

En fait, tout se passe comme si l'arc insulaire japonais était un énorme bloc de caoutchouc qui se contracte sous la poussée de la plaque pacifique, et qui reprend entièrement sa forme lors d'un grand séisme. Si la subduction nipponne fonctionne ainsi, le couplage sismique dans la fosse du Japon, c'est-à-dire la fraction de l'avance de la plaque pacifique qui sera compensée par les futurs séismes, ne peut qu'être égal au couplage mécanique, c'est-à-dire à la fraction de l'avance de la plaque compensée par la déformation enregistrée en période intersismique.

De ces considérations, les sismologues ont déduit qu'une énorme énergie élastique s'accumulait dans la faille de la fosse du Japon, qui serait relâchée un jour, probablement par un grand séisme.

Toutefois, les circonstances du séisme de magnitude 7,6 qui se produisit en 1994 au Nord de l'île de Honshu les ont induits en erreur. Le réseau GPS japonais enregistre alors un vaste mouvement postsismique, qui crée l'impression que des mouvements asismiques sont possibles le long de la faille de la fosse du Japon. Naturellement, les sismologues se sont demandé si ces glissements sans secousses pouvaient absorber le déficit sismique. Ils ont vite incliné à le penser, quand, en 1997, Kosuke Heki, de l'Université d'Hokkaido, montra

que le mouvement postsismique qui se produisit dans le Tohoku équivalait à un séisme de magnitude 7,7!

L'explication suivante du déficit sismique de la faille de la fosse du Japon s'est alors imposée. Après chaque séisme, la plaque en subduction continue à glisser aux environs de la zone venant de rompre : elle dissipe ainsi le reste de l'énergie élastique stockée dans la déformation, avant de se bloquer à nouveau en quelques années. Même si l'existence de tels mouvements de relaxation est avérée, depuis le 11 mars 2011, il est clair que cette explication ne suffit pas !

Les aspérités d'un séisme

L'existence le long du plan de subduction de la fosse du Japon d'un couplage sismique proche de 100 pour cent est désormais établie. Du reste, des simulations réalisées récemment à partir des données GPS à l'*Earth Simulator* de l'Agence japonaise pour les sciences et technologies marines (JAMSTEC) l'ont confirmé – à la nuance près que, près du point triple du Japon, la plaque pacifique semble glisser sous la plaque eurasiennne.

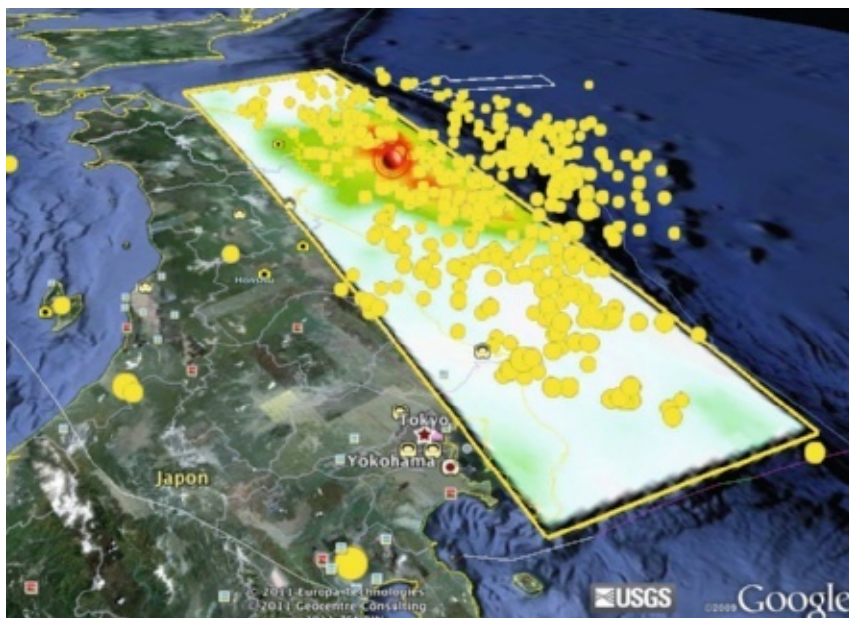
Malheureusement, ce genre de calcul ne permet pas d'anticiper l'étendue

des ruptures. Il faudrait pour cela connaître d'avance la longueur de faille concernée. Or non seulement on l'ignorait dans le cas du mégaséisme du 11 mars 2011, mais la possibilité d'une rupture affectant le plan de faille depuis le point triple (au Sud) jusqu'à la zone du séisme de 1896 (au Nord) n'avait pas été imaginée.

