

# Physique de la rupture et prédiction des séismes

*Après deux échecs marquants en 2004, faut-il désespérer de la prédiction sismique ? Diagnostiquer la sismicité d'une région, la rupture prochaine d'une faille ou ses effets destructeurs, les sismologues ont pourtant beaucoup progressé qui associent compréhension, modélisation et observation du processus. Mais s'il reste à faire pour rendre les modèles exploitables et prédictifs pour les moyen et long termes, c'est surtout côté observations que le bât blesse désormais. D'où le colossal effort d'instrumentation en cours qui permettra de combler le retard.*

*par Pascal Bernard*

*Institut de physique du globe de Paris*

Pour les sismologues, l'année 2004 fut marquée par deux événements exceptionnels. L'un provoqua l'une des plus grandes catastrophes telluriques de l'histoire - le séisme de Sumatra du 25 décembre, d'une magnitude totalement inattendue pour cette région de tectonique active : 9,3, avec 1 200 km de faille rompue d'un coup... L'autre, un modeste séisme de magnitude 6 en Californie, le 17 septembre, passa tout à fait inaperçu des médias et du grand public. Mais pas des géophysiciens,

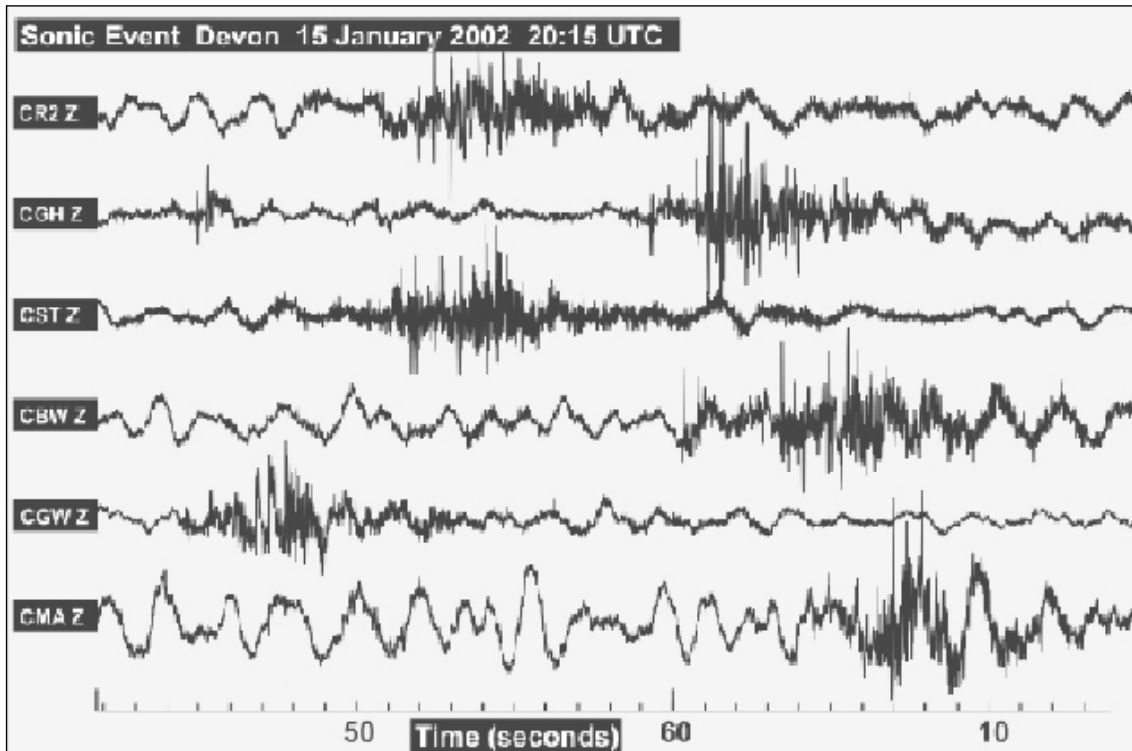
qui l'attendaient depuis vingt ans sur le segment de faille le plus surveillé de la planète - et ne l'ont pas vu venir.

