

La sismologie

Jean FAURÉ, Pierre MECHLER et Raymond PICAN

1. GÉNÉRALITÉS

Les hommes ont depuis toujours voulu comprendre comment était constitué ce qu'ils avaient sous leurs pieds, c'est-à-dire le globe terrestre. Ce qui est directement accessible en surface ou par forage est l'objet de la géologie. La géophysique regroupe des techniques qui permettent indirectement de voir plus en profondeur. Elles sont en pratique variées :

- En étudiant les anomalies du champ de la pesanteur, la gravimétrie contribue à savoir comment s'organisent, selon leur densité, les masses rocheuses en profondeur,
- L'analyse de la propagation des courants électriques dans le sol donne une idée de la répartition des terrains en fonction de leur conductivité,
- De même la mesure du champ magnétique et de ses variations locales permet de reconstituer la géométrie des différentes couches souterraines en fonction de leur teneur en fer...
- Mais c'est surtout la sismologie, c'est-à-dire l'étude des ondes issues de séismes ou d'explosions, qui nous fournit une image la plus complète du globe...

Comme d'ailleurs les autres techniques citées ci-avant, elle peut travailler à plusieurs échelles. Les méthodes de prospection pétrolière ont familiarisé le grand public avec la technique d'explosions qui, enregistrées sur des sismographes, permettent de reconstituer la géométrie des strates du sous-sol sur quelques kilomètres et ainsi de repérer d'éventuels réservoirs d'hydrocarbure. A l'échelle du globe, les tremblements de terre (et accessoirement les explosions nucléaires souterraines) nous donnent des informations sur sa structure générale. Très schématiquement, et essentiellement grâce à la sismologie, on connaît depuis plus d'un siècle la structure d'ensemble du globe :

- Au centre se trouve un **noyau** formé essentiellement de Nickel et de Fer, le NIFE ; son rayon est de l'ordre de 3500 km ; sa température est estimée de l'ordre de 7000° K.
- Autour s'étend une enveloppe ou **manteau**, mélange plus ou moins visqueux de silice et de magnésium, le SIMA ; son épaisseur est d'environ 2900 km ; sous l'effet de la chaleur du noyau, il s'y développe des courants de convection,
- Sur le manteau, se trouve la **croûte** épaisse de quelques dizaines de kilomètres, formée en partie des plaques solides de Silice et Alumine, le SIAL qui « flottent » sur le substrat liquide.

Depuis les années 1960, on a compris que les plaques de la croûte sont mobiles et la raison de cette mobilité : elles sont mises en mouvement par les courants de convection qui se produisent dans le manteau. (C'est ce qui est appelé la « **tectonique des plaques** » ; la tectonique du grec « architecture » étudie la répartition des roches dans l'écorce terrestre).

Dans leurs déplacements relatifs, les plaques entrent en collision et finissent par se chevaucher. Cela se traduit à l'échelle des millénaires par la formation des chaînes de montagne. Le mouvement est en général imperceptible. Mais il implique aussi, lors de moments brefs, par des ruptures brutales le long de failles en profondeur : ce sont les tremblements de terre.

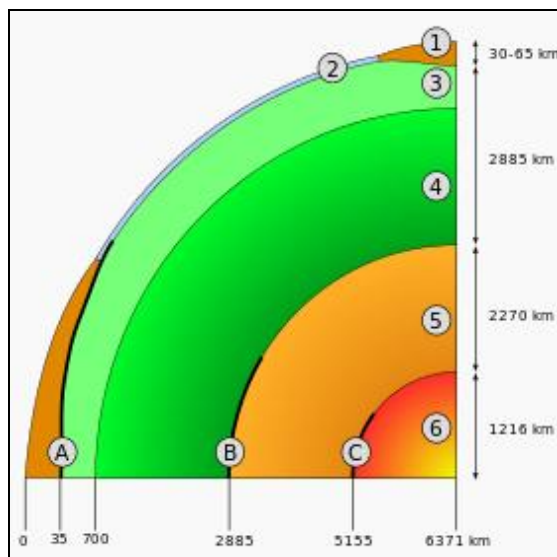


Figure 1 : Structure de la terre (Wikipédia)

Structure interne de la terre :
 1 - Croute continentale
 2 - Croute océanique
 3 - Manteau supérieur (ou Mésosphère)
 4 - Manteau inférieur (ou Asthénosphère)
 5 - Noyau externe
 6 - Noyau interne (ou graine)
 A - Discontinuité de Mohorovicic
 B - Discontinuité de Gutenberg
 C - Discontinuité de Lehmann

De nos jours, cette dérive qui a modelé la surface de la terre par le passé, se poursuit ; le continent américain s'éloigne toujours plus de l'Europe à une vitesse de l'ordre de quelques centimètres par an, l'Inde progresse toujours vers le Nord sous le continent asiatique et soulève chaque jour un peu plus la chaîne himalayenne, la plaque de Nazca, au large du Chili, continue de glisser sous le continent sud-américain, le continent africain se rapproche de l'Europe et dans quelques millions d'années la Méditerranée aura sans doute disparu...

