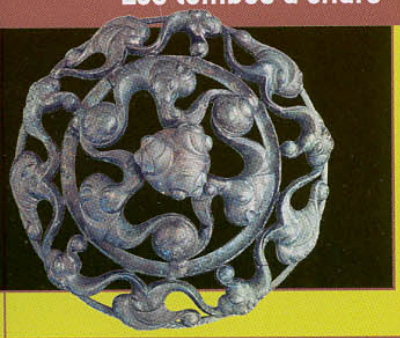
pourlascience.com

POUR LA SCIENCE

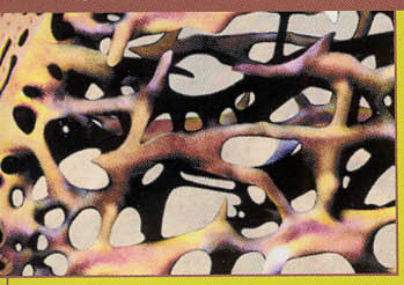
Avril 2003

Édition française de Scientific American

Les tombes à chars



L'épidémie d'ostéoporose



La parade des orchidées

Le dialogue des séismes

FRANCE METRO : 5,95 €, DOM : 7,13 €, BEL : 7,07 €,
CH : 11,2 FS, CAN : 8,95 $, LUX : 6,77 €, ESP : 8,71 €,
PORT. CONT. : 6,33 €, AND : 5,95 € MAY : 8,92 €, REU : 8,92 €

M 02687 - 306 - F: 5,95 €

Conversations entre séismes

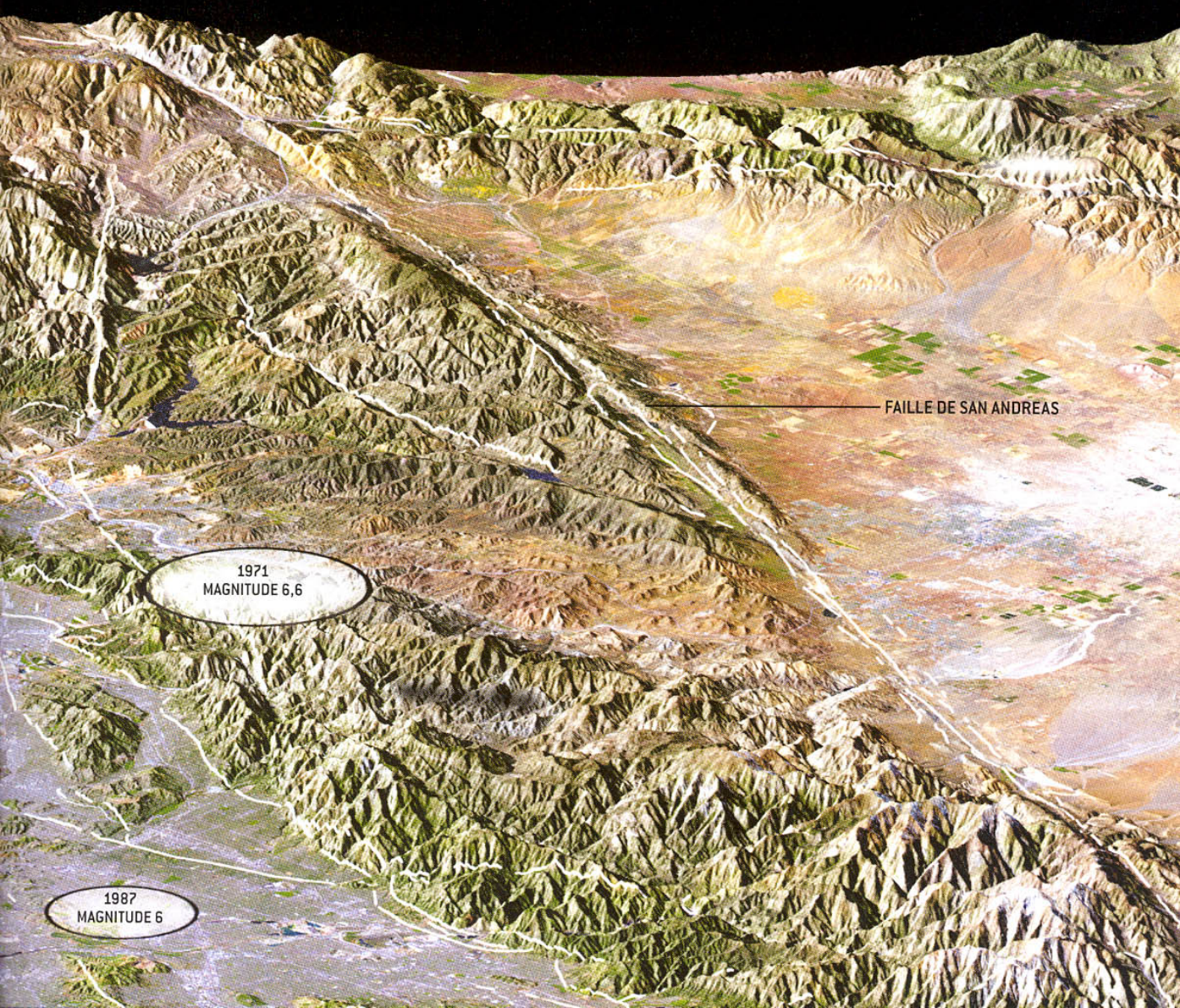
Les séismes de magnitude élevée influeraient sur la localisation et sur la date des séismes qui auront lieu dans la même région. Cette découverte améliorerait les prévisions des sismologues.