Ces deux ratés cinglants de la prédiction sismique sont-ils symptomatiques de l'impossibilité fondamentale de prédire un phénomène chaotique ? Ou bien ne s'agirait-il que de deux « manques à prédire » isolés, sans valeur statistique, qui ne devraient pas décourager les recherches en prédiction sismique ? L'objet de ce court article est de présenter les bases théoriques et observationnelles décrivant les pro-

cessus d'initiation et de propagation des ruptures sismiques, dont le renouvellement depuis une dizaine d'années refonde en profondeur les multiples approches de la prédiction.

## Rupture ou glissement ?

Les séismes sont la conséquence de la tectonique des plaques, dit-on depuis 40 ans, fracturations incessantes dans les roches froides et fragiles de la croûte terrestre qui accom-



James King-Holmes/SCIENCE PHOTO LIBRARY-COSMOS

*Les ondes de compression P, les plus rapides, sont suivies des ondes de cisaillement S, deux fois plus lentes, mais causant l'essentiel des dommages aux constructions. Ce délai entre ondes P et ondes S permet une forme très particulière de prédiction ou d'alerte précoce mise à profit en quelques régions bien surveillées.*

modent par à-coup le jeu relatif et continu des plaques ; fracturations qui s'organisent en réseaux de failles à toutes les échelles, du mètre à des milliers de kilomètres de long. Si l'on regarde de plus près, un séisme sur une faille correspond à une rupture brutale des aspérités qui la bloquent, suivie d'un glissement rapide des deux blocs de part et d'autre. Prenons un analogue simple. Si vous cherchez à tirer un meuble lourd sur un parquet, il va résister sans glisser, puis au-dessus d'une certaine traction, ses pieds vont se déplacer en raclant le sol. Les petites aspérités de la surface du pied

s'accrochent à celles du parquet, ce qui leur donne cette résistance au cisaillement. Le meuble se met à glisser lorsque ces aspérités parviennent à se dégager, en se soulevant, en se rabotant, ou en se cassant (regardez un peu l'état du parquet après l'expérience...). La zone de faille fonctionne de manière similaire. Ce sont des surfaces où deux blocs rocheux peu fracturés sont en contact, via de nombreuses aspérités de toutes tailles. La faille elle-même peut être fine, sub-millimétrique, ou bien épaisse, remplie de roches broyées et altérées sur plusieurs mètres. La rupture d'une faille consiste

donc en un glissement entre les blocs qu'elle sépare, qui va abraser finement, broyer grossièrement, et/ou fracturer violemment les aspérités en contact.

Mais pourquoi, une fois rompues, les failles ne glisseraient-elles pas en continu, pour accommoder en permanence le mouvement imposé par les plaques ? C'est ici qu'intervient la souplesse des roches (dix mille fois moins souples que votre gomme...). Plutôt qu'un meuble, prenez un parpaing, attachez lui un sandow, et traînez le à vitesse constante sur un sol en ciment. Si le parpaing est assez lourd, et le

sandow assez souple, le parpaing n'arrivera pas à avancer à votre vitesse. Il restera bloqué un temps, glissera tout d'un coup, rapidement, détendant l'élastique, et se bloquant de nouveau, pour glisser peu après, l'élastique une fois retendu. Et ainsi de suite, en un cycle de glissements saccadés. C'est le modèle le plus simple de fonctionnement des failles. Chaque glissement est un séisme, et il faut attendre le rechargement élastique des roches - la tension du sandow - pour décoincer la faille et faire glisser les blocs rocheux.

## Propagation des ruptures

Dans l'expérience du parpaing, ce dernier glisse « en bloc » sur toute sa surface. Mais cela ne se passe pas aussi simplement pour les failles. Par exemple, lors du séisme de Sumatra, la zone de glissement a commencé à l'ouest de Banda Aceh, sur la côte nord de Sumatra, pour se déplacer vers le nord, faisant glisser au bout de 3 minutes la zone de contact de subduction sous les îles Nicobar, à 400 km, puis, vers la sixième minute, faisant glisser le contact sous les îles Andaman, à 1 000 km... Cette vitesse finie de la propagation de la zone de glissement, lors

du séisme, est liée à la souplesse des roches autour de la faille.

