

Annexe 3

Erreurs de prévision et de gouvernance dans la gestion au Japon de la mitigation des séismes mises en lumière par le séisme de Tohoku du 11 mars 2011

Xavier Le Pichon
Académie des sciences

Le séisme de Tohoku du 11 mars 2011 a mis en lumière deux erreurs majeures dans la politique japonaise de mitigation des séismes, une erreur de prévision de la part des spécialistes et une erreur de gouvernance de la part du gouvernement japonais.

1. Une erreur de prévision : le séisme de Tohoku du 11 mars 2011 n'a pas été prévu mais il était prévisible

Parmi les séismes dont la magnitude a pu être mesurée avec des instruments depuis environ un siècle, le séisme Mw 9.1-9.0 du 11 mars 2011 est le quatrième en terme de magnitude, après celui du Chili (1960, 9.5), d'Alaska (1964, 9.2) et de Sumatra (2004, 9.2-9.1). Ces mégaséismes sont dus à la rupture d'une zone de subduction. La zone de rupture, définie par les répliques, fait 600 km de longueur sur 250 km de large mais la zone de très grand mouvement (supérieur à 30 m et atteignant localement le chiffre énorme de 60 m) ne dépassait pas 100 km de longueur et 50 de large (Simons *et al.*, *Science*, 19 mai 2011). Comme la vitesse de subduction est d'environ 90-95 mm/an, la déformation relâchée durant le séisme s'était donc accumulée pendant au moins sept siècles. Une particularité étonnante de ce séisme est que deux tiers du mouvement de rupture se sont produits dans la partie proche de la fosse, là où le plan de rupture est à moins de 20 km de profondeur. C'est cette zone de très grande rupture qui fut la source principale du mégatsunami dont l'amplitude atteignit 15 à 20 mètres et localement jusqu'à 50 mètres en déferlement.

Le séisme du 11 mars 2011 n'a pas seulement profondément secoué le Japon, mais aussi la sismologie japonaise, comme le souligne le sismologue Robert J. Geller (*Nature* du 13 avril 2011). En effet, depuis le séisme de Kobé de 1995, peu nombreux étaient ceux qui pensaient qu'il est possible de prédire avec succès un séisme. Mais les spécialistes japonais étaient par contre persuadés que la probabilité des séismes attendus pouvait être établie de manière rationnelle à partir de la définition de séismes caractéristiques pour chaque zone. C'était la base des prévisions établies chaque année de manière officielle au Japon. Or cette capacité de prévision est profondément remise en cause, comme le souligne Geller, puisque la carte de prévision officielle basée sur ces séismes caractéristiques ne prévoyait pas de séisme supérieur à 7.5 dans la zone la plus proche du continent et 8.2 au large près de la fosse, alors que le séisme du 11 mars avait une magnitude de 9.1-9.0. Sur la base de ces prévisions, les tsunamis attendus ne devaient pas dépasser 4 ou 5 mètres alors que ceux qui ont submergé les côtes japonaises le 11 mars dépassaient 15 à 20 mètres. Ainsi la centrale de Fukushima fut-elle construite pour être à l'abri de tsunamis de moins de 5.7 m alors que le tsunami atteignit 14 m en déferlement à Fukushima.

Pourquoi les prévisions faites par les spécialistes japonais étaient-elles pareillement fausses? La principale erreur est d'avoir admis que le dernier siècle de sismicité est représentatif du

régime permanent de la fosse de subduction. Or les zones de subduction peuvent produire des séismes de magnitude égale ou supérieure à 9 avec des mouvements dépassant 20 à 30 mètres accumulés durant plusieurs siècles, durée bien supérieure au siècle adopté par les spécialistes japonais pour la fosse du Japon. Et le fait que de grands séismes de magnitude 7.5-8 aient relâché une partie de la déformation élastique accumulée n'excluait pas qu'un mégaséisme leur fasse suite, comme ce fut le cas le 11 mars. En effet, l'énergie sismique dissipée durant le dernier siècle ne représentait que 20 % de l'énergie due au glissement de la plaque pacifique sous la plaque sur laquelle se situe le Japon. Autrement dit, la sismicité sur un siècle ne rendait compte que d'environ 20 mm/an de glissement alors que la vitesse réelle est de 90-95 mm/an. L'hypothèse du régime permanent avait donc comme implication que 80 % de l'énergie due au glissement était évacuée par des microséismes ou des épisodes de glissement plastique. Or, après l'installation d'un réseau dense de stations GPS (30 km entre stations) à la suite du séisme de Kobé en 1995, il a été montré à partir de 1998 que la déformation élastique observée sur le Japon en face de la subduction du Pacifique correspondait à une vitesse de glissement voisine de 80 mm/a, soit proche de 100 % de la vitesse de subduction et non 20 %. Il devenait très difficile de réconcilier cette donnée avec l'existence d'un glissement silencieux de 80 % du mouvement.

