

## **Tsunamis et Séismes géants de subduction - enseignements des catastrophes de Sumatra, du Chili et du Japon**

En moins de 7 ans, deux catastrophes majeures associant séisme de grande puissance et tsunami trans-océanique ont profondément marqué les esprits par le nombre de victimes et l'ampleur des dégâts générés. En 2004, un tremblement de terre de magnitude supérieure à 9 soulève un tsunami de grande ampleur sur les côtes nord de Sumatra, du sud-ouest de la Thaïlande et de l'Océan Indien. Le nombre de victimes dans les différents pays touchés, dépasse les 220 000. En 2011, le 11 mars, la côte nord-est de l'île de Honshū au Japon, est ravagée par un tsunami dévastateur dû lui aussi à un séisme de magnitude 9. On y déplore plus de 20 000 victimes et le déclenchement d'un accident nucléaire majeur à la centrale de Fukushima Daiichi. Les données géophysiques obtenues suite à ces deux catastrophes, ainsi que sur le séisme et tsunami du Maule au Chili en 2010, procurent une vision nouvelle des ruptures sismiques géantes de subduction et nous imposent de réviser au plan mondial notre évaluation des risques dus à ce type d'évènements.

### *Le séisme et tsunami d'Aceh au nord de Sumatra*

Au lendemain de Noël 2004, le 26 décembre, l'Indonésie, le sud de la Thaïlande et le pourtour de l'Océan indien furent dévastés par le tsunami déclenché par un séisme de magnitude Mw 9.1 à 9.3 (le 2 ou 3ème plus puissant enregistré par des instruments modernes). L'épicentre était localisé en mer au large de la pointe nord de Sumatra. Dans cette région, la plaque océanique australo-indienne passe sous la plaque eurasiatique. Elle s'enfonce en subduction le long d'une faille appelée méga-chevauchement. C'est cette faille qui a rompu en décembre 2004, puis, juste au sud, en mars 2005 (séisme de Nias, Mw 8.7). Les enregistrements des réseaux sismologiques mondiaux, ceux de l'onde de tsunami à travers l'océan indien, ainsi que les mesures de déformation par GPS à l'échelle régionale, ont permis de décrire la façon dont le séisme s'est produit. L'initiation de la rupture s'est faite à l'aplomb de l'épicentre, puis s'est propagée vers le nord sur plus de 1000 km, cassant successivement plusieurs segments de la zone de subduction. Le glissement n'est pas homogène, mais présente des pics dépassant 20 m sur plusieurs «aspérités sismiques». L'ensemble du phénomène de glissement sur la faille, a duré une dizaine de minutes, temps nécessaire pour qu'il se propage du nord au sud sur un millier de km. Le peu de données géophysiques en champ proche (au voisinage immédiat de la faille rompue) laisse un certain nombre d'incertitudes. En particulier, il n'est pas démontré que la faille a rompu jusqu'à la fosse, même si cela est probable au vu de des caractéristiques du tsunami. On verra que les mesures de déformation sur les séismes chiliens et japonais lèvent cette incertitude.

### *Le séisme du Maule au Chili central*

Le séisme du 27 février 2010 (Mw 8.8) a rompu la partie superficielle de la zone de subduction entre les plaques Amérique du Sud et Nazca, cette dernière plongeant sous la marge continentale chilienne. La rupture a déclenché un tsunami sur les côtes proches avec une inondation de hauteur moyenne 5m, dépassant localement 10m. Les pertes humaines (environ 560 victimes) ont été limitées par la «culture sismique» présente dans la société chilienne : les immeubles modernes ont bien résisté et les habitants des villages côtiers, avertis par les ondes sismiques, ont souvent eu le temps de rejoindre les hauteurs avant les premières vagues. Sur la subduction chilienne, la convergence rapide (près de 7 cm/an) génère un séisme de magnitude 8 ou plus tous