Pour le comprendre, imaginez une rangée de parpaings sur le sol, reliés entre eux par des ressorts (ou élastiques) tendus. Ces ressorts reproduisent la souplesse des roches. Chaque parpaing est relié par un deuxième ressort à une longue barre, que vous tirez à vitesse constante le long de la rangée. Au début, les ressorts se tendent, et les parpaings résistent, immobiles. Puis un premier parpaing commence à glisser ; son déplacement allonge ou raccourcit les ressorts qui le lient à ses voisins, qui peuvent alors se mettre à glisser, entraînant ainsi, de proche en proche, avec un retard lié à la souplesse des liens et à la masse des parpaings, tous les blocs de la rangée. Mais il se peut qu'un bloc résiste à l'à-coup de son voisin déstabilisé : le processus de propagation du glissement s'arrête.

Une surface de faille peut être vue comme une version continue de ce modèle « discret ».

Sur la faille, une petite surface, plus faible ou plus contrainte qu'ailleurs, se met à glisser

brusquement. Elle reporte les tractions sur les surfaces voisines de la même faille, et la zone en glissement s'agrandit, rompant les aspérités qui la bloquent, grâce aux fortes contraintes développées à sa périphérie. Il s'agit donc tout autant de la propagation d'un front de rupture, dessinant la frontière mobile de la zone déstabilisée, que de la propagation d'un glissement, mis en place rapidement derrière le front de rupture.

Si vous reprenez votre expérience de parpaing, vous observerez que parfois - le plus souvent - un seul parpaing se met à glisser. Les glissements à deux parpaings seront moins fréquents, à trois parpaings encore plus rares... Une glissade sera d'autant moins probable qu'elle impliquera un plus grand nombre de patins s'entraînant les uns les autres. Traduisons pour les séismes : plus une faille sera longue, moins sa rupture sismique sera probable.

Sur les failles, la propagation de la rupture et la mise en place du glissement montrent une grande complexité. Leurs géométries sont très irrégulières, présentant des change-

**Connaissant la position de la faille et son glissement cosismique, il est possible de calculer le degré de chargement ou au contraire de relaxation provoqué par le séisme dans les zones voisines. Cette méthode, proposée il y a une dizaine d'années, permet de mieux préciser les zones à risque pour les fortes répliques.**

ments de direction, des branchements, des discontinuités, à toutes les échelles - leur surface est de caractéristique fractale. Vous pouvez imaginer chaque parpaing de l'expérience constitué de plus petits blocs, reliés entre eux par des élastiques, ces petits blocs étant eux-mêmes constitués d'éléments plus petits, et ainsi de suite jusqu'aux plus petites échelles... On conçoit donc que, sur les failles, la propagation du front de rupture et la mise en place du glissement soient très hétérogènes ; sans compter qu'à ces irrégularités de géométrie s'ajoutent les variations spatiales de résistance de frottement, ainsi que celles des contraintes préexistantes : certaines surface peuvent être très chargées et prêtes à rompre, d'autres relaxées par un précédent séisme ou par un glissement continu.

## Génération des ondes sismiques

Ce mouvement brutal, en sens opposé, des deux blocs de part et d'autre d'une faille est la source des ondes sismiques. Ces dernières vont se propager loin de la faille, dans toutes les

directions, grâce à l'élasticité des roches. Des ondes de compression (ondes P) les plus rapides, à 6 km/s dans la croûte terrestre, suivies des ondes de cisaillement (ondes S), deux fois plus lentes, mais de plus forte amplitude. Elles atteignent la surface en quelques secondes pour des hypocentres localisés dans la croûte terrestre, les ondes P arrivant plutôt verticalement, les ondes S plutôt horizontalement, provoquant l'essentiel des dommages aux constructions.

Ce délai entre ondes P et ondes S permet une forme très particulière de prédiction - ou d'« alerte précoce » -, mise à profit en quelques régions bien surveillées. Ainsi à Mexico, menacée par des séismes de subduction 300 m au sud-ouest de la ville. Les premières ondes P sont détectées en une dizaine de secondes dans la région épiscopale, et les ondes S destructrices arrivant une centaine de secondes après, reste donc une minute pour réagir entre l'alerte et l'arrivée des ondes... Au Japon, des sismomètres sous-marins ont été installés au large de Tokyo, au plus près des failles de subduction, afin d'annoncer 10 à 20 secondes à l'avance l'arrivée des ondes S sur la côte, grâce à un traite-

ment automatique très rapide des signaux.