Ross Stein

1. À Los Angeles et dans ses environs, 13 millions de personnes vivent au milieu d'un réseau complexe de failles *(les traits blancs)*, notamment celle de San Andreas. Certains sismologues pensent que chacune des secousses notables qui ont ébranlé la région depuis les années 1850 a probablement influé sur la localisation et la date des secousses suivantes.

Robert E. Crippen

Les sismologues espèrent un jour prévoir où et quand frapperont les séismes meurtriers. Au cours des années 1990, les espoirs de prévisions fiables se sont amenuisés : le comportement des failles de la croûte terrestre où se déclenchent les séismes est si complexe que les tremblements de terre les plus importants semblent isolés, aléatoires et totalement imprévisibles. La plupart des sismologues supposent qu'après un tremblement de terre majeur et après les secousses secondaires – les répliques –, la faille reste au repos jusqu'à ce que les tensions de la croûte terrestre réapparaissent, ce qui prend quelques centaines à quelques milliers d'années ; chaque tremblement de terre libérerait le sous-sol de ses contraintes mécaniques. Cette théorie est remise en cause par une découverte récente : les tremblements de terre interagissent. En reprenant les données de séismes passés, en analysant à nouveau le comportement des failles, et en nous fondant sur des expériences de laboratoire, nous avons découvert que les contraintes relâchées pendant un tremblement de terre se dissipent seulement en partie : pour la plupart, elles se déplacent le long de la faille et se concentrent sur des sites proches, jusqu'à provoquer de nouveaux séismes. À cause de ce phénomène, la probabilité qu'un tremblement de terre ultérieur ait lieu le long de la même faille ou sur une faille voisine peut tripler. Un tel risque ne justifierait pas une évacuation immédiate de la zone, mais maintiendrait les secours en état d'alerte pour qu'ils interviennent dès les premières secousses.



Notre théorie – le modèle de « déclenchement par les contraintes » – repose sur l'idée que les failles réagissent aux faibles forces qui leur sont transmises par les glissements et les tremblements des failles voisines. L'étude d'une vingtaine de failles nous a convaincus qu'une infime augmentation des contraintes – l'équivalent d'un huitième de la pression d'un pneu de voiture – suffit parfois à déclencher un tremblement de terre.

Jusqu'à présent, on ne soupçonnait pas de telles interactions, et, dès lors, elles n'étaient pas prises en compte dans la prévision des tremblements de terre. Les sismologues se sont montrés méfiants vis-à-vis de notre théorie, jusqu'à ce que notre hypothèse de déclenchement de séismes par les contraintes soit confortée par des séismes survenus dans diverses régions ; notre modèle a expliqué la localisation et la fréquence des séismes qui ont suivi plusieurs secousses dévastatrices survenues en Californie, au Japon et en Turquie. Nous interprétons ces « conversations » entre séismes avec l'espoir de trouver des indices fiables qui permettraient d'alerter les populations avant que ne surviennent les catastrophes.

