



PREVOIR LES SEISMES

Jacques DOREL *

Parmi les cataclysmes naturels, les tremblements de terre sont, avec les éruptions volcaniques, les phénomènes les plus spectaculaires et les plus meurtriers que les hommes aient dû subir au cours de leur histoire.

Le caractère à la fois soudain et imprévisible de ce fléau, précédé d'aucun signe extérieur apparent pour le commun des hommes, avait entouré ce phénomène d'un monde de croyances, de superstitions et de mythes.

La science des tremblements de terre (sismologie), née à la fin du siècle dernier avec la construction du premier sismographe (instrument qui mesure les mouvements du sol) réalisé par l'anglais John Milne en 1880, devait ouvrir la voie à une étude et à une compréhension plus rationnelle du phénomène, débouchant tout naturellement sur l'idée de la prévision des séismes.

Qu'est-ce qu'un séisme ?

Un séisme peut être considéré comme un mouvement naturel du sol résultant de la libération, en un point de la Terre (foyer du séisme), d'une certaine quantité d'énergie accumulée antérieurement au séisme. Cette libération se fait brutalement et se traduit par des déformations permanentes du sol, telles que fissures, glissements, au voisinage du foyer et par des mouvements élastiques vibratoires qui se propagent depuis le foyer jusqu'aux différents points de la surface terrestre.

La rupture qui constitue le séisme, se propage parfois le long d'une ligne appelée faille, très visible dans certaines régions comme la faille de San Andrés aux Etats-Unis. Le séisme est alors la conséquence du mouvement relatif de deux blocs, la friction se faisant le long du plan de faille. Mais tous les séismes ne répondent pas à un schéma aussi simple, en particulier les séismes profonds dont le mécanisme peut résulter de contraintes ayant pour origine des processus physico-chimiques où la température et la pression jouent un rôle prépondérant.

Illustration pour « Les Enfants du Capitaine Grant », de Jules Verne.
Une colonne incandescente fusa vers le ciel.

La détermination des mécanismes générateurs de séismes est fondamentale pour la prévision des séismes, mais aussi pour toute compréhension globale des forces qui s'exercent au sein des roches.

Zones à séismes

Les séismes ne sont pas distribués uniformément à la surface du globe. Il existe des régions où le phénomène sismique est pratiquement inconnu comme par exemple le plateau brésilien, le Nord de l'URSS, le Sahara..., par contre la sismicité est concentrée en zones dont l'une encercle presque complètement l'océan Pacifique, une autre forme la zone alpino-himalayenne sur la bordure Sud de l'Europe et de l'Asie, enfin à travers les océans serpente une étroite ceinture sismique de 50 000 km de longueur et qui constitue les dorsales des différents océans. Si toutes ces régions sont sismiques, elles ne le sont pas au même degré. Ainsi quatre-vingt pour cent des séismes se produisent sur la « ceinture de feu » du Pacifique qui dissipe 90 % de l'énergie libérée à travers le globe sous forme sismique et où se trouve la totalité des séismes profonds. Les sismologues ont depuis longtemps relevé la coïncidence des zones sismiques avec les plissements tertiaires. Mais il a fallu attendre ces dix dernières années pour avoir une compréhension de ces zones sismiques à l'échelle du globe.

La tectonique des plaques

L'hypothèse de la tectonique des plaques donne une description cinématique de l'activité tectonique actuelle de la Terre. Elle considère la surface de la Terre, sur une épaisseur de 100 km en moyenne, composée de plaques rigides (lithosphère) en mouvement les unes par rapport aux autres ; les mouvements différentiels entre plaques se produisant le long des zones sismiques. Les frontières de plaques passent indifféremment à l'intérieur des océans et des continents. De plus il y a un renouvellement continu de la lithosphère qui a pour conséquence un mouvement relatif des conti-

nents qui sont supportés par les plaques ; c'est la dérive des continents, longtemps soupçonnée, maintenant admise.

Cette hypothèse offre donc l'avantage d'être unificatrice et cohérente à l'échelle du globe. La sismicité globale n'est que l'expression des déplacements relatifs des plaques de lithosphère. Xavier Le Pichon explique la plus grande partie de la sismicité en prenant un modèle à six plaques et en déterminant leurs mouvements à la surface du globe. On entrevoit déjà les possibilités prédictives d'une telle hypothèse.

