

en 1896, la moitié du Tohoku située au Nord de Sendai avait encaissé un raz de marée comparable à celui qui vient de se produire : sa vague excédait 25 mètres. Ce séisme a longtemps intrigué les sismologues, car la hauteur du tsunami était sans commune mesure avec l'intensité sismique perçue alors, ce qui introduisit un doute sur sa magnitude réelle. Comme celui du 11 mars 2011, ce tsunami était lié à la rupture d'une portion de faille proche de la fosse de subduction située à 120 kilomètres de la côte Nord-Est, là où la plaque pacifique s'enfonce sous le Japon à une vitesse d'environ neuf centimètres par an (voir la figure 2).

Soulignons que tous les séismes comparables à celui du Tohoku ont aussi été créés par le glissement brusque de failles de subduction. Dès lors, se demande-t-on, comment les sismologues ont-ils été

conduits à estimer que la zone de subduction située face à la côte Nord-Est du Japon ne produirait probablement jamais un séisme d'une telle magnitude ?

S'ils se sont laissés abuser, c'est parce que cette zone de subduction a une activité sismique régulière en apparence et distribuée sur l'ensemble de la surface de glissement (le plan de faille). De par le monde, on connaît en effet de nombreuses failles, ou segments de faille, qui n'engendrent que de petits séismes, les deux surfaces en contact ne coulissant pas forcément de façon constante, mais du moins sans grandes secousses. Le segment central de la faille de San Andreas, entre Hollister et Parkfield, en Californie, est dans ce cas. Il en serait de même de certaines failles de subduction, comme la fosse des Mariannes (connue pour sa profondeur de 11 000 mètres), dont, semble-t-il, la zone sismogène est très réduite.

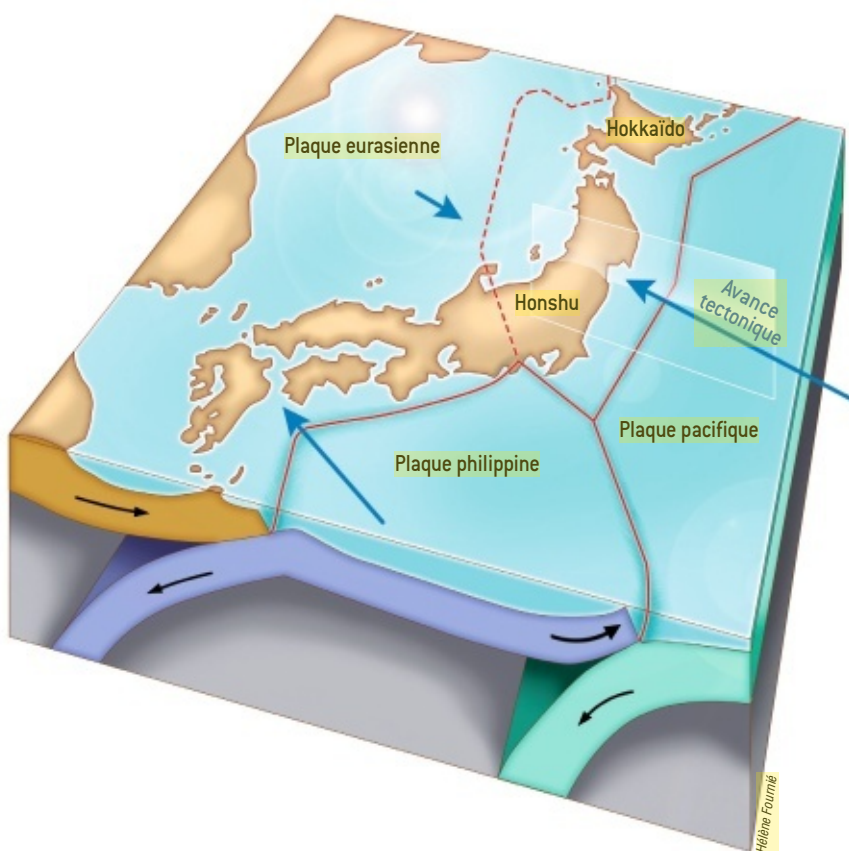
Toutefois, la plupart des failles de subduction produisent de gros séismes, tout en ayant le reste du temps une activité limitée à quelques essais de séismes bien localisés. On dit de telles failles qu'elles sont bloquées, c'est-à-dire que l'essentiel de leur subduction est compensé par le mouvement se faisant à l'occasion de rares mégaséismes. Ces événements majeurs sont suivis de nombreuses répliques. Quand ces mégaséismes arrivent avec une certaine régularité, on les qualifie de séismes caractéristiques. Tel est le cas de la faille de subduction de Nankai, où un *Big one* est attendu.