Des répliques insoupçonnées

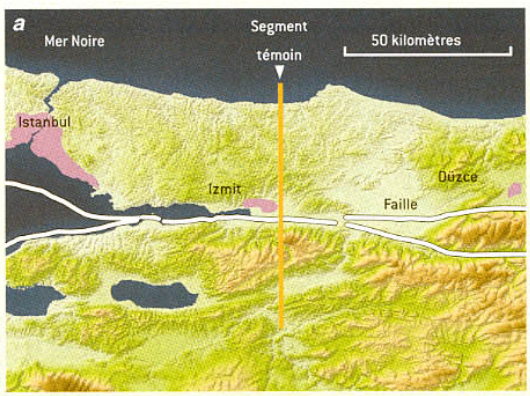
Il fallait un certain cran pour oser contredire la théorie quasi universelle selon laquelle les tremblements de terre frappent au hasard. Pendant plus de 30 ans, des centaines de géophysiciens ont cherché à caractériser les terrains favorables aux séismes. Certains ont évalué les variations de la fréquence des petites secousses, d'autres ont utilisé des instruments extrêmement sensibles pour mesurer d'imperceptibles inclinaisons, étirements ou déplacements de la croûte terrestre. D'autres encore ont étudié les mouvements souterrains de gaz ou de fluides, l'apparition d'ondes électromagnétiques, ou bien surveillé de minuscules fissures dans des rochers pour voir si elles s'ouvrent ou se referment avant les secousses les plus fortes. Toutefois les géophysiciens n'ont guère trouvé de facteurs annonciateurs reproductibles d'un grand séisme à l'autre. Si l'on connaît bien le moteur des tremblements de terre – le déplacement des plaques de la croûte terrestre –, la répartition en fréquence et en intensité des séismes dans une région donnée semblait imprévisible.

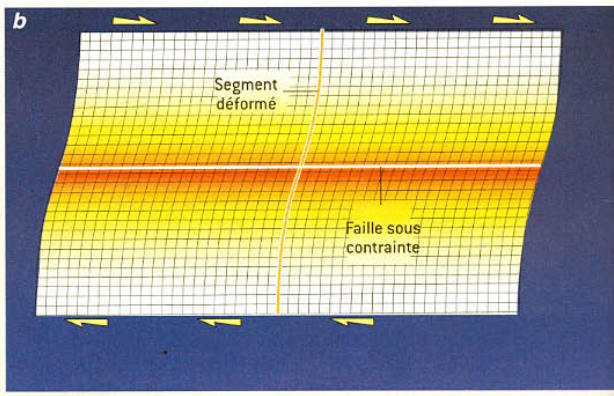
Pourtant, l'analyse des données historiques sur les répliques – les secousses qui surviennent après un tremblement de terre – révèle qu'un tiers de ces répliques sont groupées dans le temps et dans l'espace. Dès le tout début du XX^{e} siècle, le sismologue japonais Fusakuchi Omori avait remarqué que le nombre de répliques évolue dans le temps toujours de la même façon : les répliques sont nombreuses juste après le choc principal ; au bout de dix jours, elles sont dix fois moins nombreuses ; après 100 jours, 100 fois plus rares, et ainsi de suite. La régularité de cette loi – la loi d'Omori – contredit le caractère supposé aléatoire des séismes. Pourtant, les répliques étant moins fortes que les séismes catastrophiques, on les a longtemps négligées, personne ne pensant qu'elles pouvaient être une des clefs de la sismicité. Il est vrai qu'une fois les répliques

Le transfert de contraintes lors du séisme d'Izmit

La région d'Istanbul est l'une des plus menacées du globe par les tremblements de terre. Le long de la faille Nord-anatolienne *(a, la ligne blanche)*, la zone située au Nord se déplace vers l'Est par rapport à la zone située au Sud. Les deux pans de la faille résistent à ces mouvements antagonistes jusqu'à ce que les contraintes dépassent les forces de frottement, les roches situées de part et d'autre glissant alors brusquement. La faille Nord-anatolienne a subi un phénomène de ce type, déclenchant un séisme catastrophique le 17 août 1999 : une secousse de magnitude 7,4 a frappé la région d'Izmit, faisant 25 000 morts. En calculant de façon simplifiée les contraintes avant et après la secousse, nous avons montré que les contraintes dites de Coulomb ont diminué le long du segment de la faille qui avait glissé, mais ont augmenté ailleurs sur la faille.

Depuis le précédent grand séisme qui eut lieu il y a 200 ans, les contraintes s'étaient accumulées le long du segment de la faille Nord-anatolienne située à proximité d'Izmit *(b, en rouge)*. En superposant au paysage un maillage, nous avons mis en évidence les zones les plus déformées, où les contraintes sont les plus fortes. Les carrés situés le long de la faille sont étirés





écartées, les autres petites secousses semblent aléatoires. Un tel raisonnement pose toutefois un problème méthodologique : pourquoi négliger les tremblements de terre les plus prévisibles et prétendre ensuite que les autres sont désordonnés ? Mes collègues et moi-même avons cherché pourquoi les répliques sont si régulières.