les dix ans. Le plus puissant séisme enregistré, de magnitude Mw 9.5, s'est produit en 1960 juste au sud de celui de 2010. Deux lacunes sismiques identifiées au Chili semblaient mures pour une rupture prochaine: la lacune d'Arica au nord, siège du séisme et tsunami de 1877, et la lacune de Concepción au centre, siège du séisme de 1835 vécu par C. Darwin. Dans cette région, les mesures géodésiques faites avant 2010 montraient que la déformation élastique s'accumulait au-dessus du méga-chevauchement sans aucun glissement asismique, rendant probable une rupture imminente de magnitude 8 à 8.5. Le risque était donc bien identifié. L'épicentre du séisme de 2010 est localisé au milieu de la lacune de Concepción. Il s'est propagé à la fois vers le sud et vers le nord, de manière à rompre la totalité du segment de 1835, et même au delà. C'est le premier séisme géant de subduction pour lequel un réseau dense de stations GPS, placées juste au dessus de la faille, a enregistré la déformation du sol en champ proche. Ces mesures, combinées à l'interférométrie radar, permettent de décrire finement la rupture : la zone de subduction a cassé sur environ 500 km de longueur avec une répartition du glissement cosismique hétérogène sur le plan de faille. Il dépasse 15 mètres sur deux aspérités sismiques, de part et d'autre de l'épicentre. Pour la première fois, on a pu démontrer de façon sûre qu'un tel séisme pouvait rompre tout l'interface de subduction jusqu'à son émergence en surface au niveau de la fosse océanique, après s'être nucléé à des profondeurs de plusieurs dizaines de kilomètres.

### *La catastrophe de Tōhoku au Japon*

L'ampleur de la catastrophe qui a frappé le Japon le 11 mars 2011 surprend pour un pays a priori très bien préparé aux séismes et tsunamis. Celui-ci a été extrêmement violent sur la côte nord-est de Honshū, avec de hauteurs d'inondations dépassant la dizaine de mètres (plus de 30 m localement). Il a fait plus de 20 000 victimes. Grâce à la forte densité d'instruments géophysiques déployés au Japon une quantité de données sans précédent permet déjà de décrypter ce séisme dans ses plus fins détails. Le séisme de Tōhoku présente les mêmes caractéristiques d'ensemble que ceux de Sumatra et du Chili: magnitude 9 à 9.1; zone de répliques s'étendant sur environ 400 km; rupture du méga-chevauchement de subduction (ici entre la plaque Pacifique et la micro-plaque Okhotsk) depuis 50 km de profondeur jusqu'à la fosse du Japon. Les stations GPS réparties sur l'île de Honshū ont enregistré le rebond élastique lors du séisme, avec des déplacements vers l'est de 3 à 4 m face à l'épicentre et s'atténuant de part et d'autre. Les géophysiciens japonais ont même mesuré la position de stations sous-marines proches de la fosse: situées juste au dessus de la zone de fort glissement sur la faille, elles se sont déplacées vers l'est de 15 à 25 m et soulevées de plusieurs mètres. La modélisation de ces données géophysiques montre qu'au lieu de s'étendre largement à partir du foyer du séisme comme à Sumatra et au Chili, le glissement sur la faille est avant tout resté concentrée sur une zone d'une centaine de kilomètres, où il a atteint des valeurs extrêmes de plus de 50m. Comme au Chili, cette aspérité sismique est très superficielle et le glissement fort est arrivé jusqu'à la fosse. Contrairement à ce qui était admis par beaucoup de modèles mécaniques, il ne s'est pas atténué vers la surface sous le prisme d'accrétion sédimentaire. Il a ainsi produit en quelques secondes à dizaines de secondes un très fort soulèvement du fond marin (plusieurs mètres) responsable de l'ampleur du tsunami.