Premiers calculs du couplage sismique

D'autres failles encore ont un comportement plus complexe, qui ne facilite pas l'estimation du risque. Il en est ainsi de celle de la fosse du Japon. À la fin des années 1960, les modèles de tectonique des plaques avaient déjà fourni une bonne description de la subduction de la plaque pacifique. Les sismologues ont alors pu commencer à estimer le « couplage sismique », qui indique quelle fraction de l'avance de la plaque est compensée par les brusques glissements à l'origine des séismes. Le séisme du 11 mars 2011 aurait ainsi entraîné un glissement le long du plan de faille dépassant la vingtaine de mètres face à Sendai, qui s'est traduit par un déplacement de plusieurs mètres vers l'Est de la côte du Tohoku.

En 1977, Hiroo Kanamori, de l'Institut californien de technologie (Caltech), fut le premier à estimer le couplage sismique de la plaque pacifique. Il obtint un résultat de l'ordre de 25 pour cent, confirmé par tous les travaux qui suivirent. Ainsi, même si la faille de la fosse du Japon produit de forts séismes (jusqu'à 8,2 de magnitude), l'activité sismique est insuffisante pour compenser l'avance de la plaque pacifique. Plus on va vers le point triple situé au Sud, plus l'activité est insuffisante (voir la figure 2).

Dans la zone de subduction de la fosse du Japon, il n'y a donc pas assez de séismes pour compenser la progression de la plaque : les sismologues parlent de déficit sismique. Un détail rendait cette constatation plus inquiétante encore. Le plus gros séisme jamais enregistré dans la zone, le séisme de Sanriku en 1933 (8,4 de magnitude), ne s'est même pas déclenché sur le plan de subduction, mais



2. L'ARCHIPEL NIPPON se trouve sur la ceinture de feu. Cet alignement de volcans, qui borde le Pacifique par le Nord depuis l'Amérique du Sud jusqu'à la Nouvelle-Zélande, coïncide partout avec des frontières de plaques tectoniques et des failles. Au Japon, deux plaques tectoniques – la plaque pacifique au Nord et la plaque philippine au Sud – y passent sous la plaque eurasiennne et la plaque Nord-Amérique. Ces mouvements de subduction ont créé de profondes fosses à l'Est de l'archipel nippon : au Sud, la fosse de Nankai longe l'archipel jusqu'à la région de Tokyo ; elle est reliée par la fosse de Sagami au point triple du Japon, le lieu où se rencontrent les plaques eurasiennne, philippine et pacifique ; de là partent vers le Sud la fosse d'Izu-Bonin et vers le Nord la fosse du Japon. Des failles (en rouge) longent toutes ces fosses, où s'accumulent les contraintes créées par les mouvements de subduction et qui sont responsables de nombreux séismes.

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.

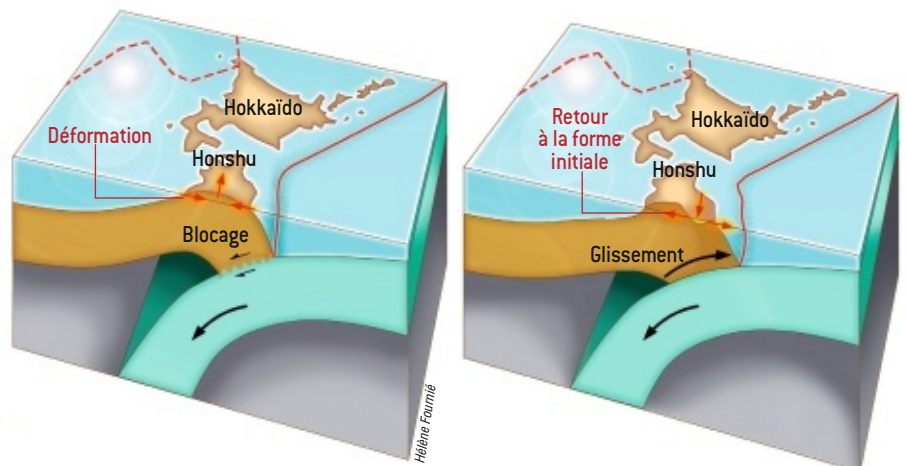
Les sismologues voyaient deux explications possibles au déficit sismique : soit l'essentiel de l'avance de la plaque est compensé par des glissements asismiques, c'est-à-dire sans secousses ; soit il manque de gros séismes dans l'historique sismique nipponne. Cette seconde explication passait pour improbable, 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 asismique 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.



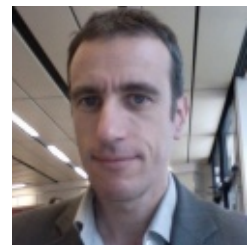
3. CES COUPES DE HONSHU ET DE LA FOSSE DU JAPON (plan de coupe indiqué sur la figure 2) montrent (à gauche) le blocage, avant le séisme, de la plaque pacifique sur la plaque eurasiennne portant l'île de Honshu, qui se raccourcit de plusieurs centimètres par an, tout en se bombant à mesure qu'elle accumule 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 asismique, 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.