Ainsi, lorsque les contraintes mécaniques sont supérieures à la résistance des matériaux sollicités, tous ces mouvements très lents, entraînent par moment, le relâchement brutal de l'énergie accumulée en créant des séismes plus ou moins importants... A partir d'une petite zone en profondeur, le **foyer**, assimilable à un point à l'échelle du globe mais qui peut atteindre néanmoins quelques kilomètres, se propagent des ondes mécaniques. Elles atteignent la surface en un point appelé **l'épicentre** et se dispersent de plus en plus loin en s'atténuant : lors des plus grands séismes, des instruments sensibles enregistrent parfois leur passage plusieurs fois autour du globe.

Trois points particuliers sont à relever :

Dans le détail, la rupture se traduit par l'émission d'ondes de plusieurs types dont les fréquences varient en fonction des caractéristiques du foyer. Les sismologues distinguent et analysent des ondes de compression, puis plus lentes, des ondes de cisaillement et enfin des ondes de surface... Le fait que les ondes de cisaillement ne se propagent pas dans les liquides, a mis en évidence le caractère visqueux des matériaux du manteau.

Le réarrangement des contraintes dans les matériaux qui donnent lieu à un séisme ne se produit pas en une seule fois. Souvent, mais pas toujours, il y a des petites secousses préliminaires. En général, en particulier lors de très forts séismes, il se produit de nouvelles secousses à la suite du choc principal. Ces répliques, parfois aussi importantes que celui-ci, sont souvent très destructrices sur des structures déjà fragilisées par le premier séisme.

La rupture de terrains sous tension ne peut pas être prévue avec précision. Certes, on peut connaître assez approximativement les zones où les contraintes se concentrent, mais cela ne permet pas de conclure à l'imminence d'un tremblement de terre. On constate parfois que les séismes se succèdent sur une même faille d'une extrémité à l'autre. C'est par exemple le cas le long de la faille anatolienne qui borde la Turquie au Nord..., où des séries de séismes ont lieu progressivement d'Est en Ouest.

C'est le rôle essentiel de la sismologie de s'intéresser au mécanisme des séismes. Pour cela les sismologues ont mis au point deux notions et des échelles correspondantes (voir aussi la [fiche GASN n°9](#)).

- Historiquement la plus ancienne est la notion d'**intensité** d'un séisme, apparue au XIX^{ème} siècle. C'est le simple constat des effets en surface d'un tremblement de terre. Il peut aller du mouvement à peine ressenti par les gens jusqu'à la destruction complète des installations humaines et la modification du paysage en passant par douze degrés d'effets de plus en plus marqués. Dans les siècles précédents, des documents variés font état de nombreux tremblements de terre avec la description des effets constatés. À partir de ces archives historiques, il est possible d'apprécier l'intensité ressentie pour ces événements en un lieu donné.
- La seconde notion, due au sismologue RICHTER dans les années 1930, est la **magnitude**. Sans entrer dans le détail de sa définition à partir de la mesure de l'amplitude d'un type précis d'ondes reçues par des pendules, les sismographes, on peut dire qu'il s'agit d'une mesure de l'énergie mise en jeu dans le tremblement de terre. Elle est exprimée sur une échelle logarithmique, chaque augmentation d'un degré correspondant à une multiplication d'environ trente de l'énergie au foyer.

En théorie, elle peut aller de moins l'infini pour des micro-ruptures dans un solide jusqu'à des valeurs dont la limite est difficile à imaginer. En pratique, on mesure sur notre globe des magnitudes de l'ordre de 1 à 9. Les événements de magnitude les plus faibles sont très fréquents, voire quotidiens. Ceux de magnitude 9 sont assez rares, de l'ordre d'un par dizaine d'années... Pour fixer les idées, par des méthodes indirectes car il n'y avait pas de sismographes à l'époque, on estime que le grand séisme de Lisbonne en 1769, célèbre entre autre par les écrits de Voltaire, aurait pu avoir une magnitude de 10. Et quelle magnitude serait enregistrée, si, par improbable, une plaque de la croûte se cassait d'un seul coup en deux ?

Ces deux échelles conduisent à des considérations pratiques. L'échelle d'intensité décrit bien les dommages qui intéressent au premier chef les hommes. Encore faut-il aller sur place pour les constater ce qui n'est pas toujours facile en cas de désastre. En revanche, un simple coup de téléphone aux laboratoires de géophysique bien équipés permet au journaliste de donner immédiatement une idée de l'énergie développée lors de l'événement. Cependant, un séisme comme celui d'Agadir en 1960 avec une magnitude relativement faible 5,7

mais un foyer situé à faible profondeur, quelques kilomètres, juste sous la ville a produit localement un désastre en tuant plus de 12000 personnes et en faisant le double de blessés.

