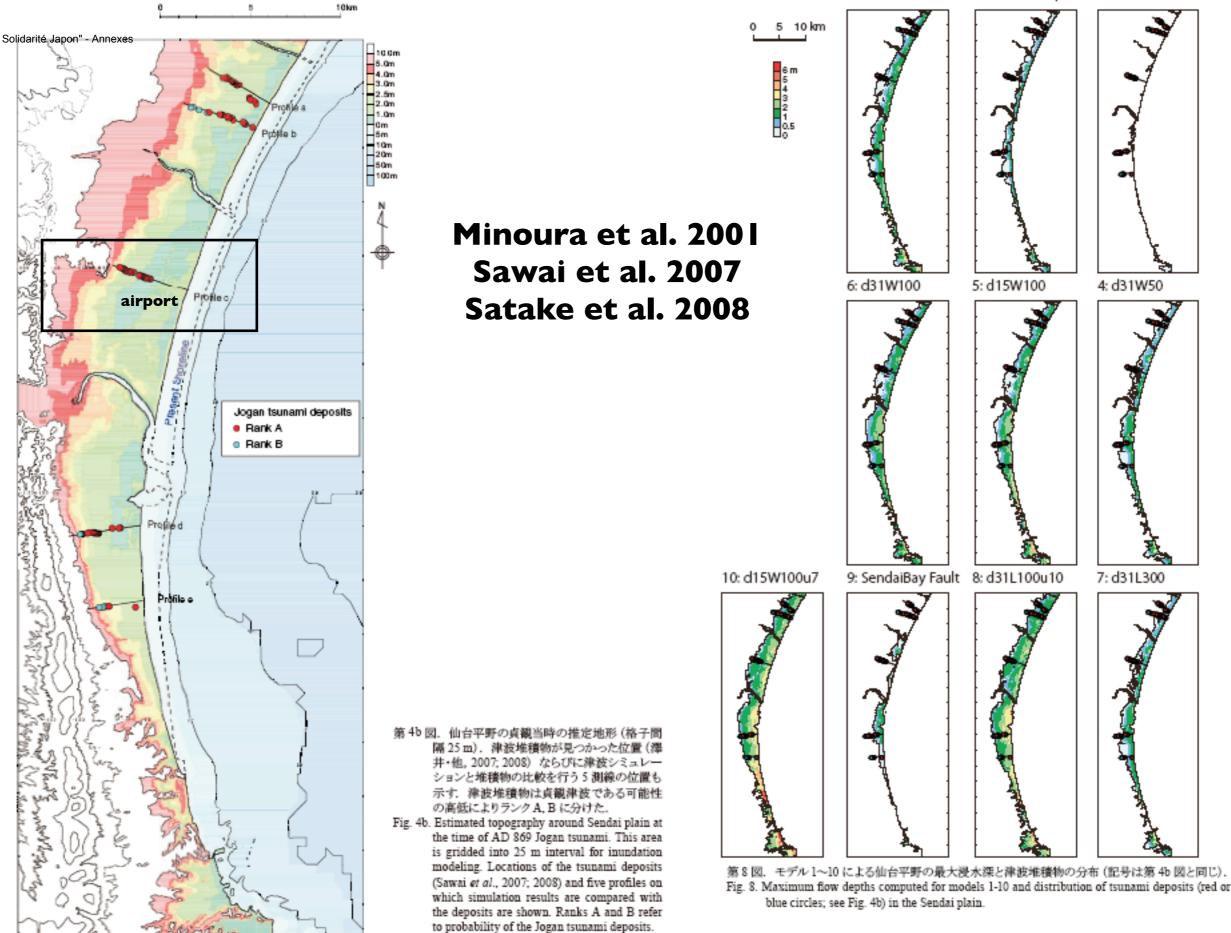
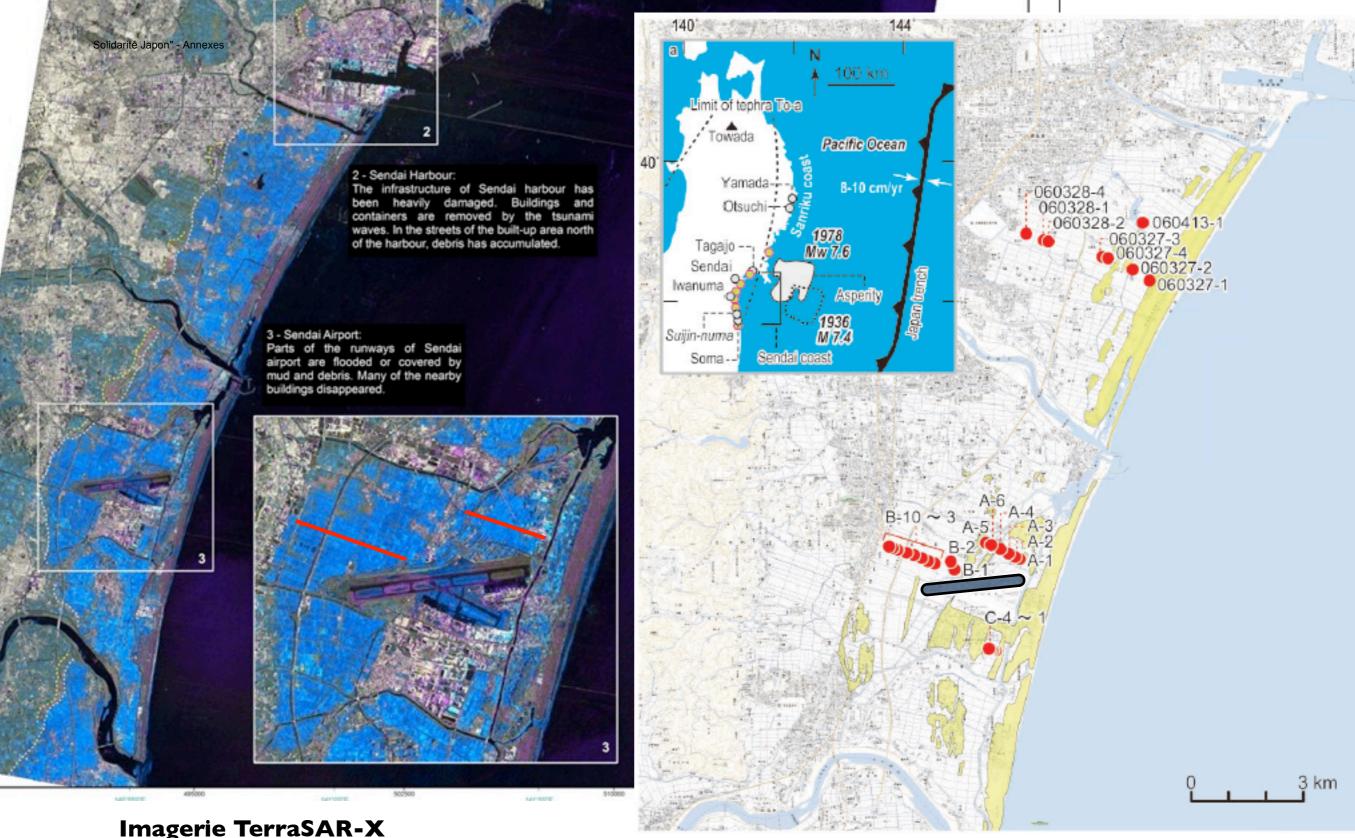