Fixer à l'avance la date et le lieu d'un séisme ?

La prévision des séismes est un problème extrêmement complexe et qui en est à ses balbutiements. L'objectif final est évidemment de pouvoir fixer à l'avance la date et le lieu d'un séisme. Il n'existe actuellement aucun exemple d'une telle prévision suivie de succès. Toute prévision devrait passer par une connaissance globale des mécanismes qui conduisent à ces états de contrainte et de tension dans une région donnée, et qui aboutissent au déclenchement des séismes. Avec la tectonique des plaques nous avons une première approche du problème puisque les zones sismiques avec leurs caractéristiques propres sont bien définies. Mais le champ de tension auquel est soumise la surface de la Terre n'est pas homogène, ni constant dans le temps et l'espace, et les paramètres de ces variations ne sont pas encore connus.

Aussi actuellement s'oriente-t-on davantage vers l'étude locale des phénomènes qui peuvent précéder et accompagner les séismes. Ces phénomènes pouvant d'ailleurs avoir des caractères différents d'une région à l'autre. Pendant longtemps le seul élément de prévision que l'on possédait était le degré de sismicité d'une région. On avait constaté que les séismes les plus violents avaient lieu là où ils étaient les plus nombreux. On avait donc établi une relation entre la magnitude des séismes et leur nombre, et par conséquent une probabilité pour qu'un séisme de magnitude donnée survienne au cours d'un temps donné. Ainsi, pour la Californie on a considéré qu'un

* Sismologue à l'Institut de Physique du Globe de Paris.

tremblement de terre de magnitude 8, c'est-à-dire comparable à celui de 1906 qui détruisit San Francisco, devrait intervenir dans les 130 années à venir. On voit ainsi le degré d'incertitude d'une telle méthode, surtout lorsque l'on considère que les lois que l'on peut établir à ce sujet sont basées sur un temps très court (moins d'un siècle) et que la récurrence des séismes peut être supérieure à ce temps.

Signes avant-coureurs

Des études plus sérieuses ont donc été entreprises ces dix dernières années. Elles comportent deux sortes d'observations, d'une part l'enregistrement de la vitesse de déformation de la croûte terrestre et d'autre part l'étude des variations de certains paramètres géophysiques tels que le champ magnétique, la conductivité électrique, la vitesse des ondes sismiques.

sures de distances, effectuées par des géodimètres ou des lasers, permettent de mettre en évidence les déplacements relatifs des deux lèvres de la faille. En Californie, sur certaines parties de la faille de San Andreas, les déplacements sont de l'ordre de 4 cm par an. Le séisme de Corralitos en 1964 fut précédé d'une inversion du mouvement le long de la faille. Une découverte importante de ces dernières années a été de montrer qu'il peut y avoir mouvement le long d'une faille, sans séisme, du moins dans la partie superficielle de la croûte. La seule observation du mouvement du sol ne conduit donc pas à des conclusions certaines quant à la prévision des séismes.

Effets magnétiques

Un échantillon de roche soumis à une pression voit sa susceptibilité magnétique diminuer dans la direction de la

contrainte sur une grande épaisseur de croûte.