D'autant plus que les données géologiques et historiques obtenues par les géologues japonais montraient que des tsunamis très importants avaient eu lieu sur cette côte en 1611 et 869, tsunamis qui avaient laissé des traces géologiques très supérieures à celles provoquées par les séismes du dernier siècle ! Le taux de répétition de ces mégatsunamis est de l'ordre de 500 à 1 000 ans, comme le montrent les traces de deux mégatsunamis précédant celui de 869.

Une seconde erreur moins importante est d'avoir lié de manière trop étroite la magnitude du tsunami à la magnitude du séisme, alors que l'amplitude du tsunami est directement liée à celle du mouvement de rupture maximal et non à l'énergie totale du séisme. Or on sait depuis 20 ans que la rupture durant un séisme peut être très hétérogène. Et ce qui détermine l'ampleur d'un tsunami, c'est l'amplitude maximale du mouvement vertical dû à la rupture et non le mouvement moyen lié à l'énergie totale du séisme. Dans le cas du séisme du 11 mars, la source principale du tsunami a été une zone où le glissement durant le séisme atteignit plus de 30 à 60 m mais sur seulement 100 km de long et 50 km de large.

L'erreur des spécialistes japonais responsables de la prévision a donc été de continuer à croire que le régime du dernier siècle est le régime permanent de cette zone en dépit de l'information historique sur les mégatsunamis, en dépit de la découverte d'un couplage voisin de 100 %, depuis treize ans que le GPS peut le mesurer, et en dépit de l'information globale sur les mégaséismes de subduction correspondant à l'accumulation de déformations élastiques pendant plusieurs siècles. Cette erreur est d'autant plus incompréhensible que des voix dissidentes avaient cherché à se faire entendre au Japon même et que, sur la côte ouest du Canada, et sur la base d'indices géologiques de tsunamis géants en 1700, 170, 810 avant J.C., et 1310 avant J.C., l'autorité de régulation canadienne avait déjà intégré la possibilité d'un magnitude 9 (± 0.4) avec tsunami dans les règles parasismiques de cette région.

Le séisme du 11 mars 2011 a donc de fait démontré que la sismicité historique n'avait déchargé qu'à 20-25 % la charge élastique de la subduction de la fosse du Japon et que le reste est relâché lors de mégaséismes, comme celui du 11 mars, avec une périodicité de 500 à 1 000 ans. Ce séisme conforte par ailleurs l'idée proposée par Robert McCaffrey en 2008 que la magnitude maximale d'un séisme de subduction est de 9+ quelle que soit la vitesse de subduction (accumulation maximale de mouvement élastique de l'ordre d'une trentaine de mètres), ce qui a

des conséquences très importantes pour toute subduction, et en particulier, dans le cas de la France, celle qui fonctionne à l'ouest des Antilles françaises.

En conclusion, sur la base de ce que l'on savait sur les mégatsunamis historiques et sur la sismicité liée à la subduction de la fosse du Japon, on aurait dû prévoir qu'un séisme comparable au séisme du 11 mars se produirait un jour au large de cette côte et qu'il entraînerait un tsunami comparable, même s'il était impossible de prévoir la période, ni le lieu précis de cet événement. Le séisme de Tohoku du 11 mars 2011 démontre donc qu'une prévision basée sur les seules données sismologiques instrumentales est insuffisante à cause du laps de temps trop court pour lequel ces données sont disponibles (environ un siècle). Il est donc indispensable de tenir un large compte des données historiques et géologiques permettant de caractériser la sismicité précédant la période instrumentale. Si ceci avait été fait, on aurait dû prévoir qu'un séisme comparable au séisme du 11 mars se produirait un jour au large de cette côte et qu'il entraînerait un tsunami comparable, même s'il était impossible de prévoir la période, ni le lieu précis de cet événement. Le séisme de Tohoku conforte par ailleurs l'idée proposée récemment que la magnitude maximale d'un séisme de subduction est de 9+, quelle que soit la vitesse de subduction, ce qui a des conséquences très importantes pour toute subduction, et en particulier dans le cas de la France celle qui fonctionne à l'ouest des Antilles françaises. On peut penser sans risque de se tromper que les conséquences de l'erreur de prévision des spécialistes japonais vont profondément affecter l'évolution de la méthodologie de la prévision des séismes au Japon, et sans doute dans le monde entier. Elles l'affecteront sans doute encore plus que le séisme de Kobé ne l'avait fait. Celui-ci avait pourtant dans la pratique enterré chez la plupart des spécialistes l'idée que les séismes pouvaient être prévus dans l'état actuel des connaissances sismologiques.