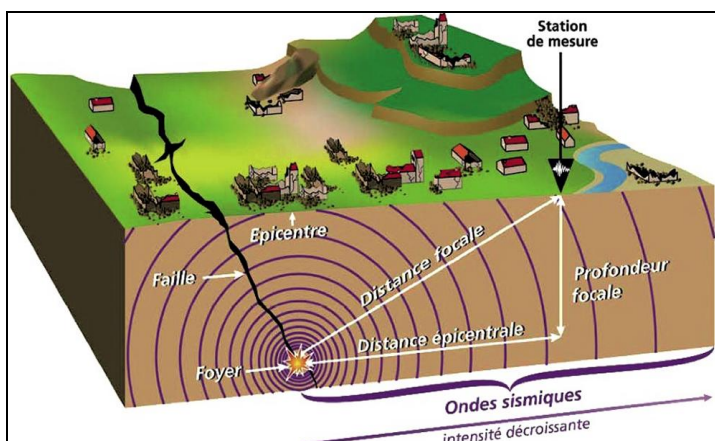


Figure 2 : Les effets d'un séisme



Figure 3 : Sismomètre fonctionnant dans la bande 0,1-20 Hz

A l'opposé, certains séismes très profonds, par exemple sous l'Himalaya, sont ressentis en surface dans une très vaste région sans y créer de dommages importants... Ainsi, un fort séisme dont le foyer se situe à près de cent kilomètres sous la surface d'une zone désertique aura une intensité faible alors que sa magnitude sera très élevée. Ce ne fut pas, hélas, le cas du dernier séisme du 25 avril 2015 à Katmandou : le foyer se situant autour de vingt kilomètres de profondeur selon les premières estimations, les dégâts ont été très importants.... Les notions d'intensité et de magnitude sont insuffisantes pour une description fine du phénomène, il faut faire aussi intervenir la géométrie de la source ou foyer (profondeur et dimension...).

À partir d'un réseau de sismographes, il est possible de localiser le foyer d'un séisme par une triangulation à partir de trois points ou plus... Connaissant à la fois, la position des lieux de mesure et donc les dimensions du triangle ou du polygone formé par les stations, l'heure d'arrivée dans chacune d'entre elles et enfin la vitesse de propagation des ondes sismiques, le foyer du séisme peut être localisé (pour information la vitesse moyenne des ondes sismiques dites de courtes périodes est de l'ordre de 25.000 km/h : elle ne dépend que du trajet suivi et rend donc possible d'évaluer la distance du foyer à une station donnée).

La localisation de tous les séismes a contribué à définir les zones dont ils sont issus et ainsi à déterminer, avec plus ou moins de précision, les fractures à leur origine. Comme de son côté, la géologie contribue aussi à reconnaître les failles près de la surface, une nouvelle approche, la **sismotectonique** est née.



Stations sismiques et relais de transmission de signaux sismiques installés respectivement :

Figure 4a (ci-dessus) : Sur l'atoll Méhétia au large de Tahiti
Figure 4b (ci-contre) : A Stazongo (Bolivie), alt 4.750 m



L'ensemble des études de cette nouvelle discipline permet de dire que la magnitude des séismes est directement liée aux dimensions des failles. Cela justifie le fait que la probabilité d'observer un tremblement de terre de magnitude supérieure à 10 est pratiquement nulle. Accessoirement, cette surveillance des séismes permet aussi d'observer et de localiser d'éventuelles explosions nucléaires souterraines.

Sur un autre plan, il y a lieu de noter que les effets des séismes, notamment sur les bâtiments, et donc les dommages que ces constructions peuvent éprouver sont aussi fonction des fréquences des ondes émises dépendant elles-mêmes de la taille du foyer. Les ondes de « petits » séismes aux fréquences relativement élevées (supérieures à 10 Hertz) auront un effet important sur les matériels d'une installation sans en endommager le gros-œuvre. A l'opposé, les ondes de « forts » séismes aux fréquences de quelques Hertz pourront créer de fortes destructions du génie civil. Il est essentiel de tenir compte de ce fait pour la protection des installations sensibles.

Un cas particulier est celui des séismes qui se produisent sous la mer. Si un séisme a lieu dans les fonds marins avec une magnitude supérieure à 6,3 il peut créer un déplacement notable d'une masse liquide importante, c'est ce qui est appelé d'un terme japonais, un **tsunami** (littéralement « vague de port »). La vague formée progresse avec une vitesse de l'ordre de 800 km/h en haute mer ; elle a une hauteur d'environ 50 à 80 cm et une longueur de 250 à 300 km. Aussi un bateau la croisant ne perçoit aucune perturbation dans sa navigation. Près de la côte, et en fonction de la géométrie précise de celle-ci, la longueur de la vague diminue et sa hauteur augmente, jusqu'à plusieurs dizaines de mètres.

En fonction de la géographie physique et humaine du rivage où la vague déferle, les dégâts peuvent être considérables. Le tsunami d'Indonésie en décembre 2004 a coûté la vie à 250.000 personnes....