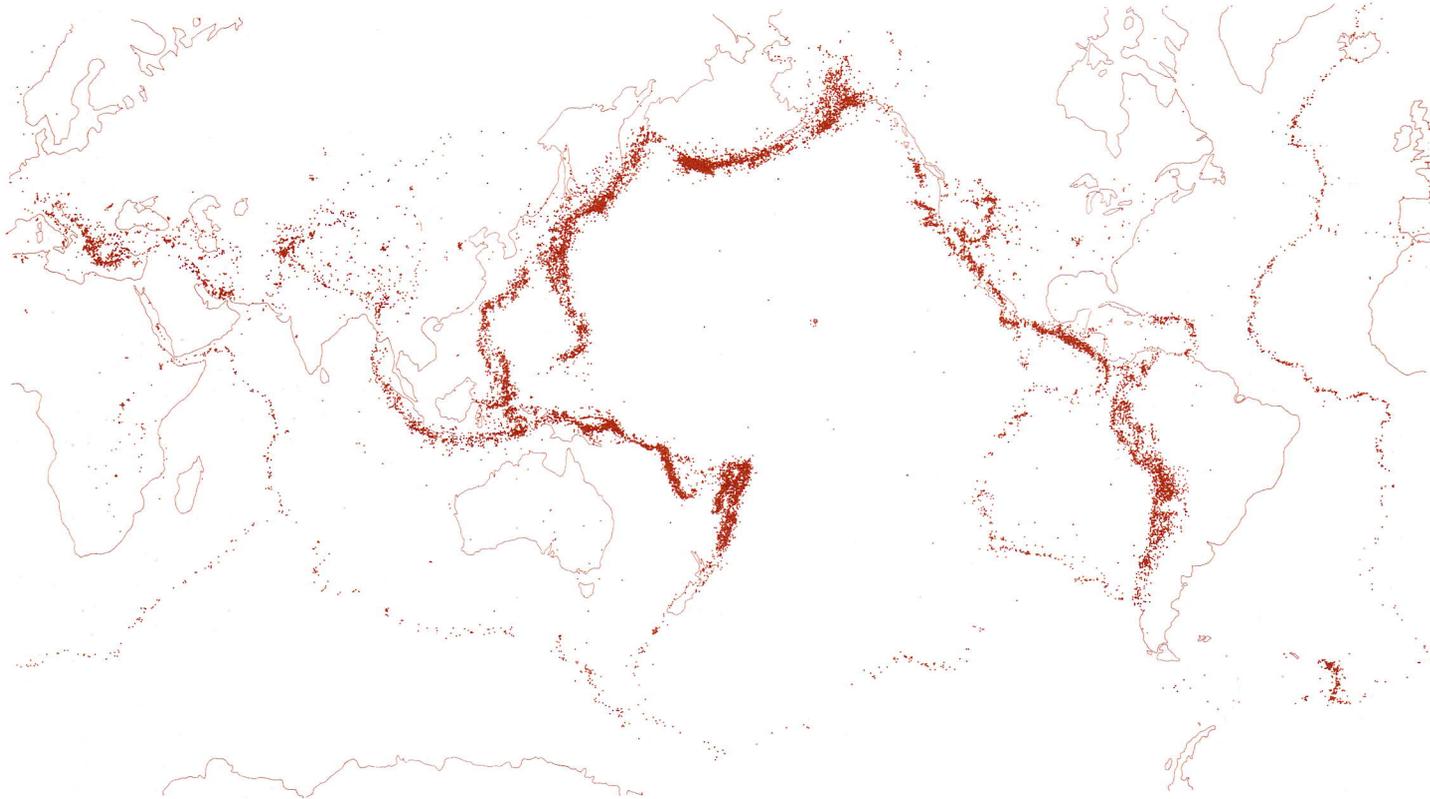
Méthodes géoélectriques

La résistivité électrique des roches, saturées en eau, varie avec la pression. Les Japonais ont construit des variomètres qui enregistrent de façon continue la résistivité. Dans l'île d'Hokkaido des modifications ont été enregistrées deux heures avant un séisme de magnitude 7,5 le 16 mai 1968.

Méthodes sismiques

Des variations de l'ordre de 15 % dans la vitesse des ondes sismiques ont été observées dans la région de Garm, en U.R.S.S., avant et après un séisme. Ces variations peuvent être attribuées à une modification de l'élasticité des roches.

L'ensemble des observations sur le



Sismicité de la Terre (1961-1967). Profondeurs 000 à 700 km.

Déformations lentes du sol

Les roches étant des matériaux élastiques qui sont soumis à des contraintes tectoniques, il semble naturel d'envisager une déformation du sol avant un séisme. Les méthodes utilisées font appel soit à la géodésie pour les déplacements finis, soit à la sismologie pour les déplacements continus.