2. Une erreur de gouvernance : la fermeture de la centrale nucléaire de Hamaoka et les problèmes de gouvernance

Le Premier ministre japonais a demandé le 6 Mai dernier à Chubu Electric de fermer la centrale nucléaire de Hamaoka sur la péninsule d'Omaezaki, à 200 km au SO de Tokyo, en plein cœur de la zone où le futur séisme de Tokai de magnitude 8 est considéré comme imminent. La compagnie a accepté la fermeture 3 jours plus tard sous la pression de l'opinion publique.

C'est Kiyoo Mogi, sismologue à l'université de Tokyo et longtemps président du « Coordination Committee for Earthquake Prediction », qui proposa en 1969 sur la base de sa théorie des « earthquake gaps » la grande probabilité de ce séisme de Tokai. Or Mogi a insisté publiquement dès le début, mais plus particulièrement depuis 2001, que les caractéristiques utilisées par Chubu Electric pour le séisme attendu étaient obsolètes et que de toute façon, on ne peut prévoir avec suffisamment de précision des phénomènes naturels. Un séisme de magnitude 8 nous présenterait beaucoup de surprises, disait-il. Il serait donc raisonnable d'arrêter ces centrales nucléaires. De même, le très respecté Katsuhiko Ishibashi, sismologue de Kobé, insistait sur le fait qu'Hamaoka ne pourrait résister à une telle catastrophe sismique.

Un procès en 2003 par des citoyens de la préfecture demandant l'arrêt de la centrale fut perdu en 2007 car, disait le tribunal, Chubu Electric avait respecté les règles de sécurité du gouvernement. Sur la base du dernier mégaséisme de Ansei-Tokai en 1854, Chubu Electric avait estimé que le tsunami ne dépasserait pas 6 mètres. À la suite du désastre de Fukushima, la compagnie a décidé de construire un mur anti-tsunami de 15 mètres de haut et de sécuriser les alimentations électriques de secours. À la suite des injonctions du Premier ministre, elle a

finalement accepté d'arrêter la centrale tant que ces améliorations ne seraient pas apportées, ce qui réclamera trois ans de travaux.

En conclusion, en dépit des demandes répétées de deux des plus respectés spécialistes japonais, impliqués de manière majeure dans les principaux comités sur la sécurité, et des protestations vives des habitants de la région, une situation éminemment dangereuse pour la sécurité de cette centrale de Hamaoka n'a pas été prise en considération par les autorités. On se heurte là à un problème grave de gouvernance qui se rajoute aux erreurs scientifiques faites par les spécialistes japonais. Ce double problème très grave ne peut être sous-estimé et il me semble qu'il est du devoir de notre comité de le mettre en pleine lumière, ce qui amènera bien sûr des conséquences pour la manière dont ces problèmes devraient être traités dans notre pays.

Note technique sur le problème du couplage

Les sismologues en se basant sur les séismes enregistrés durant les 100 dernières années avaient remarqué dans les années 1980 que l'énergie sismique dissipée le long de la fosse du Japon était très inférieure à la dissipation de l'énergie mécanique attendue d'après le taux de subduction, le rapport étant de 0.24 pour Peterson et Seno (1984) et de 0.18 pour Pacheco *et al.* (1993). Ceci suggérait que 75 à 80 % de l'énergie mécanique ne se dissipait pas sous forme d'énergie sismique, ce qui semblait très différent de ce qui se passait au nord dans la fosse des Kouriles ou au sud dans la fosse de Nankai. Là, le couplage sismique semblait proche de 100 %. On expliquait donc ainsi le fait qu'il n'y avait pas de séisme de chevauchement de magnitude supérieure à 8 sur la marge de la fosse japonaise alors qu'ils étaient fréquents au nord et au sud. En effet, les séismes de la marge japonaise de magnitude inférieure à 8 semblaient avoir un taux de répétition de 100 ans (Utsu, 1974) et le déficit d'énergie sismique était pris comme une caractéristique de cette marge.