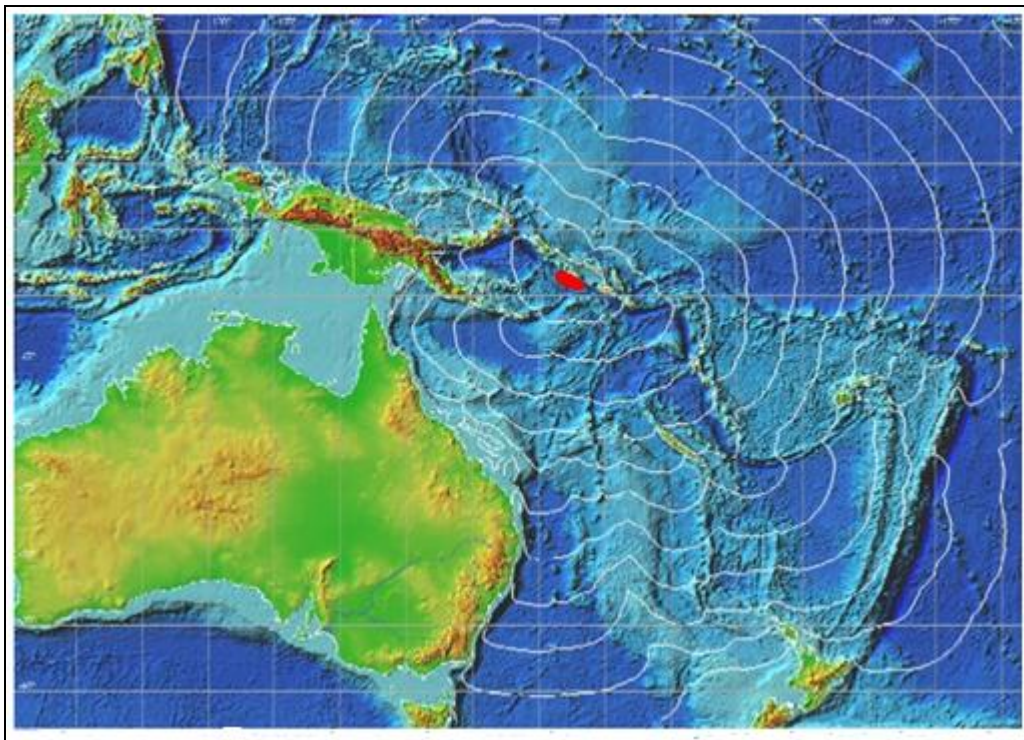


Figure 5 : Carte de trajet du tsunami aux Iles Salomon du 1^{er} avril 2007

2. APPLICATIONS PRATIQUES DE LA SISMOLOGIE

En dehors de son aspect scientifique fondamental, les études sismologiques sont utilisées dans les domaines pratiques ci-après :

- La reconnaissance des structures du sous-sol
- L'aménagement des territoires
- La protection des installations critiques
- L'alerte des populations et des pouvoirs publics

- La lutte contre la prolifération des armes nucléaires

Nota : quelques exemples seront détaillés ci-après.

2.1. RECONNAISSANCE DES STRUCTURES DU SOUS-SOL

Chacun a été familiarisé avec la recherche du pétrole : Les hydrocarbures se trouvent dans des roches mères parfois emprisonnés sous une couche étanche. L'analyse des signaux résultant de tirs d'explosif placés judicieusement en surface permet de déterminer l'existence ou non de ces strates profondes et donc de la possibilité de trouver du pétrole. On effectue des forages pour confirmer cette probabilité.

Mais plus généralement tous les grands travaux demandent d'avoir une idée du substratum... A titre d'exemple, la réalisation de tirs nucléaires souterrains dans les atolls du Pacifique a conduit à réaliser des campagnes géophysiques (sismiques et magnétiques) pour déterminer la géométrie exacte des édifices volcaniques sous la couverture corallienne. Cela a permis d'y effectuer les explosions dans de bonnes conditions de sécurité...

2.2. AMÉNAGEMENT DES TERRITOIRES

En France, une carte sismotectonique a été établie (voir Annexe 1). Cette carte fournit, pour chaque région, une évaluation du risque sismique.

En cas de survenue d'une catastrophe naturelle, les dommages provoqués vont bien au-delà des seules pertes physiques. Des dysfonctionnements localisés et en apparence mineurs, comme la rupture d'une ligne électrique ou la fermeture d'un pont, peuvent pourtant avoir des conséquences importantes à l'échelle du réseau tout entier : coupures d'électricité dans un quartier, hôpitaux rendus inaccessibles, etc. Avec des conséquences sociales difficiles à prévoir : dégradation des capacités de secours, demandes en flèche de logements... Lors de la construction des bâtiments, la prise en compte de la carte du risque rend possible la mise en place de mesures assurant une bonne sécurité.

2.3. PROTECTION DES INSTALLATIONS CRITIQUES

Certaines installations scientifiques ont besoin d'avoir des stabilités de l'ordre de quelques microns. Une étude du spectre du bruit de fond sismique permet de prévoir les dispositifs d'amortissement adéquats. Pour la construction du barrage hydraulique permettant d'alimenter en eau la ville de Quito en Equateur, une étude sismique de la région a nécessité le dimensionnement de l'ouvrage pour tenir compte de son environnement.

La ligne TGV Paris Marseille traverse une zone sismique dans l'arc alpin. Si un séisme se produit, une alerte spécifique est transmise automatiquement afin de prendre les bonnes décisions. Dans toute installation sensible une alerte sismique peut immédiatement arrêter les systèmes en exploitation. On trouvera des détails sur la prise en compte des risques sismiques dans les installations nucléaires dans la [fiche GASN N° 9](#).

2.4. ALERTE DES POPULATIONS ET DES POUVOIRS PUBLICS

Au niveau européen, la France participe au réseau chargé de donner une alerte pour tout séisme important. En effet, un séisme peut détruire tous les moyens de communication dans la zone de l'épicentre et en communiquer le lieu et la magnitude permet d'accélérer et d'adapter les secours à porter.

De même, la France est aussi partie prenante du réseau chargé de donner une alerte aux tsunamis en Méditerranée et dans le Pacifique. Un système d'alerte automatique permet de prévenir la population sous la réserve qu'elle se situe à plus de 1.000 km de l'épicentre. Pour cette évaluation il faut également tenir compte de la vitesse de propagation des ondes sismiques (de l'ordre de 25.000 km/h) et de la vitesse de déplacement des vagues qui est de l'ordre de 800 km/h.

2.5. LUTTE CONTRE LA PROLIFÉRATION DES ARMES NUCLÉAIRES

Un traité [CTBT appelé TICE en France (traité d'interdiction complète des essais nucléaires)] a été signé par un grand nombre de pays pour éviter la prolifération des armes nucléaires. Un réseau mondial auquel participent les États-Unis, la Russie et la France a été mis en place. La sismologie par la surveillance des tirs d'essais y prend toute sa place.

Annexe 1 : Zonage sismique

1.1 - Le zonage sismique de la France

La sismicité ne se répartit pas de manière uniforme sur le territoire métropolitain. Afin de prendre des dispositions adaptées en fonction du degré d'exposition de chaque commune, le législateur s'appuie sur une cartographie de l'aléa sismique réalisée à l'échelle nationale (zonage sismique).

Le précédent zonage sismique datait de 1991 et reposait sur une évaluation déterministe de l'aléa établie en se fondant sur des connaissances scientifiques antérieures à 1984. Cette carte était essentiellement basée sur l'analyse de la sismicité connue historiquement. Elle avait été établie sous deux aspects :

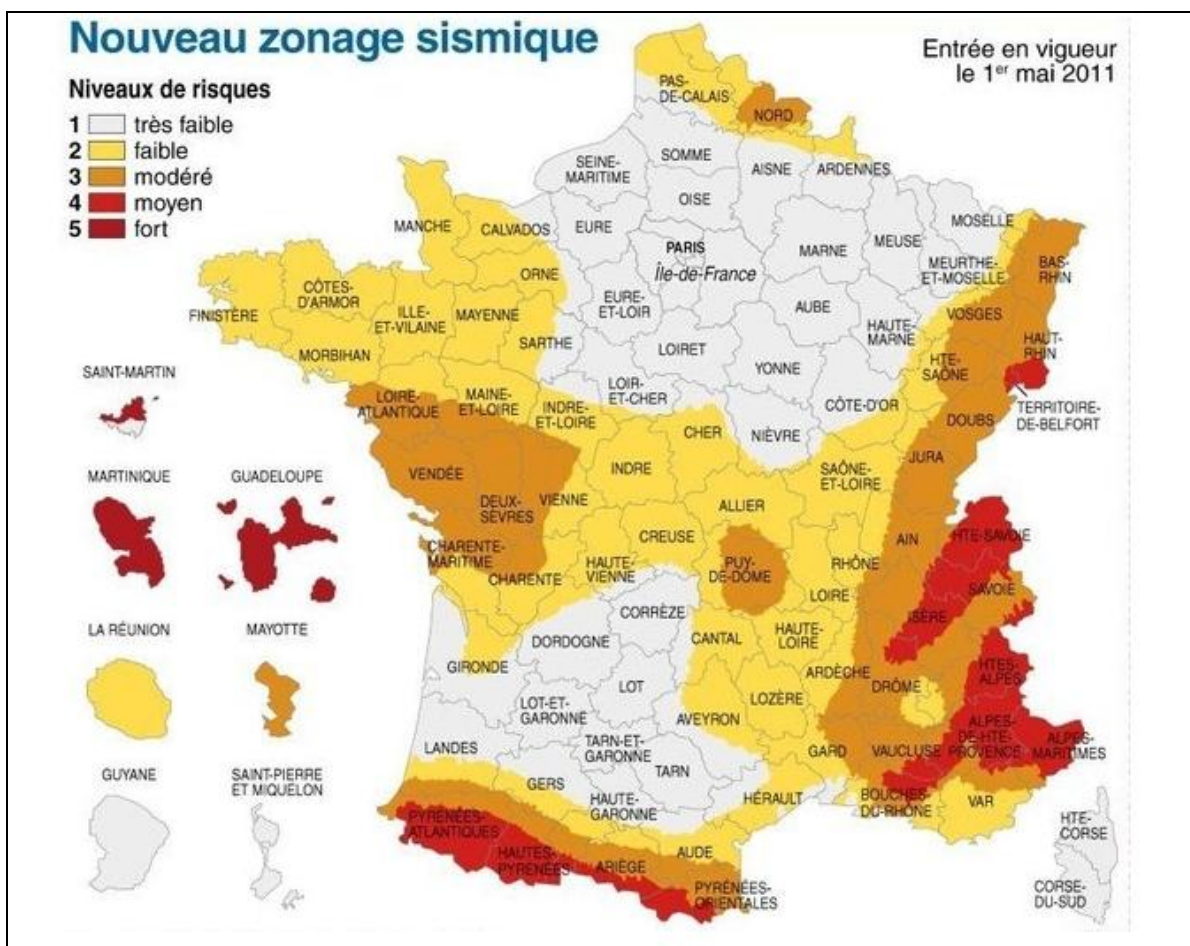
- Aspect historique
- Aspect instrumental

L'aspect historique consistait à rechercher dans les archives la description des séismes par leur impact sur l'environnement humain et physique : Il s'agissait de caractériser l'intensité des séismes passés et d'en tirer une évaluation du niveau de séisme à prendre en considération. C'était la mission du BRGM.

L'aspect instrumental a été réalisé par le Laboratoire de détection et de géophysique du CEA sous l'égide du Professeur ROCARD, en liaison avec les laboratoires nationaux de géophysique. Il convenait de prendre en compte les signaux enregistrés. C'était le domaine de la magnitude.

Les progrès scientifiques en matière d'évaluation de l'aléa sismique (données et méthodes), ainsi que l'évolution des normes de construction parasismique à l'échelle européenne (Eurocode 8), ont rendu nécessaire la révision de ce zonage afin d'harmoniser les normes avec les autres pays européens.

Depuis le 1er mai 2011, un nouveau zonage est entré en vigueur pour le bâti dit conventionnel (arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » et décrets n° 2010-1254 relatif à la prévention du risque sismique et 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français).

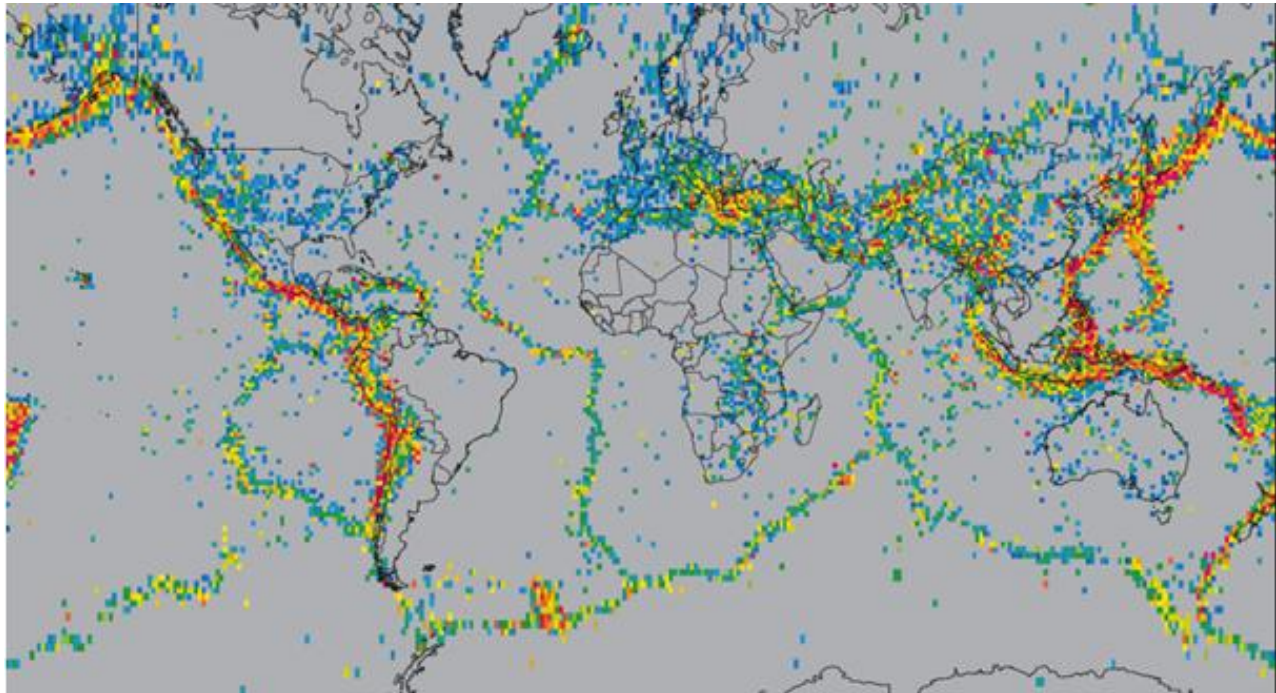


Cette nouvelle cartographie des zones en fonction de leur degré d'exposition repose sur une évaluation probabiliste de l'aléa sismique (estimation du mouvement sismique susceptible d'être atteint ou dépassé en fonction de la probabilité fixée, typiquement 10% sur une période de temps de 50 ans pour le bâti conventionnel). Ce type d'approche permet de prendre en compte une très large gamme de scénarios sismiques pondérés en fonction de leur probabilité d'occurrence.

Ce zonage découpe le territoire français en 5 zones de sismicité (très faible, faible, modérée, moyenne, forte). Environ 21 000 communes sont concernées, au lieu de 5 000 précédemment.

1.2 – Carte de sismicité dans le monde

On donne ci-dessous la carte de sismicité dans le monde.