Les observations de tels déplacements sont nombreuses. Citons l'exemple du séisme de Niigata au Japon (1964), de magnitude 7,3, qui fut précédé d'une lente montée du sol de l'ordre de 10 cm en 60 ans, montée qui s'accéléra pendant les dix ans qui précédèrent le séisme. De même le séisme de Skopje en Yougoslavie en 1963 fut précédé pendant 4 ans d'une modification de la vitesse de mouvement vertical du sol qui passa de 1 mm/an à 5 mm/an. Dans le cas des failles à coulissage horizontal, les me-

compression et augmenter dans la direction perpendiculaire. Cette modification des caractéristiques magnétiques des roches produit donc une perturbation très faible du champ magnétique (de l'ordre du dix millième).

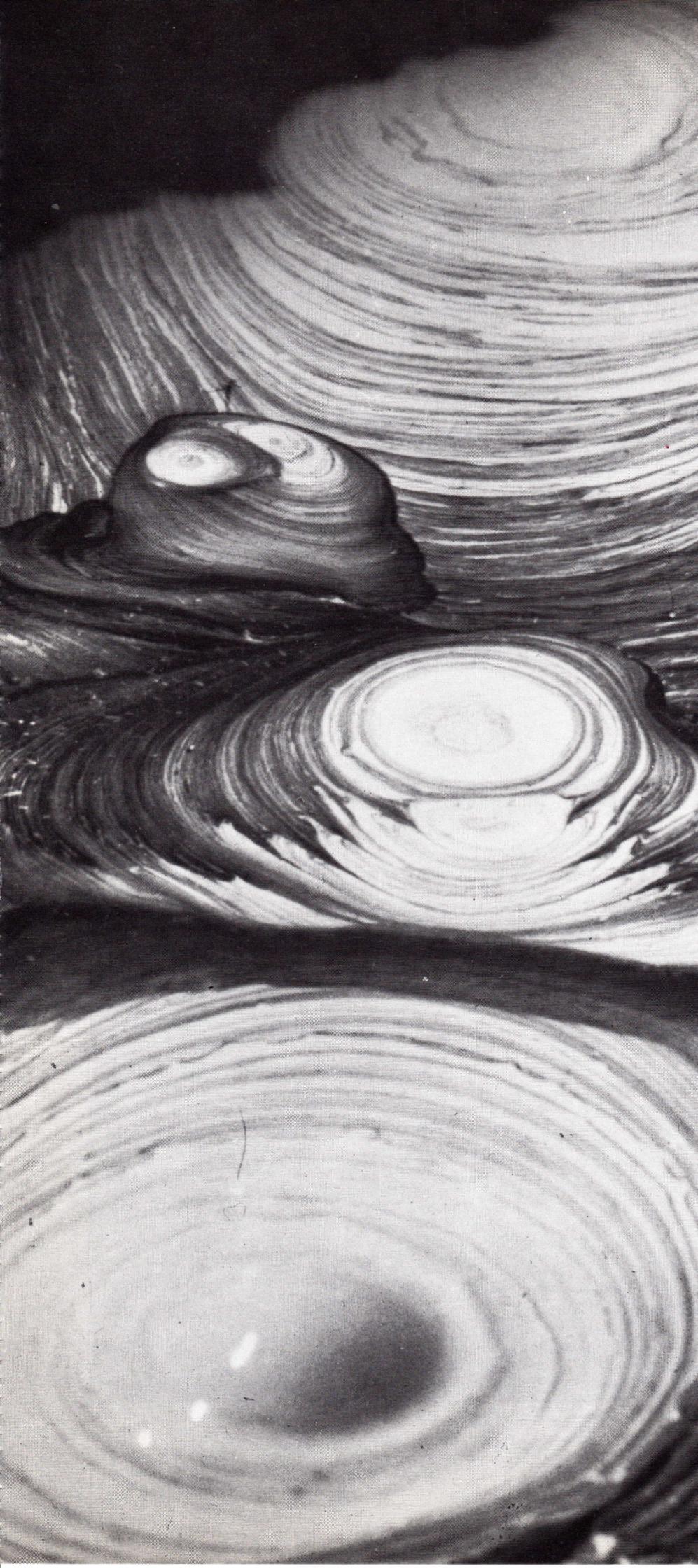
Toujours sur la faille de San Andreas, une relation entre un événement magnétique et un déplacement de la faille fut mise en évidence par Breiner en 1966, la perturbation magnétique précédant de deux jours le mouvement de la faille et de trois jours un séisme. Des possibilités existent également dans l'étude des anomalies des variations séculaires du champ magnétique comme l'ont montré les Russes dans le Kazakhstan.