## Prédiction des répliques

Le glissement sur la faille provoque, outre les ondes sismiques, une déformation et un champ de déplacement permanent des roches autour de la faille rompue. Mais alors que l'amplitude des ondes sismiques diminue lentement avec la distance - en inverse de la distance -, le déplacement statique final décroît bien plus vite - au carré de la distance. Les déformations statiques associées sont donc très concentrées près de la faille, leur décroissance étant au cube de la distance : passez de 10 km à 100 km de la faille, la déformation est divisée par mille.

Ces perturbations de contrainte statique provoquent toujours, au voisinage de la faille rompue, de nombreuses autres ruptures tardives : ce sont les répliques. Connaissant la position de la faille et son glissement cosismique, il est possible de calculer le degré de chargement ou au contraire de relaxation provoqué par le séisme dans les zones voisines. Cette méthode, proposée il y a une dizaine d'années, permet de mieux préciser les zones à risque pour les fortes

répliques attendues après de grands séismes.

Mais l'effet perturbateur des ondes sismiques vient brouiller ces effets, et les répliques doivent être vues comme résultant d'une combinaison complexe des effets de chargement statiques - dominants à courte distance - et des effets dynamiques des vibrations - dominants à longue distance. Ces derniers ont été mis à jour par l'apparition de répliques à près de 1 000 km des sources sismiques.

Les répliques peuvent aussi être prédites en temps par une formule empirique. C'est la loi d'Omori vieille de plus d'un siècle, qui dit en gros que le nombre de répliques décroît en inverse du temps écoulé après un séisme : il y a 10 fois moins de répliques le dixième jour que le premier, après le choc principal. Plusieurs modèles physiques, encore débattus, expliquent cette loi, faisant intervenir des rhéologies non élastiques de roches, des lois de frottement spécifiques sur les failles, ou des circulations de fluides. Quel que soit le modèle retenu, les répliques sont sans doute les séismes les moins difficiles à prédire, au sens statistique, tant dans l'espace que dans le temps.

## Déformation finale et magnitude

Près de la faille, la déformation élastique des roches atteint 1 pour 10 000 ou 100 000, correspondant à des chutes de contrainte de dizaines de bars sur la faille, indépendamment

de la taille du séisme. La constance de cette chute de contrainte permet d'estimer rapidement de combien doit glisser une faille d'une longueur donnée. Ce glissement est en gros en proportion à cette longueur, d'un facteur 10 à 100 000, soit quelques mètres pour une faille d'une centaine de kilomètres de long.



David Parker/SCIENCE PHOTO LIBRARY-COSMOS

*Le temps de retour moyen des séismes sur certaines failles peut être déduit de la date des grandes ruptures sismiques de ces failles mais il est entaché de grandes incertitudes. Un cas exemplaire est celui du séisme de Parkfield, sur la faille de San Andreas. Le séisme prévu pour 1988 survint en 2004, avec 16 ans de retard.*

La déformation finale caractérise l'énergie élastique relâchée par la faille, et permet de donner une mesure énergétique à basse fréquence du séisme, le « moment sismique », égal au produit de la surface de la faille par son glissement, multiplié par la rigidité des roches. Il se trouve que l'énergie sismique, portée au loin par les ondes, lui est en gros proportionnelle. Comme le glissement est en gros proportionnel à la taille de la faille, ce moment sismique est proportionnel au cube de la longueur de la faille. Passer de 1 à 10 km multiplie le moment sismique, donc l'énergie, par 1 000...

Ce « moment sismique » permet une mesure de la magnitude du séisme - définie par une fonction de son logarithme - que l'on peut caler sur les échelles de magnitudes calculées avec l'amplitude des ondes sismiques à certaines fréquences et à certaines distances. On peut donc prédire la magnitude d'un séisme à venir à partir de la longueur de la faille menaçante...

## Prédiction des ondes émises

On conçoit bien que la complexité du processus de rupture et de glissement de la

faille au cours d'un séisme va entraîner l'émission d'un large spectre d'ondes sismiques, des plus longues périodes, proportionnelle à la dimension finale de la faille rompue ; jusqu'au KHz. Les ondes de fréquence supérieures à quelques dizaines de Hz sont très vite atténuées en quelques kilomètres, et ce sont celles dans la gamme de 1 à 10 Hz qui, en résonance avec les périodes propres des bâtiments, vont être à l'origine de la plupart des dommages.