## *Vers une vision plus globale du risque*

Les trois exemples récents démontrent la forte variabilité des ruptures sismiques géantes de subduction. Alors que les séismes courants y sont de magnitude 7.5 à 8.5 et cassent des segments de faille de la centaine de km, les séismes géants se superposent et traversent cette segmentation. Au sein même de ces évènements on voit une variabilité dans l'espace, avec un glissement se répartissant sur plus de mille km à Sumatra et cassant plusieurs aspérités, et à l'opposé, une rupture très concentrée au Japon. Le séisme de Sumatra a profondément surpris car arrivant après une période de 40 ans sans évènement équivalent, et parce qu'il a rompu une section de la zone de subduction que beaucoup pensaient aismique et inapte à produire de grandes ruptures. Le séisme chilien était lui attendu car situé dans une lacune sismique identifiée, mais la rupture a dépassé la limite des évènements plus anciens. Au nord-est du Japon, la probabilité d'un séisme de magnitude 9 n'était pas prise en compte dans les plans d'exposition au risque uniquement basés sur l'histoire sismique récente – des séismes de magnitude inférieure à 8 – trop parcellaire. Il faut probablement remonter en l'an 869 pour trouver un évènement équivalent à celui de 2011. L'évaluation était aussi oblitérée par une vision physique des zones de subduction qui considérait qu'elles ne pouvaient pas rompre en un seul évènement depuis 40-50 km de profondeur jusqu'à la fosse. Il semble donc que les séismes géants de subduction puissent traverser les barrières standards. Ces séismes seraient moins fréquents que ceux dus au fonctionnement «routinier» de la subduction et relâcheraient les contraintes accumulées sur des périodes plus longues (centaines ou millier d'années).

Si l'on s'attache à une vision globale donnée par la connaissance de tous les évènements au plan mondial, ainsi qu'à la morphologie générale des zones de subduction, on ne peut plus maintenant exclure la possibilité de séismes géants sur aucune des zones de subduction du globe. Les analyses locales détaillées, qui ont montrées leurs limites au Japon, doivent être reconsidérées: l'approche utilisée vise trop souvent à rechercher la plus petite source sismique à même d'expliquer les effets des séismes ou tsunamis passés, plutôt que d'explorer l'ensemble des sources possibles, y compris les plus grandes et donc les plus pénalisantes.

Sur le territoire français, aux Antilles, sises au dessus de la subduction Caraïbes, la même approche réductrice rendait jusque là difficile d'envisager une rupture totale du méga-chevauchement sur plusieurs centaines de kilomètres de longueur avec un séisme de magnitude supérieure à 8 et éventuellement un grand tsunami associé. Suite à la catastrophe japonaise, cette hypothèse devra être maintenant testée de façon plus approfondie.

## **Encadré - Cycle sismique, faille et magnitude**

Les plaques tectoniques se déplacent lentement (quelques mm à cm par an) à une vitesse constante à l'échelle du million d'années. Les failles marquant le contact entre deux blocs ne sont pas lisses. Des rugosités ralentissent le glissement et la faille se bloque; mais, à plus grande échelle, les plaques continuent néanmoins leur mouvement d'ensemble. Comme un ressort qui se comprime, la bordure de plaque accumule la déformation élastique. En fonction de la vitesse des plaques en présence, cette période intersismique peut durer une ou plusieurs centaines d'années. La pression augmente progressivement jusqu'à être suffisante pour rompre finalement les aspérités : la faille glisse brutalement de plusieurs mètres à dizaines de mètres et un séisme se produit. Puis le cycle recommence inlassablement.

Des lois d'échelles relient taille de la faille (en fait la surface du plan rompu pendant le séisme), ampleur du glissement, et magnitude du séisme : un glissement fort ne pourra se produire que sur une grande faille, et génèrera un séisme de magnitude élevée. Ainsi, une rupture de magnitude 8 aura typiquement une longueur de 100 à 200 km, et on cassera 400-500 km au moins pour un évènement de magnitude 9. Pour les grands tremblements de terre on utilise la magnitude de moment (notée Mw) qui est directement reliée, par une loi en logarithme, à l'énergie mise en jeu par le séisme. On retiendra que lorsqu'on passe un point de magnitude, par exemple de Mw 7 à Mw 8, l'énergie est multipliée par 30.