En effet, les sismologues considéraient cela comme improbable à cause de la segmentation supposée de la faille de la fosse du Japon. L'idée qu'une faille est segmentée en tronçons rompant indépendamment les uns des autres s'applique en effet souvent, tout particulièrement aux failles en décrochement (verticales et coulissantes), telle celle de San Andreas, aux États-Unis ; elle semble pouvoir l'être aussi à certaines failles de subduction. Ce serait le cas pour la faille de Nankai, où la subduction s'effectue le long de deux segments principaux, rompant en général à quelques heures ou quelques années d'intervalle, bien qu'il soit arrivé qu'ils rompent ensemble.

Il apparaît aujourd'hui que la faille de la fosse du Japon serait mieux décrite à partir de la notion plus floue d'aspérité. On désigne ainsi les parties du plan de faille où le glissement est le plus important lors des grands séismes (voir la figure 4). Ces zones de glissement maximal sont aussi censées être les zones de blocage maximal en période intersismique. La magnitude d'un séisme dépend alors aussi bien de l'étendue du plan de faille que de la taille de l'aspérité et de l'amplitude du mouvement.

Ainsi, le séisme de magnitude 9,1 du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien a été provoqué par une rupture qui, durant neuf minutes, s'est étendue sur 1 200 kilomètres. Celui du Tohoku a été beaucoup plus bref et concentré : il semble que l'essentiel de l'énergie ait été libéré en trois minutes seulement par une rupture longue de 500 kilomètres. Plus précisément, les calculs réalisés par diverses équipes à partir des données sismologiques et géodésiques (GPS) montrent que des glissements de 20 à 40 mètres ont été atteints sur 200 kilomètres de part et d'autre de l'épicentre, situé face à Sendai. Mis en ligne sur le site Internet *Tohoku-oki* dédié au séisme du 11 mars 2011, plusieurs de ces résultats suggèrent en outre que la zone de fond de mer dont le mouvement a créé le tsunami a été d'extension réduite ; elle serait située près de la fosse, comme lors du séisme de 1896.



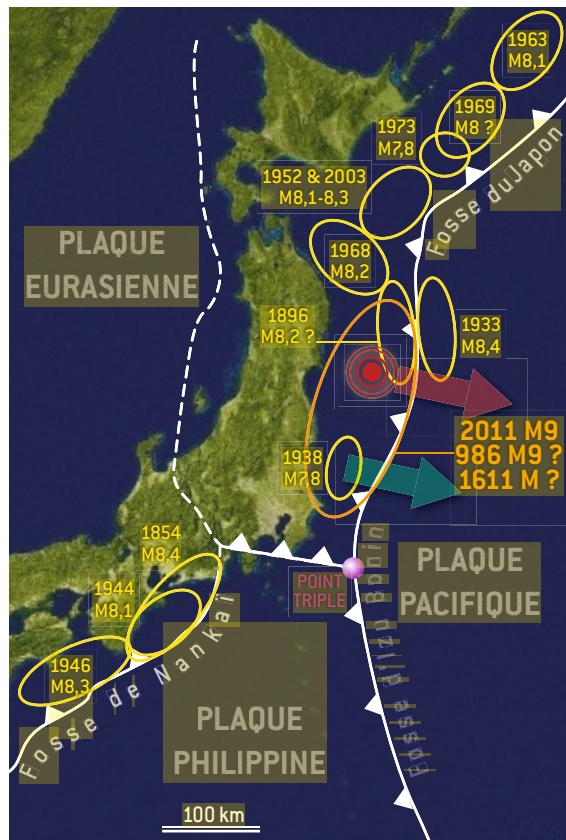
4. LE MÉGASÉISME DU 11 MARS 2011 résulte de glissements le long d'un plan de faille de plus de 500 kilomètres de long, dont la projection à la surface est marquée ci-dessus par un cadre jaune. L'aspérité de la faille mise en jeu par le séisme, c'est-à-dire la zone où les mouvements ont été maximaux – supérieurs à dix mètres –, est indiquée en rouge et vert ; elle ne mesure que 200 kilomètres de long. Tandis que l'épicentre du séisme est signalé par un gros point rouge, les répliques le sont par des points jaunes.

Que peut-on déduire de ce tableau quant à la fréquence des mégaséismes sur la faille de la fosse du Japon ? À une vitesse de subduction de neuf centimètres par an et si l'on suppose que seulement un quart du mouvement est compensé par les séismes séculaires, un mouvement de 20 à 30 mètres correspond à quelque 300 ou 400 ans d'accumulation de contraintes sur la faille, et donc à un intervalle inter-sismique au moins aussi grand.

Par ailleurs, le suivi sismographique depuis 1896 avait plutôt conduit les sismologues à définir des zones de rupture d'une taille de 100 à 200 kilomètres de long. Le plan de rupture du mégaséisme du 11 mars 2011 est bien plus long et son aspérité s'étend – sans les recouvrir complètement – sur les zones de rupture de plusieurs séismes précédents. Il apparaît en plus que la partie centrale de la rupture (là où le mouvement fut maximal) semble s'être déjà à nouveau bloquée, tandis qu'un mouvement postsismique accompagné de nombreuses répliques a commencé au Sud, qui rappelle celui observé au Nord en 1994.