Fig. 8. Maximum flow depths computed for models 1-10 and distribution of tsunami deposits (red or

3: d15W50

1: Normal Fault

2: Tsunami Eq.



Imagerie TerraSAR-X du tsunami 2011

第1図. 調査地点図(1).a(左上図)中の六角形は貞観津波の伝承が残る地域(渡邉,2001). 国土地理院発行1/25000地形図「塩竈」「仙台東北部」「仙台西北部」「仙台西南部」「仙台東南部」「岩沼」「仙台空港」を使用.

Fig.1. Location map (1). Green hexagons along the coast (in a) are sites with oral or written records of the 896 Jogan tsunam (Watanabe, 2001). Modified from 1/25000-scale map of Geographical Survey Institute of Japan, [Shiogama], [Senda Touhokubu], [Sendai Seihokubu], [Sendai Seinanbu], [Sendai Tounanbu], [Iwanuma], [Sendai Kuukou].

vs. étude par tranchées «geoslicer» du tsunami de 869 DC par Sawai et al. 2007

Pourquoi la magnitude maximum probable du séisme & tsunami ont été sous-estimées ?

- Perception de tsunamis et sismicité historiques sur le plan local vs. mémoire planétaire des Séismes Géants «Megathrust» et tsunamis
- Consensus, concepts et jargon:
 couplage partiel & chevauchement frontal des zones de subduction
- Modèles utilisés

très complexes, mais excès de confiance

Leçon:

Nécessité de regarder à l'échelle mondiale et d'explorer mieux le passé géologique