Le seul séisme de magnitude supérieure à 8, le séisme Mw 8.4 de 1933, cité ci-dessus, était un séisme en extension dans la plaque Pacifique et à l'ouest de la fosse (Kanamori, 1971). Le séisme (Mw 7.6 à 8.1 suivant les auteurs) en subduction de 1896 était parallèle au séisme de 1933 et à la base du prisme. Sa très faible magnitude sismique (Ms7.2) contrastait avec sa magnitude d'après le tsunami qui était supérieure à 8, ce qui explique les divergences sur la magnitude Mw. On proposait que le fait qu'il soit à la base du prisme en avait fait un séisme à rupture lente, dit tsunamigénique (Kanamori, 1972). Les chercheurs (p.e. Tanioka, Ruff et Satake, 1997) pensaient d'ailleurs que la partie à l'est de ces deux séismes était à l'abri de grandes ruptures, alors qu'elle a rompu durant le dernier séisme avec un glissement dans cette zone dépassant 10 m.

En 1995, le séisme de Kobé avait amené les Japonais à reprendre complètement leur programme de recherche lié aux séismes et à grandement accentuer leur effort de recherche en ce domaine. À partir de 1997, la mise en place de 2 000 stations géodésiques GPS sur le Japon et les îles adjacentes ouvrait la possibilité d'interpréter le couplage mécanique entre la plaque Pacifique en subduction et l'archipel japonais. Dans une série d'articles publiés entre 1998 et 2001, le groupe de l'ENS (Le Pichon, Mazzotti, Henry et Hashimoto, 1998 ; Mazzotti, Le Pichon Henry et Miyazaki, 2000 ; Henry, Mazzotti et Le Pichon, 2001 ; Mazzotti, Henry et Le Pichon, 2001) montra que le GPS révélait que le couplage mécanique était proche de 100 % et sur la fosse de Nankai et sur celle du Japon. Ce couplage mécanique important sur la fosse du Japon était confirmé par Ito, Yoshioka et Miyazaki en 2000. Le groupe de l'ENS faisait remarquer dans ce contexte que par contre le couplage sismique mesuré sur la fosse du Japon était beaucoup plus faible (20 à 25 %). D'où venait cette énorme différence avec le couplage sismique? Cette interprétation de couplage mécanique proche de 100 % d'abord très contestée finit par prévaloir, comme le montrent par exemple les articles récents de Hashimoto, Noda, Sagiya et Matsu'ura, 2009 et de Loveless et Meade, 2010. Pourtant curieusement, on n'en déduisit pas qu'il y avait un énorme déficit sismique. On s'orienta plutôt vers une explication en termes de glissement silencieux lors de séismes lents et de glissements post sismiques. En conséquence les séismes attendus restaient des séismes de magnitude inférieure à 8 et la recherche portait plutôt sur l'identification des aspérités pouvant les provoquer (cf. Hashimoto *et al.*, cité ci-dessus, qui ont de fait identifié l'aspérité à l'origine de la rupture initiale du séisme du 9 mars 2011).

Références bibliographiques

Xavier Le Pichon, Stéphane Mazzotti, Pierre Henry and Manabu Hashimoto, Deformation of the Japanese Islands and seismic coupling: an interpretation based on GSI permanent GPS observations, *Geophys. J. Int.*, 134, 501-504, 1998.

Stéphane Mazzotti, Xavier Le Pichon, Pierre Henry and Shin-Ichi Miyazaki, Full interseismic locking of the Nankai and Japan-west Kurile subduction zones' An analysis of uniform elastic strain accumulation in Japan constrained by permanent GPS, *J. Geophys. Res.*, 105, 13 159-13 177, 2000.

Pierre Henry, Stéphane Mazzotti and Xavier Le Pichon, Transient and permanent déformation of Central Japan, estimated by GPS 1) Interseismic loading and subduction kinematics, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 184, 443-453, 2001.

Stéphane Mazzotti, Pierre Henry and Xavier Le Pichon, Transient and permanent déformation of Central Japan estimated by GPS : Strain partitioning and arc-arc collision, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 184, 455-469, 2001.

Chihiro Hashimoto, Akemi Noda, Takeshi Sagiya and Misuhiro Matsu'ura, Interplate seismogenic zones along the Kurile-Japan trench inferred from GPS data inversion, *Nature Geoscience*, 18 June 2009.

John P. Loveless and Brendan J. Meade, Geodetic Imaging of plate motions, slip rates, and partition of déformation in Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, B042410, doi :10.1029/2008JB006248, 2010.

K. Minoura, F. Imamura, D. Sugawara, Y. Kono, T. Iwashita, The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan, *J. Natural Disaster Science*, 23, 2, 83-88, 2001.

Futoshi Nanayama, Kenji Satake, Ryuta Furukawa, Koichi Shumukawa, Brian F. Atwater, Kiyoyuki Shigeno and Shigeru Yamaki, Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench, *Nature*, 424, 660-663, 7 August 2003.