La difficulté de ces méthodes magnétiques réside dans le fait que le signal cherché est du même ordre de grandeur que le bruit de fond parasite d'origine naturelle. Mais cette méthode est intéressante car elle intègre les effets de

terrain doit être complété par des études de laboratoire ; celles-ci portent sur les mécanismes des fractures et sur les changements de propriétés des roches, lorsqu'elles sont soumises à des tensions.

Les séismes provoqués

Mais un pas plus important, pour la prévision des séismes, a été franchi avec les séismes provoqués artificiellement par les hommes, dans le cas de construction de barrages et de lacs réservoirs, d'injection d'eau sous pression dans un puits et de séismes provoqués dans le voisinage immédiat des explosions atomiques. Rothe a montré que l'activité sismique dans le cas des barrages était nette lorsque la retenue d'eau dépassait une hauteur de 100 m et que des conditions géologiques particulières étaient satisfaites. Le choc principal est en général précédé de nombreuses petites secous-



ses. L'exemple le plus important est celui du barrage de Koyna, aux Indes, situé dans une région considérée comme asismique, et où le choc destructeur de magnitude 6,4, survenu 5 ans après le remplissage du barrage, provoqua de nombreux dégâts et une auto-destruction partielle du barrage (fissure). Un autre exemple plus modeste est celui du barrage de Monteynard en France, près de Grenoble, où le remplissage du barrage terminé en mars 1960 fut suivi d'un séisme important pour cette région, le 5 août 1963.

L'explication de ces séismes doit être recherchée dans le phénomène de lubrification des plans de faille qui peuvent exister sous le lac réservoir, c'est-à-dire à une diminution de la résistance de friction des roches due à la circulation de l'eau sous pression.

Une des conséquences de l'observation de ces phénomènes a conduit certains auteurs à proposer de libérer l'énergie sismique par de petits séismes provoqués en injectant un fluide sous pression dans un puits, ce qui aurait pour effet d'éviter les gros séismes. Le phénomène observé à Denver, aux Etats-Unis, est à ce sujet digne d'intérêt. Une usine chimique ayant à se débarrasser de fluides encombrants décida d'injecter ceux-ci sous pression dans un puits de 3 760 mètres. Il en résulta une série de séismes dont la corrélation avec l'injection était indiscutable. Les explosions atomiques sont également suivies par des essaims de petits séismes dont l'explication relève de considérations analogues à celles dont nous venons de parler. Il y a là aussi possibilité de relâcher les tensions dans une région au moyen d'explosions artificielles.

Prévision ou protection ?

De l'ensemble de ces résultats il ne résulte encore aucune loi précise. Une prévision efficace nécessitera beaucoup d'efforts et beaucoup de crédits. Le projet du programme américain sur la prévision des séismes s'élève à 100 millions de dollars. Les Japonais, depuis 1965, font des plans quinquennaux sur ce sujet. Des bulletins de prévision de séismes furent même émis pour la première fois lors de la crise sismique de Matsushiro en 1965. Des groupes de travail se sont formés à l'occasion de symposiums internationaux sur la prédiction des tremblements de terre.

Cependant, actuellement on peut se demander si la prévision n'est pas moins importante que la protection contre les séismes.

Des règles de constructions asismiques ont été éditées dans plusieurs pays dont la France, basées sur l'étude des dégâts causés par les grands séismes passés. Des coefficients sismiques ont été déterminés pour chaque région, dont les architectes doivent tenir compte. La prévision à long terme des séismes, si elle reste souhaitable, ne doit pas faire oublier le rôle de frein qu'elle peut jouer sur le développement économique d'une région, si elle n'est pas accompagnée de mesures de protection.

J. D.

Bulles de boues chaudes
dans les Solfatares à Wairakei
(Nouvelle-Zélande, 1959).