Il est bien sûr impossible d'en prédire le détail ; mais il apparaît que les hétérogénéités de la faille affectant la rupture obéissent à des lois d'échelle, dépendant de la longueur de faille rompue, produisant toujours la même forme spectrale, et donnant une proportion stable entre les hautes et les moyennes fréquences émises. Il est donc possible de prévoir, au sens statistique, le niveau d'énergie rayonnée dans telle ou telle gamme de fréquence pour une longueur de faille donnée.

La description statistique des hétérogénéités du glissement et/ou de la vitesse de rupture dans les modèles numériques

peut donc être ajustée pour simuler la production d'ondes sismiques possédant un spectre réaliste. Cette approche a plusieurs avantages par rapport à l'approche simplifiée des ingénieurs, qui utilisent des lois empiriques donnant

**Le « moment sismique » permet une mesure de la magnitude du séisme que l'on peut caler sur les échelles de magnitudes calculées avec l'amplitude des ondes sismiques à certaines fréquences et à certaines distances. On peut donc prédire la magnitude d'un séisme à venir à partir de la longueur de la faille menaçante...**

les amplitudes maximales en fonction de la distance et de la magnitude. Elle prend en compte tout le spectre de la source, et modélise aussi les effets de directivité de la rupture qui peuvent être considérables à certaines fréquences. Cette directivité,

liée à la propagation de la rupture d'un bout à l'autre de la faille, est semblable à l'effet doppler qui module la fréquence apparente de la sirène des ambulances. A ceci près que pour les séismes, en raison des valeurs de vitesse de rupture très proche de celle des ondes S, la fréquence sismique apparente des ondes peut être décuplée, et les amplitudes multipliées par 10. Un effet qu'il vaut donc mieux savoir prévoir, pour certains sites placés directement dans l'axe d'une faille...

Pour compliquer ces analyses, on a découvert récemment des ruptures sismiques « super-ci-

saillantes », dont la vitesse dépasse celle des ondes S. Il s'ensuit un front d'onde conique, semblable à celui formé par les avions supersoniques et générateurs du fameux « bang » du même nom. La question de la possibilité d'un « bang » sismique produit par de telles ruptures n'a pas encore reçu de réponse claire.

Première difficulté, donc : bien prédire le rayonnement sismique des grandes failles. Mais immédiatement surgit une deuxième difficulté pour prédire les mouvements forts : car les ondes sismiques émises sont diffractées, réfléchies, diffusées par les hétérogénéités de la croûte terrestre, et souvent amplifiées par les couches sédimentaires peu rigides proches de la surface. Au site de mesure, le signal de la source est donc brouillé et nettement rallongé par tous ces échos.

Pour prédire le mouvement résultant, et notamment les fortes amplifications des couches superficielles de sédiments mous, les sismologues utilisent depuis une dizaine d'années l'enregistrement de petits séismes provenant de la même zone source, qui présente des caractéristiques de propagation très similaires. L'idée est que le glis-

sement sismique d'une grande faille peut être simulé par une superposition adéquate d'un très grand nombre de petits glissements, correspondant, pour leur composante à haute fréquence, à de petites ruptures sismiques. Une superposition adéquate de l'enregistrement des petits séismes doit donc

pouvoir simuler, moyennant quelque ajustement à basse fréquence, le sismogramme d'une grande rupture, prenant en compte les effets perturbateurs de la propagation des ondes. Cet ajustement entre les basses et hautes fréquences n'est cependant pas trivial, et ces techniques restent un sujet de recherches et de débats. Elles devraient conduire d'ici quelques années à des prédictions très performantes des mouvements forts du sol.

## **Prédiction de la taille du séisme**

Grâce à une vision plus fine des processus de rupture issus des mesures directes à proximité des failles, la prédiction des mouvements forts a donc

fait d'énormes progrès depuis quelque dix ans. Qu'en est-il de la prédiction des séismes eux-mêmes ?

On a vu que lorsqu'une rupture se propage, elle peut être arrêtée dans sa course par des zones de plus forte résistances, ou des zones déjà relaxées. Ces zones étant la plupart du temps mal, sinon totalement inconnues, il est impossible de prévoir avec certitude quelle sera la taille finale du séisme - et donc sa magnitude...