Risque augmenté sur la plaque pacifique

Tous ces mouvements ne peuvent qu'avoir modifié la répartition des contraintes dans la croûte autour de la zone de rupture. Il en résulte une augmentation du risque de séisme dans la plaque pacifique (de la même façon que le séisme de 1896 a favorisé le séisme de 1933) et sur les parties adjacentes du plan de subduction, où se produisent aussi des répliques. Plus au Sud, les fosses de Sagami, où s'est produit le grand séisme de Kanto, en 1923, et de Suruga, où le dernier séisme date de 1854, sont également dans la zone d'influence. La situation y est cependant compliquée par la présence du point triple. Les calculs effectués montrent que l'évolution peut être différente sur chaque portion de faille ; il en résulte que sans carte précise du glissement, il n'est pas encore possible d'apprécier l'évolution du risque dans cette région.



5. L'HISTOIRE SISMIQUE JAPONAISE est bien documentée. Les zones concernées par les séismes de subduction les plus récents sont reportées sur cette carte tectonique du Japon (on a indiqué pour chacun d'eux, l'année du séisme et sa magnitude). On note que deux séismes centenaires, l'un sur la plaque eurasiennne (1896) et l'autre sur la plaque pacifique (1933) ont précédé le mégaséisme du 11 mars 2011. Deux séismes millénaires (986 et 1611) semblent aussi avoir été des mégaséismes. Tandis que le glissement maximal vers l'Est de la plaque eurasiennne (mouvement cosismique) pendant le mégaséisme est indiqué par une flèche rouge, le mouvement qui a suivi au Sud (mouvement postsismique) est indiqué par une flèche verte.

Quoi qu'il en soit, le séisme du 11 mars 2011 montre que des ruptures géantes sont possibles sur la faille de la fosse du Japon. Cette possibilité était déjà présente à l'esprit de certains chercheurs nippons, qui l'avait proposée pour la fosse des Kourilles (qui prolonge celle du Japon au Nord)... Une étude de chercheurs de l'AIIST (le Centre national pour la science et la technologie avancés, le plus grand organisme de recherche du Japon) a en effet montré en 2003 que les dépôts de sable laissés sur certaines côtes japonaises par des tsunamis préhistoriques pouvaient s'étendre en plaine plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. Pareils dépôts sont sans commune mesure avec les traces laissées par les tsunamis des séismes de 1952 et 1973, pourtant de magnitude respectable (8,1 et 7,8). Les chercheurs de l'AIIST proposaient donc

que des séismes millénaires géants, correspondant à la rupture simultanée de deux segments ou plus de la faille, se sont produits occasionnellement au cours des derniers millénaires, en plus de séismes séculaires dans chaque segment.

La subduction des Cascades, face à la côte de l'Amérique du Nord, entre l'île de Vancouver et le Nord de la Californie, fournit un cas remarquable d'un tel mégaséisme à venir. Malgré notre connaissance limitée de l'histoire sismique de la région, les sismologues ont pu montrer que l'on doit s'attendre à des séismes de magnitudes supérieures à 9 et aux tsunamis d'une trentaine de mètres correspondants. Toutefois, les intervalles entre ces mégaséismes restent mal définis. Un tsunami arrivé au Japon le 26 janvier 1700, et qui n'avait pas été précédé d'un tremblement de terre, a cependant permis de connaître la date du dernier. La probabilité qu'un tel mégaséisme se produise dans les 50 ans à venir serait de dix pour cent.

Dans la fosse du Japon face au Tohoku, les séismes de 1611 et de 869 pourraient correspondre à de tels événements. Des travaux menés par l'Université de Sendai ont mis en évidence en 2001 que le séisme de 869 a produit un grand tsunami dans la baie de Sendai, lequel a laissé des dépôts de sable jusqu'à quatre kilomètres à l'intérieur des terres. Les chercheurs ont montré que de tels événements exceptionnels se sont produits tous les 1 000 ans environ aux époques préhistoriques, et conclu que le suivant était imminent. Il a eu lieu le 11 mars 2011.

S'il y a désormais un consensus sur ce point, quelles conséquences pratiques en tirer ? Peut-on se protéger contre un tel mégaséisme et son tsunami ? D'un point de vue sismologique, l'histoire de la recherche sur la subduction de la plaque pacifique sous le Japon montre qu'il faut réévaluer régulièrement l'aléa sismique en fonction des nouvelles connaissances. Plus globalement, il se confirme une fois de plus que la pertinence des modèles scientifiques et de leurs prévisions dépend des ingrédients que l'on y met. Or on sait rarement tout d'avance...

Rendez-vous sur www.pourlascience.fr

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.
- Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur le site.
- Recherchez et commandez les archives parues depuis 2004 de *Pour la Science* et des *Dossiers Pour la Science*.
- Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique