

de l'autre côté de la fosse sur la plaque pacifique. Il ne peut avoir contribué à la compensation du mouvement de subduction de la plaque pacifique.

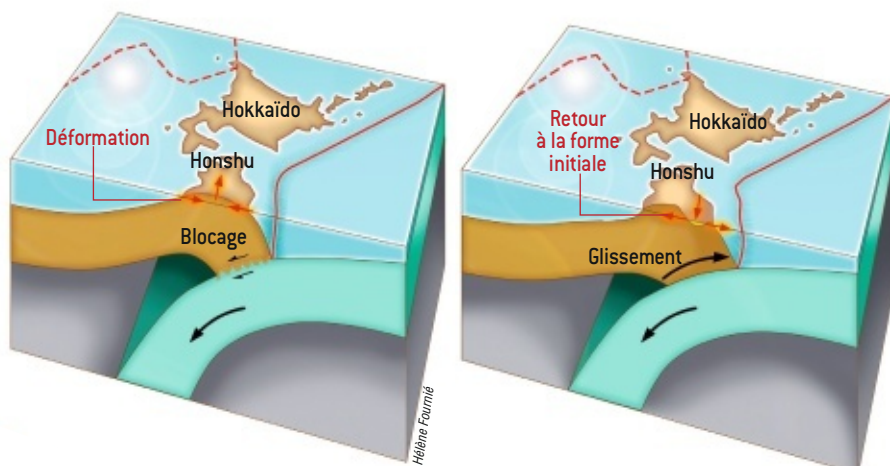
Les sismologues voyaient deux explications possibles au déficit sismique : soit l'essentiel de l'avance de la plaque est compensé par des glissements aismiques, c'est-à-dire sans secousses ; soit il manque de gros séismes dans l'historique sismique nipponne. Cette seconde explication passait pour improbable, l'histoire de l'activité sismique au Japon étant l'une des mieux connues au monde. Quatre événements majeurs sont connus pour la partie Nord du Tohoku (1896, 1677, 1611 et 869), mais aucun séisme majeur ne semble s'être produit dans la partie Sud depuis 800 ans au moins. C'est donc l'hypothèse d'un glissement au moins en partie aismique qui a été retenue.

La construction des six réacteurs nucléaires à Fukushima-Daïchi dans les années 1970, et de quatre autres à Fukushima-Daïni au début des années 1980, passa alors probablement pour une bonne idée par rapport à d'autres implantations dans l'archipel nippon...

La découverte d'une... faille dans cette logique viendra de la mesure de la déformation géométrique de l'île de Honshu. L'analyse des données de la géodésie classique (non satellitaire) a en effet révélé que depuis les débuts de l'ère Meiji (1868-1912), le Nord du Japon subit une déformation liée à l'accumulation des contraintes dues à la subduction. Or si seulement un quart (la valeur supposée du couplage sismique) du mouvement de la plaque pacifique était compensé par les séismes connus, cette déformation aurait dû être bien plus faible...

En 1994, les Japonais décident, notamment pour cette raison, d'implanter un réseau dense de stations GPS de surveillance satellitaire permanentes. En trois ans, 1000 stations sont opérationnelles. Les données qu'elles livrent confirment une importante déformation liée à l'accumulation de contraintes sur la faille de subduction.

Comment interpréter ce fait ? En 1983, James Savage, de l'Université Purdue aux États-Unis, avait donné les deux principes du raisonnement permettant de prévoir les effets de la subduction. Le premier est qu'à long terme, la croûte terrestre ne se déforme de façon notable qu'à proximité de la faille ; le second est que la déformation des blocs de part et d'autre de la faille est élastique et réversible.



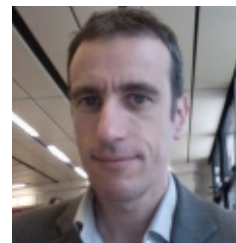
3. CES COUPES DE HONSHU ET DE LA FOSSE DU JAPON (plan de coupe indiqué sur la figure 2) montrent (à gauche) le blocage, avant le séisme, de la plaque pacifique sur la plaque eurasiennne portant l'île de Honshu, qui se raccourcit de plusieurs centimètres par an, tout en se bombant à mesure qu'elle accumule des contraintes et que le bord de la plaque eurasiennne plonge. Pendant le séisme (à droite) et juste après, ces contraintes se relâchent et l'île de Honshu reprend sa surface et sa forme initiales. C'est la brusque remontée du bord de plaque qui crée un tsunami.

La conséquence immédiate de cette logique est que si, pendant les périodes dénuées de séismes majeurs, l'archipel nippon a été contracté par la subduction (d'environ deux centimètres par an), il reprendra par à-coups la surface perdue à la faveur de grands séismes. Ainsi, au Japon, la déformation enregistrée en période intersismique détermine la proportion du mouvement de subduction qui se traduit par une déformation de la croûte ; cette proportion mesure le « couplage mécanique de la subduction ». Dans le cas d'une subduction aismique, ce couplage est nul ; il est de 100 pour cent quand le contact d'une croûte avec la plaque de subduction la bloque entièrement. Dans ce cas, la croûte ne peut que se déformer à mesure que progresse la plaque, phénomène qui trouve nécessairement sa limite un jour (voir la figure 2).

Couplage mécanique de 100 pour cent

Dans des travaux publiés entre 1998 et 2001, une équipe franco-japonaise, dirigée du côté français par Xavier Le Pichon, du Collège de France, a montré que le long du plan de subduction de la fosse du Japon, le couplage mécanique est de 100 pour cent. Selon ces chercheurs, cette valeur se maintient jusqu'à environ 50 kilomètres de profondeur, c'est-à-dire presque jusqu'à la verticale de la côte. Il résulte de cette découverte que le modèle de H. Kanamori d'un couplage sismique de 25 pour cent dans la fosse du Japon ne tient plus.

L'AUTEUR



Pierre HENRY, géophysicien, est directeur de recherches au CNRS et travaille au Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (CEREGE), à Aix-en-Provence.

BIBLIOGRAPHIE

S. Mazzotti *et al.*, Full interseismic locking of the Nankai and Japan - West Kurile subduction zones [...], *J. Geophys. Res.*, vol. 105, pp. 13159-13177, 2000.

K. Minoura *et al.*, The Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan, *Journal of Natural Disaster Science*, vol. 23, pp 83-88, 2001.

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.

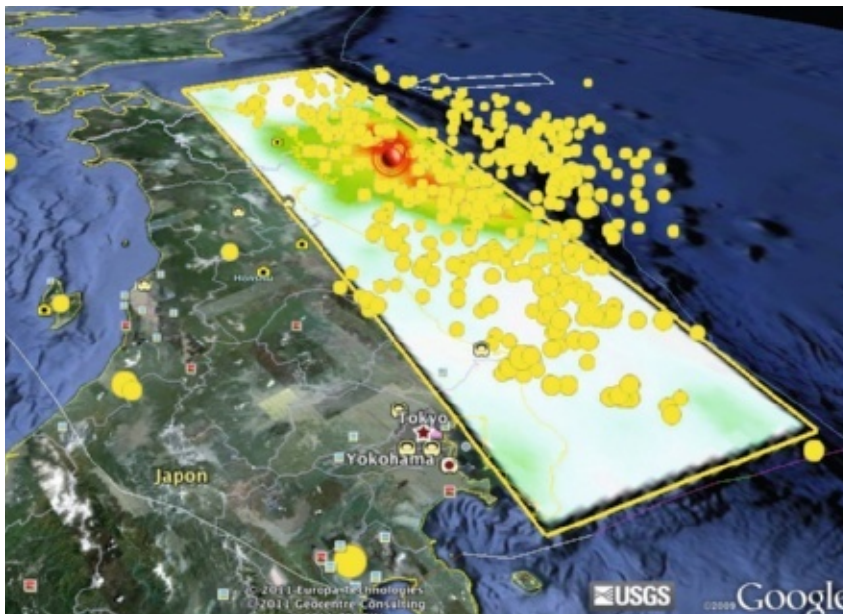
Malheureusement, ce genre de calcul ne permet pas d'anticiper l'étendue

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.