L'approche probabiliste la plus simple de cette question peut être fondée sur la loi de Gutenberg-Richer, qui donne la distribution statistique de la taille des séismes. Cette loi empirique indique que, dans une région donnée, le nombre de séismes de magnitude supérieure à  $M$  est dix fois supérieur à celui des magnitudes supérieures à  $M+1$ . Traduisons pour une rupture qui se propage : sans autre information sur la segmentation possible de la faille ni sur son histoire, nous pouvons estimer qu'un séisme en développement, ayant atteint la taille d'une magnitude 6, a en gros une chance sur 10 d'évoluer dans sa course en une magnitude 7, une chance sur 100 d'évoluer jusqu'à atteindre la magnitude 8, ainsi de suite...

L'utilisation de cette loi de Gutenberg-Richter est indispensable dans les régions de sismicité modérée, lorsque l'on ne connaît ni la vitesse moyenne des failles, ni la récurrence des grands séismes. La limitation de notre connaissance de l'activité passée de telle ou telle faille est compensée par nos mesures de l'activité récente de l'ensemble des failles de cette région : en supposant le régime stationnaire en temps et en espace, on cale la loi de Gutenberg-Richter sur le nombre de petits séismes observés, et on prédit un taux moyen de retour des séismes d'une magnitude forte donnée. Ainsi, en France métropolitaine, les quelques 20 séismes de magnitude estimée supérieure à 5 permettent d'estimer à un par siècle les séismes dépassant la magnitude 6,5. Mais on peut espérer faire nettement mieux pour l'estimation de la magnitude finale que par l'application aveugle de la loi de Gutenberg-Richter. Une fois la rupture démarrée, on peut savoir sur quelle faille elle se produit (avec des réseaux sismologiques denses et des outils d'analyse en temps réel...). Si la faille est très rectiligne sur 50 km, et/ou

si elle est en fin de cycle, la rupture a bien sûr plus de chance de se propager que si elle est segmentée tous les dix kilomètres, ou si un séisme l'a relaxée récemment. Le calcul de probabilité de la progression d'une rupture doit s'appuyer sur un grand nombre d'observations, et sur des modélisations numériques réalistes sur de gros calculateurs parallèles. Ces dernières sont en progrès rapide, abordant les questions de segmentation et de courbure des failles en trois dimensions, mais les lois de frottement et la question de l'endommagement y sont encore traitées de manières simplistes.

En attendant, la loi de Gutenberg-Richter reste le modèle de référence, mais il faut la réduire ou la tronquer aux plus fortes magnitudes, car elle prédit systématiquement un excès de très grands séismes. Comment estimer cette magnitude « maximale » dans une région donnée ? Par exemple, doit-on craindre aux Antilles un monstrueux séisme de subduction balayant d'un coup l'arc Caraïbe, comme celui de 2005 a rompu l'arc Nicobar-Andaman au nord de Sumatra ? La réponse n'est pas

triviale, les séismes les plus grands étant aussi les plus rares, avec des récurrences de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'années : ces séismes ont pour la plupart disparu de la mémoire des hommes. Les recherches des traces géologiques de ces paléoséismes sont ici nécessaires. Comme indiqué plus haut, elles pourraient être bientôt complétées par la simulation numérique des ruptures sur des failles segmentées.

## Raffinement de la prédiction : le moyen terme

La connaissance du temps de retour moyen des séismes sur certaines failles permet de réaliser des prédictions « à moyen terme » de la rupture de ces failles, à l'échelle de une à quelques décennies. Ce temps de retour moyen peut être simplement déduit de la date des grandes ruptures sismiques de ces failles, mais il est entaché de grandes incertitudes. Un cas exemplaire est celui du séisme de Parkfield, sur la faille de San Andreas. Ce segment de faille, de 25 km de long, avait cassé cinq fois entre 1857 et 1966, en moyenne une fois tous les 22 ans, avec une

**Grâce à une vision plus fine des processus de rupture issus des mesures directes à proximité des failles, la prédiction des mouvements forts a donc fait d'énormes progrès depuis quelque dix ans. Qu'en est-il de la prédiction des séismes eux-mêmes ?**



magnitude 6. L'avant dernière rupture, en 1966, a motivé dans les années 1980 le développement d'un réseau très dense d'instruments pour capter les éventuels précurseurs du prochain séisme, prévu pour 1988, et qui survint en 2004, avec 16 ans de retard ! Cette prédiction fut donc correcte en magnitude - les segments voisins n'ont pas été rompus - mais pas quant au temps de retour.