## **Encadré - Formation d'un tsunami**

Un tsunami est produit par le mouvement vertical du fond de la mer, sur une très grande surface. Au cours d'un séisme de subduction, les deux plaques glissent l'une contre l'autre relâchant la déformation accumulée pendant la période intersismique. C'est le rebond élastique. Le mouvement sur la faille située en profondeur fait monter brusquement le fond marin, produisant une bosse très plate (quelques mètres de haut) et très étendue. La surface de l'eau reproduit cette bosse, car l'eau n'a pas le temps de s'échapper sur les cotés dans les quelques dizaines de secondes que dure le glissement sismique. Puis cette bosse va s'étaler aux alentours, et se propager dans l'océan, à grande vitesse, plusieurs centaines de km/h. Approchant des côtes, cette onde de tsunami ralentit et s'amplifie en hauteur à cause de la remontée du fond marin. L'amplitude, qui était métrique en pleine mer, va atteindre et même dépasser la dizaine de mètres. C'est donc une vague de cette hauteur, mais de grande longueur d'onde (plusieurs km), qui va produire l'inondation des zones côtières.

## **Encadré - Les grands tsunamis de subduction des derniers siècles**

> Associer à cet encadré : *carte des grands séismes et tsunamis (Fig. 1)*

Hormis le séisme de 2004 à Sumatra, les tsunamis géants des cent dernières années sont pour la plupart dus à des séismes de magnitude 9 sur une des zones de subduction péri-Pacifique. Les vitesses tectoniques y accumulent la déformation élastique à un taux compris entre 5 et 10 m par siècle rendant ainsi fréquente l'occurrence de grands tremblements de terre. Le milieu du

vingtième siècle fut marqué par quatre des plus grands séismes connus, tous responsables de tsunamis trans-Pacifique : Kamtchatka en 1952 (Mw 9, plus de 10000 victimes), Aléoutiennes en 1957 (Mw 9.1), Chili en 1960 (Mw 9.5, 2000 victimes au Chili), Alaska 1964 (Mw 9.2). Lors du séisme de 1960, la rupture de l'interface de subduction sur une longueur de presque mille kilomètres déclencha un tsunami qui produisit 24h après, une vague de plus de 6m sur la côte est du Japon où on déplora plus de 130 victimes. Plus en arrière, retenons les catastrophes de 1906 (Equateur et Colombie), 1868 (sud Pérou) et 1877 (nord Chili), et le séisme des Cascades en 1700 au large de l'Oregon et Washington (USA) et de la Colombie Britannique (Canada), dont les effets au Japon sont établis par les écrits historiques. Au Japon même, de nombreux tsunamis aux effets dévastateurs plus locaux sont dus à des séismes de subduction de magnitude plus modérée, entre 8 et 9: Nankai (1946), Tonankai (1944), Kanto (1923), Sanriku (1896) par exemple.

### **Encadré GRAPHIQUE (ou pleine page d'illustration) - Les ruptures des séismes géants de Sumatra, du Chili et du Japon**

*Je vous suggère d'associer sur une même page les 3 cartes (Fig 2a 2b 2c) des zones de ruptures des séismes de Sumatra, du Japon et du Chili, plus le schéma en coupe (Fig 2d).*

*Deux versions possibles pour 2a 2b 2c, avec ou sans les épencentres des répliques (plus simple et plus lisible sans). A vous de voir.*

*Le texte (légende) à associer à ces figures est le suivant :*

Géométrie des failles majeures en jeu lors des séismes de Sumatra, du Chili et du Japon. Les zones en rose visualisent la projection en carte de la rupture sur la faille en profondeur. Les aspérités de fort glissement sont figurées en plus foncé. L'étoile rouge marque l'épicentre du séisme. La coupe, qui correspond plutôt au cas du Chili, montre schématiquement la géométrie en profondeur de la zone de subduction et des ruptures des séismes du type méga-chevauchements.

#### **Bibliographie :**

- R. McCaffrey, Global frequency of magnitude 9 earthquakes, *Geology*, vol. 36, pp. 263-266, 2008.
- K. Heki, A tale of two earthquakes, *Science*, vol. 332, pp. 1390-1391, 2011.
- K. Satake, B. Atwater, Long-term perspectives on Giant earthquakes and tsunamis at subduction zones, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci*, vol. 35, pp. 349-374, 2007.
- Simons et coll., The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries. *Science*, vol. 332, pp. 1421-1425
- Vigny et coll., The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS. *Science*, vol. 332, pp. 1417-1421, 2011.

## FIGURES et ILLUSTRATIONS

- Figures en copie (versions basse résolution) dans les pages qui suivent
- L'ensemble des figures, certaines en plusieurs versions, sont disponibles en ligne :

<http://www.ipgp.fr/~lacassin/Encyclopedia/>

Vous y trouverez à la fois des versions JPEG et des versions ILLUSTRATOR.

Les cartes sont pour moi en version définitive.

Par contre la coupe schématique (Figure 2d) est un peu brouillon. Elle pourrait être avantageusement redessinée, peut être en 3D (voir le fichier illustrator). Je suppose que votre graphiste peut la reprendre.

- J'ai également inclus deux propositions d'illustrations photographiques (photos d'agence):

- Je trouve en particulier très marquante: celle où le tsunami est en train d'envahir d'aéroport de Sendai (fichier Sendai5.jpg). Le crédit est : Kyodo News / Associated Press
- Pour la deuxième (Natori3.jpg) le crédit est REUTERS

Vous pouvez bien sûr m'en proposer d'autres.

J'ai aussi des photos perso des suites du séisme et tsunami du Chili. Mais elles sont à mon avis moins marquantes pour le grand public.

Je vous suggère de reprendre cet aspect illustration ensemble fin août - début septembre.

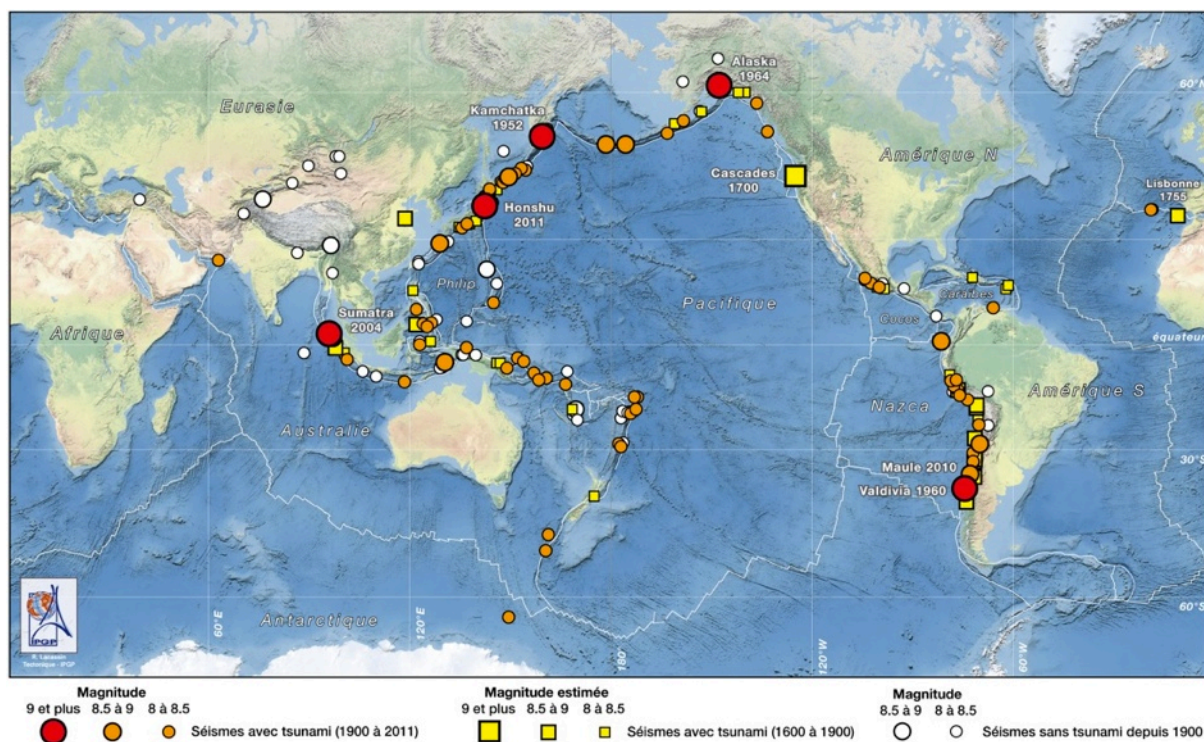
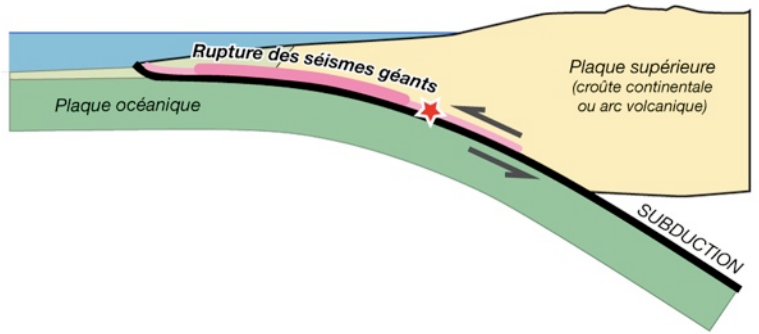
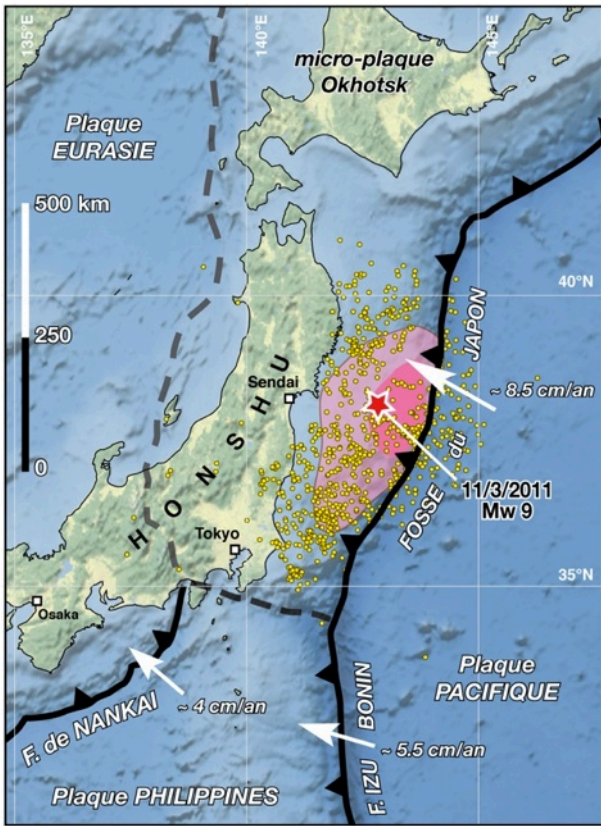
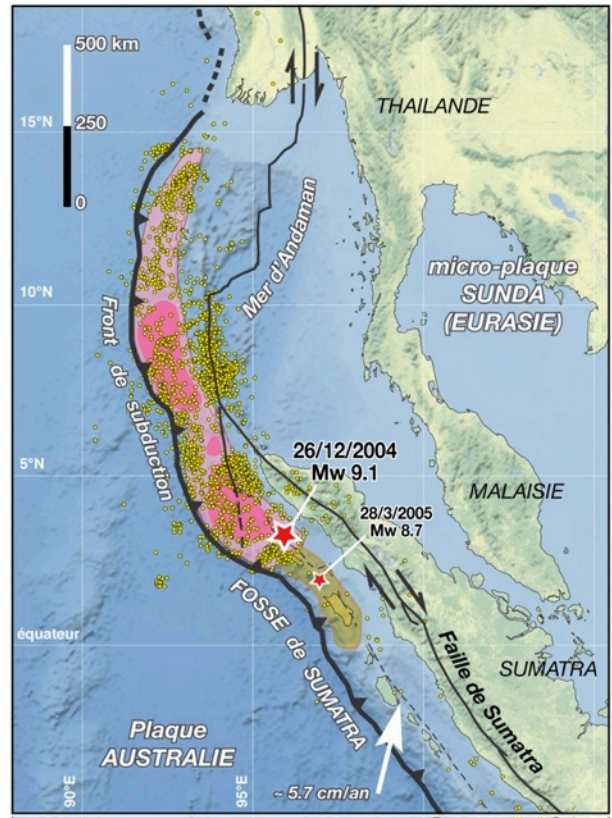
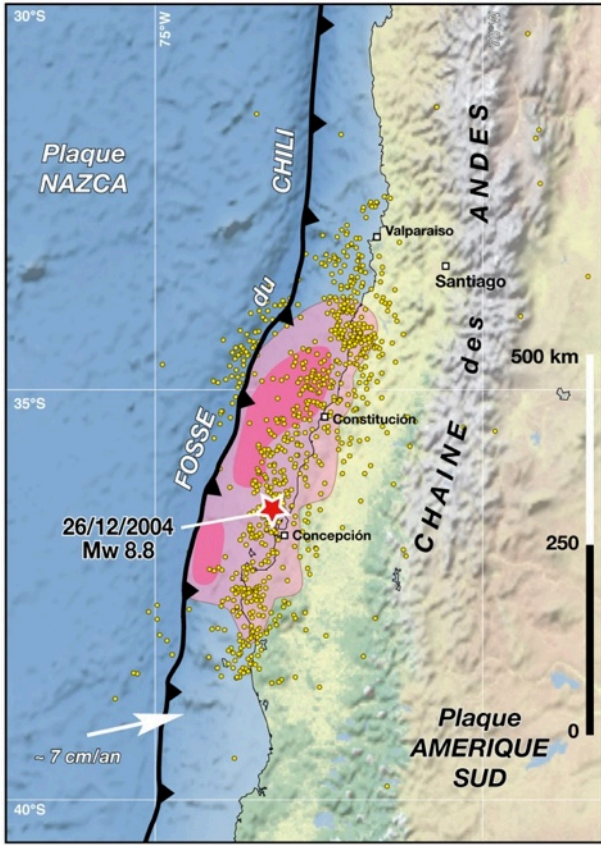


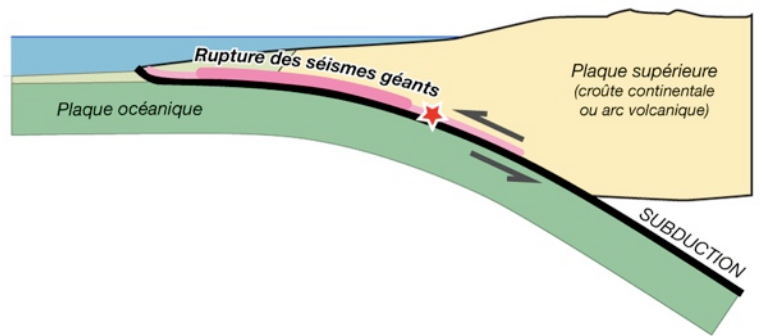
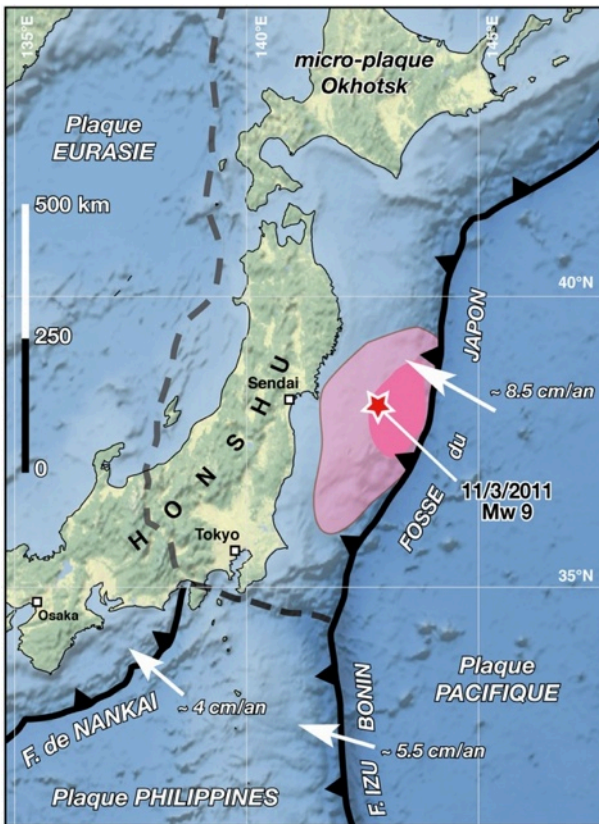
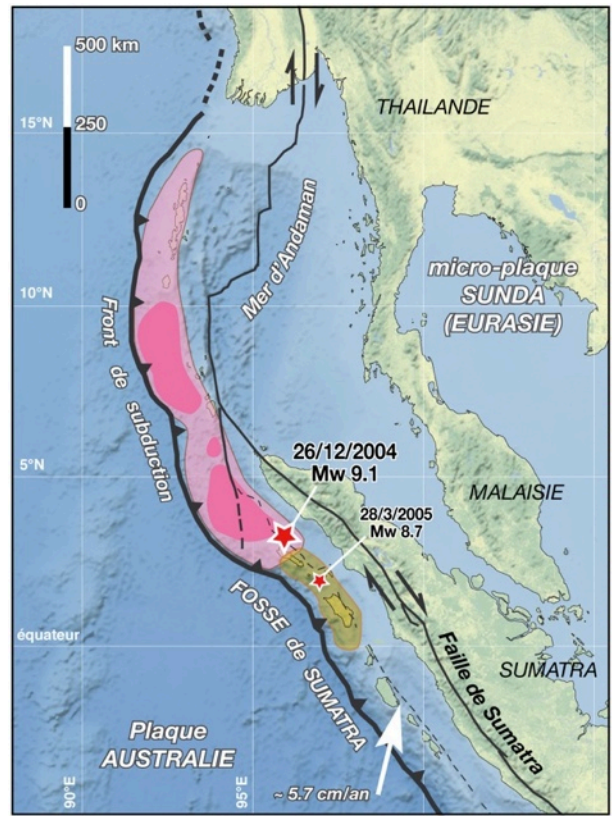
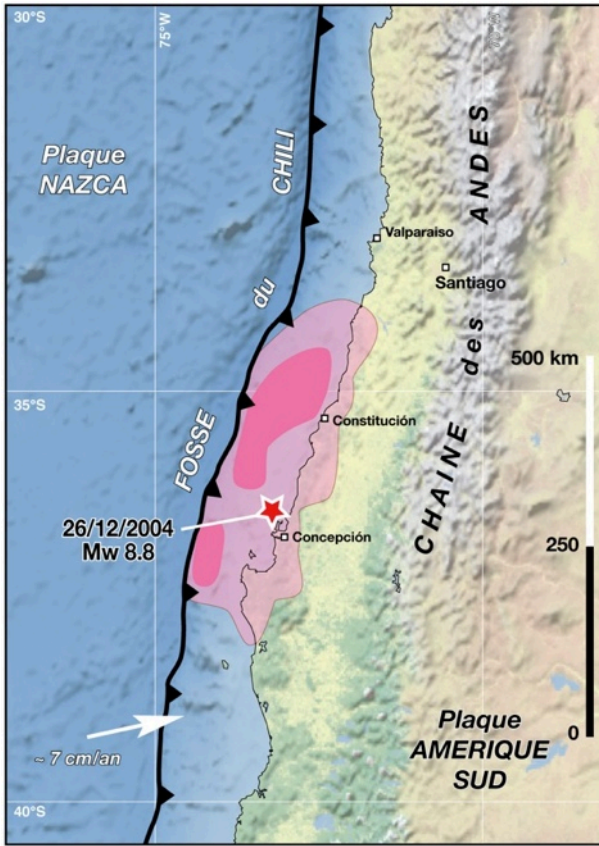
Fig 1 (encadré tsunamis des siècles derniers)

Les séismes de magnitude supérieure à 8, responsables de tsunamis des siècles passés (depuis 1600). Pour comparaison, les séismes sans tsunamis sont figurés en blanc.



Figures 2a 2b 2c 2d - version avec épicentres des répliques





Figures 2a 2b 2c 2d - version sans épacentres des répliques



Aéroport de Sendai (Kyodo News - AP)



Natori (Reuters)