La couleur indique la magnitude maximale des séismes s'étant produits de 1900 à 1997 et dont l'épicentre se trouve dans des carrés de 1° à 1° en latitude et en longitude. L'échelle de couleur donne la valeur de cette magnitude maximale.

Annexe 2 : Exemples de séismes récents

2.1 – Séisme des Antilles (29 novembre 2007)

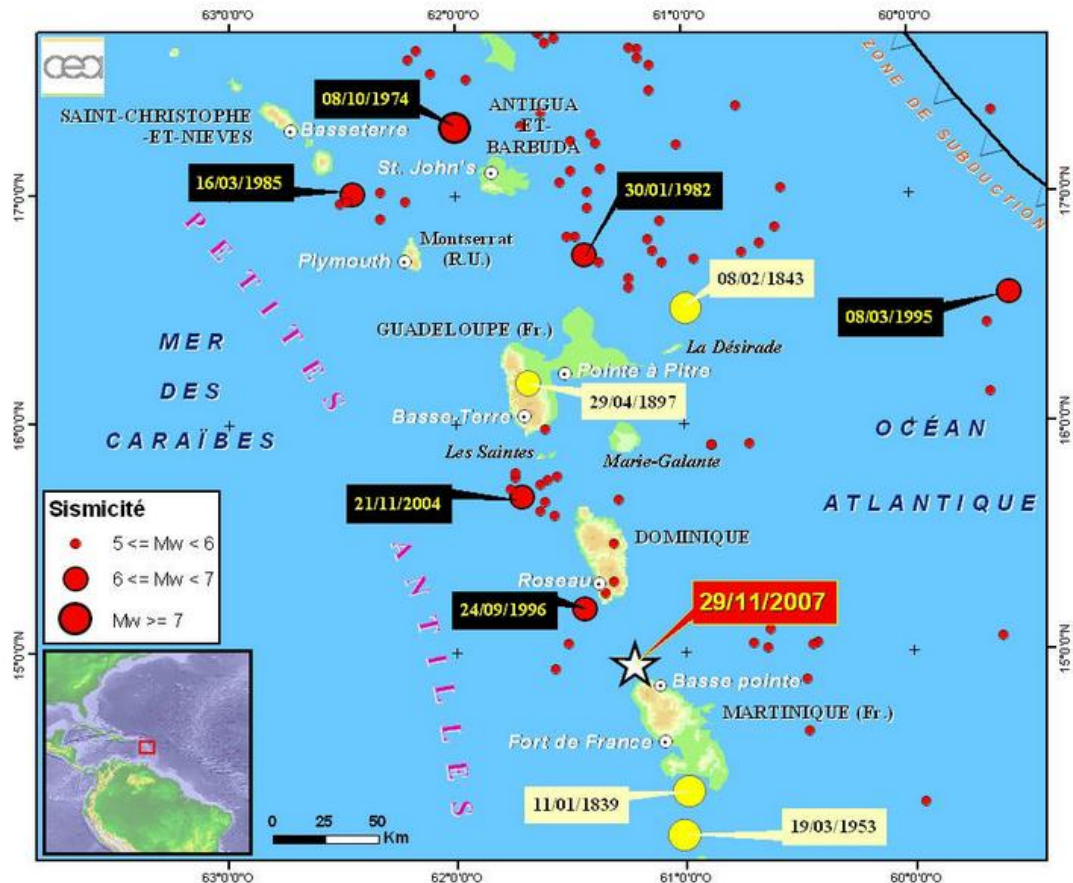
• Description de l'événement

Un séisme de magnitude 7,4 s'est produit dans les Antilles le 29 novembre 2007 à 19h00 TU (soit 15h00 locales et 20h00 de la métropole). Localisé à proximité de l'île de la Martinique à une grande profondeur (environ 140 km). Il a été ressenti sur la plupart des îles de l'arc des Antilles, et plus généralement depuis les îles Vierges jusqu'au Venezuela. Un premier bilan fait état d'une victime et quelques blessés de la Martinique. A Fort de France, on reporte aussi quelques bâtiments effondrés et plusieurs scènes de panique.

• Localisation de l'événement

Cet événement a déclenché le système d'alarme automatique mis en œuvre par la Centre Sismologique Euro-méditerranéen. Le sismologue d'astreinte du CEA/DASE a donc été prévenu rapidement et a pu localiser l'événement et calculer sa magnitude. Les premières informations localisant ce séisme à une quinzaine de kilomètres de la Martinique et à environ 150 km de profondeur ont été fournies aux autorités européennes et françaises moins de 20 minutes après son déclenchement. Une analyse plus approfondie prenant en compte de nombreuses autres stations sismiques confirme les premiers résultats et conduit aux valeurs suivantes :

Date	29/11/2007
Heure origine	19 h 18 min TU
Latitude	14 DEG 95 MIN NORD
Longitude	61 DEG 22 MIN OUEST
Magnitude	7,4