Temps de retour qui peut aussi être déduit de la connaissance du seul dernier séisme, associé à la mesure de la vitesse moyenne du glissement de la faille. C'est ainsi que l'on prévoit le

fameux *big one* californien, qui menace Los Angeles et qui serait la répétition du dernier grand séisme sur la partie sud de la faille de San Andreas, datant de 1857. Depuis, le coulisage des plaques se faisant à 3,5 cm/an, d'après les mesures GPS, la déformation élastique a récupéré un potentiel élastique d'environ 5 m qui pourront se relâcher à l'occasion du prochain séisme. Et 5 m, c'est justement le glissement cosismique moyen mesuré sur la faille en 1857. La faille est donc « mûre ».

Moins médiatisée mais plus près de nous, menaçant directement la ville d'Istanbul, un segment de la faille nord-anatolienne attend lui aussi son heure. Sa dernière rupture date de 1755, et avec une progression de 2 cm/an, la faille a déjà bien de quoi rompre en un séisme de magnitude 7,5. Mais la segmentation de la faille fait

suggérer à certains que la rupture s'arrêtera à mi-chemin, produisant un séisme de magnitude plus faible. La question reste ouverte...

En Europe, une faille bien surveillée est elle aussi en fin de cycle, avec une forte probabilité de rupture : c'est la faille d'Aigion, dans l'ouest du rift de Corinthe, capable de générer une rupture de magnitude 6,2... qui pourrait bien dégénérer en un séisme de magnitude 6,7 si elle venait à rompre la faille voisine dans le même élan.

On voit ici les difficultés de la prédiction à moyen terme : le cycle sismique n'est pas régulier, et la segmentation des failles peut diminuer ou augmenter la magnitude prédite...

## Précurseurs et transitoires

Prévoir avec quelques décennies d'avance a de nombreux avantages : les populations peuvent être informées, les décideurs ont le temps de mettre en œuvre des réglementations et des projets urbains adaptés, et les métiers du bâtiment peuvent intégrer ces dernières dans leur pratique.

Mais quand on parle prédiction sismique, le grand public pense surtout au très court terme, avec ses animaux renifleurs de séismes imminents, donnant l'alerte avant la catastrophe. Pour le scientifique, il s'agit alors de comprendre l'origine de ces phénomènes précurseurs observés quelques minutes à quelques semaines avant les grands séismes : micro sismicité anormale, déformation des sols, perturbation de la chimie des eaux souterraines, perturbations des champs électromagnétiques naturels... Une analyse rétrospective américaine a montré que près de 50 % des plus grands séismes de ces dernières décennies en Californie ont été précédés d'un séisme de magnitude 4, à moins de 10 km de l'épicentre et à moins de 30 jours - ce qui ne saurait être le fruit du hasard...

Ces « précurseurs » posent de nombreux problèmes. D'abord statistiques, car il est très difficile d'apporter la preuve qu'un phénomène anormal précédant un séisme ait un quelconque rapport avec la préparation de ce dernier : cette anomalie peut être une perturbation de l'instrument, ou de son environnement immédiat, aérien ou souterrain... On peut rappeler ici la méthode VAN, très médiatisée, qui associe en Grèce certains courants électriques souterrains à des séismes à venir, et dont les statistiques de corrélation, après vingt ans de polémiques, n'ont pas réussi à convaincre la communauté des géophysiciens. Ces courants, pour beaucoup, auraient une origine anthropique... L'autre difficulté est celle de la modélisation théorique de ces précurseurs, car l'absence de mesures en réseaux denses ne permet pas de départager les divers modèles proposés.

Un premier modèle de précurseur exploite les lois de frottements qui décrivent non seulement le processus de rupture sismique mais aussi la phase de déstabilisation lente et silencieuse, pendant laquelle le glissement de la faille s'accélère peu à peu sur une surface qui s'agrandit. Des modèles plus complexes y ajoutent la montée en pression d'eau dans la zone de

faille, favorisée par l'augmentation de la perméabilité créée par le glissement précurseur.

D'autres modèles font intervenir une cascade de petites ruptures sismiques se déclenchant les unes les autres, pour finalement provoquer la grande rupture par la déformation statique ou transitoire qu'elles produisent. Ces modèles sont à rapprocher de l'observation commune des répliques, car dans une séquence de répliques, l'une peut être de plus forte magnitude. On observe, en effet, qu'un premier séisme de magnitude  $M$  génère en gros une réplique de magnitude  $(M-1)$ , dix répliques de magnitude  $(M-2)$ , etc., suivant la loi

de Gutenberg-Richter. Mais si on applique cette loi à rebours, on obtient une chance sur cent d'avoir une réplique de magnitude  $M+1$ . Dans ce cas, le premier choc de magnitude  $M$  devient un précurseur du séisme de magnitude  $M+1$ .

Ces glissements lents, ces circulations de fluides, et ces petits séismes en cascades sont bien observés ; mais ils ne sont pas tous des précurseurs. La plupart du temps, ces activations locales s'estompent et

disparaissent rapidement, en quelques minutes, ou quelques mois, sans être suivies de grands séismes... Les considérer comme précurseurs conduirait à de nombreuses fausses alarmes !

La question de la prédiction à court terme s'est donc déplacée : il s'agit de savoir dans quelle mesure tel ou tel phénomène transitoire, comme un essaim sismique, peut être

**La question de la prédiction à court terme s'est donc déplacée : il s'agit de savoir dans quelle mesure tel ou tel phénomène transitoire, comme un essaim sismique, peut être précurseur d'une grande rupture. Et, plus généralement, à quelle physique précise et à quelle statistique d'occurrence obéissent ces transitoires.**

précurseur d'une grande rupture. Et, plus généralement, à quelle physique précise et à quelle statistique d'occurrence obéissent ces transitoires.

Dans le cas des essais sismiques précurseurs, qui ont permis des études très précises, il semble que leur taille est en

proportion de la dimension du séisme à venir. Cette observation est troublante, car on peut en conclure que ce qui se passe dans la zone de préparation de la rupture, de 100 m ou 1 km de long, est corrélé avec la segmentation lointaine de la faille, à 20 ou 200 km de distance, là où la rupture s'arrêtera. Cette corrélation statistique pourrait être liée à l'épaisseur de la zone de faille : en effet, une zone épaisse est d'une part l'apanage d'une grande faille,

donc découpée en longs segments et favorisant de grands séismes, et d'autre part, permet le développement de glissement asismiques précurseurs de grandes ampleurs. Ces recherches sur les transitoires ne font que débiter. Aux rares précurseurs s'ajoutent depuis quelques années toute une collection de phénomènes transitoires inattendus dont les plus étranges sont les trémors tectoniques, sorte de murmure des failles ou gargouillement des zones profondes de la croûte terrestre, dont la cause et le lien avec de grands séismes en préparation restent très mystérieuses.

## **Bilan sur la prédiction sismique**

La question de la prédiction des séismes a donc de multiples facettes, et des progrès considérables ont été réalisés depuis l'avènement de la tectonique des plaques. Que ce soit pour prédire la sismicité d'une région, la rupture prochaine d'une faille, à court ou moyen termes, ou prévoir ses effets destructeurs, les sismologues doivent associer modèles et observations dans

une approche nécessairement probabiliste.

La compréhension et la modélisation du processus de rupture d'une faille est une des clés pour de ces prédictions, et beaucoup reste à faire pour rendre les modèles exploitables et prédictifs, pour ce qui est des moyen et court termes. Mais le retard actuel est surtout du côté des observations : retard qui se comble rapidement par l'installation de grands réseaux denses de sismomètres, de systèmes GPS, et de capteurs de déformation très sensibles dans les régions les plus actives de la planète, avec en particulier des mesures en forage profond dans les zones de failles. Cet effort colossal d'instrumentation est la condition requise pour progresser encore sur tous les fronts de la prédiction sismique.

Bernard, P., *Les séismes*, Graines de Sciences 6, Ed. Le Pommier, 2004.

Bernard, P., *Earthquake precursors and crustal transients*, *Nature Debate*, 1999. [http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake\\_3.html](http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake_3.html)

## *Bibliographie*

Bernard, P., *Prévoir les séismes : Réalité ou utopie*, Revue du Palais de la Découverte, pp27-36, juin 2004.

Bernard, P., *Qu'est-ce qui fait trembler la terre*, coll. Bulles de Sciences, EDP-Sciences, 2003.