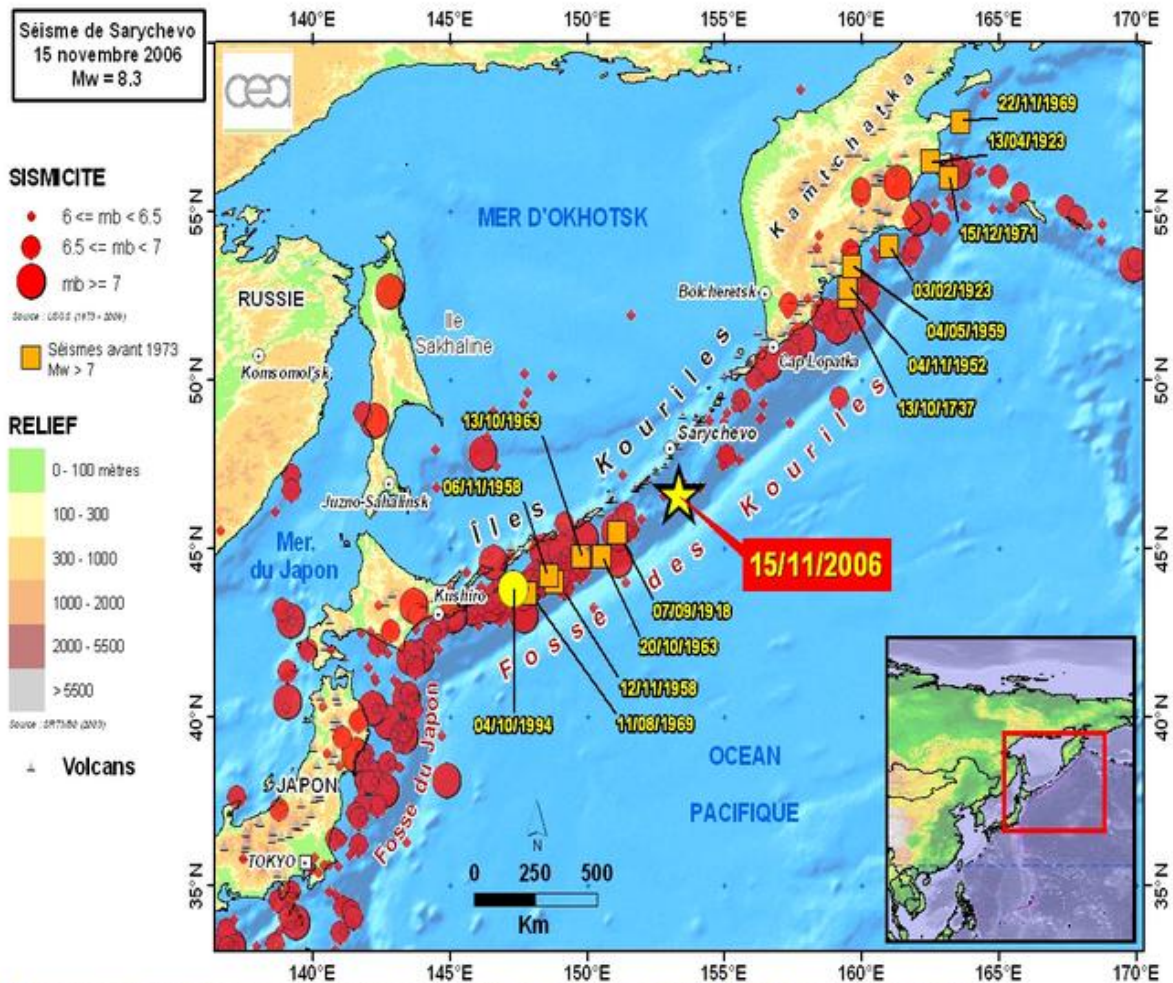
> Figure 1 : Carte des Antilles montrant la localisation du séisme du 29 Novembre 2007 et les principaux séismes de la région.

2 - Séisme des îles Kouriles

Les Îles Kouriles forment un archipel d'îles volcaniques de 1200 kilomètres de long, s'étendant de l'extrême Nord du Japon à la pointe sud de la péninsule du Kamtchatka. Cet archipel est un arc insulaire créé par la subduction de la plaque océanique pacifique sous la plaque Okhotsk (voir Figure 2).

Le 15/11/2006 à 11h14 Temps Universel, un fort séisme s'est produit aux îles Kouriles au Nord de l'Océan Pacifique. Les caractéristiques de cet événement sont les suivantes :

Date	15/11/2006
Heure origine	11 h 14 min TU
Latitude	46 DEG 50 MN NORD
Longitude	153 DEG 22 MN EST
Magnitude	8,3



> Figure 2 : Carte représentant la sismicité de la région (1973-2004 : origine USGS).

Effets en Polynésie française

Suite à ce séisme, une alerte tsunami de niveau 3 (vague attendue de l'ordre d'un mètre) a été diffusée aux autorités. Trois heures avant l'arrivée du tsunami, ces dernières ont fourni des recommandations aux habitants des Marquises. Les marégrammes polynésiens montrent que le tsunami est comparable aux Marquises et au Japon, avec un maximum crête-à-croix à Taiohae de 90 cm environ. À Tahauku l'amplitude a atteint environ 60 cm. À Atuona, dans la baie voisine de Tahauku, un retrait de la mer de 25-50 m a été observé. A Papeete (Tahiti), le marégramme indique une amplitude de 30 cm environ.