Nous avons commencé notre étude dans l'une des régions de la planète où les séismes sont les plus fréquents : le système de la faille de San Andreas, qui longe la Californie. D'après les archives sismiques locales, le jour qui suit un séisme de magnitude 7,3, la probabilité qu'une nouvelle secousse de magnitude élevée ait lieu à moins de 100 kilomètres du premier séisme est égale à 67 pour cent, soit 20 000 fois plus qu'en temps ordinaire. Ainsi, personne ne fut vraiment surpris, en juin 1992, quand un séisme de magnitude 6,5 fit trembler la Terre près de la ville de Big Bear en Californie du Sud, seulement trois heures après la survenue d'un séisme de magnitude 7,3 à Landers, éloignée de 40 kilomètres (les deux événements se produisirent dans une zone désertique très peu peuplée, et n'atteignirent pas Los Angeles). Toutefois, le second séisme eut lieu à Big Bear à l'écart de la faille qui avait glissé pendant la secousse de Landers. Le séisme de Big Bear ressemblait à une réplique de par son déroulement temporel, mais s'en différenciait par ses caractéristiques spatiales. Cette localisation inattendue cachait-elle la clé que nous recherchions ?

En cartographiant l'emplacement de Landers, de Big Bear et de centaines de tremblements de terre ayant eu lieu en Californie, nous avons décelé un motif particulier dans la distribution des répliques (comme prévu), mais aussi des secousses plus faibles qui surviennent quelques jours, quelques semaines, ou même quelques années après un séisme important. Comme à Big Bear, la majorité de ces secousses avait lieu dans des zones éloignées de la faille qui avait glissé pendant le tremblement de terre, loin de là où l'on s'attendait à observer des répliques.

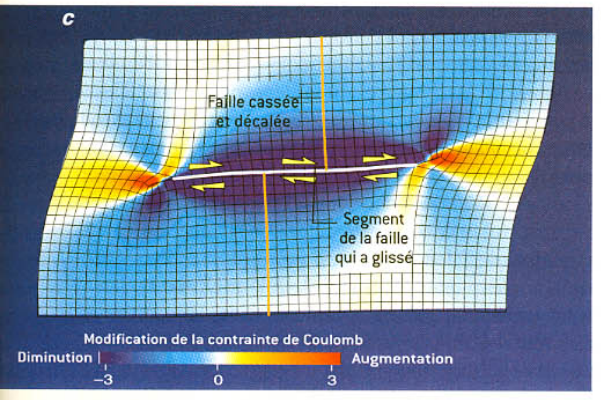
Zones actives et inertes

Nous avons commencé par étudier la redistribution des contraintes à l'intérieur de la croûte terrestre après les séismes importants. Dans la région de San Andreas, ces contraintes proviennent du glissement de la plaque qui porte l'Amérique du Nord (laquelle se déplace vers le Sud) par rapport à celle qui constitue le fond de l'océan Pacifique. Elles s'accumulent sur des fractures de l'écorce terrestre, les failles, où elles provoquent par moments le coulissement en sens inverse des deux pans de roches adjacents. Une contrainte a deux composantes le long d'une faille : la composante de cisaillement, parallèle à la faille, résulte du frottement des deux pans de la faille qui coulissent en sens contraire ; la composante de compression s'exerce perpendiculairement à la faille. La modification d'une seule de ces composantes peut autoriser le glissement de la roche, soit quand la force de cisaillement est supérieure à la résistance exercée par les forces de frottement, soit lorsque la compression se relâche. Les deux composantes des contraintes, dont la superposition est nommée contrainte de Coulomb, diminuent le long de la portion de faille qui glisse. Durant un séisme, les contraintes qui s'exercent sur une faille se relâchent. Comme l'énergie libérée ne peut être transformée intégralement en chaleur lors du glissement, les contraintes se redistribuent en d'autres points de la même faille, ou de failles voisines. Nous avons alors postulé que cette augmentation de la contrainte de Coulomb suffisait à déclencher des séismes sur ces nouveaux emplacements.

Les géophysiciens calculaient depuis longtemps la contrainte de Coulomb associée aux failles, mais ils n'y avaient jamais recouru pour expliquer la sismicité, pensant que les changements de contraintes étaient trop insignifiants pour avoir des conséquences : les contraintes transférées d'une faille à d'autres représentent généralement moins de 3×10^5 pascals, et jamais plus de dix pour cent de la variation de contraintes subie par une faille durant un séisme. Je me demandais si cela pouvait suffire à déclencher une rupture de faille. Nous avons alors évalué l'augmentation des contraintes après des séismes notables, en Californie du Sud, et nous avons constaté que n'importe quelle accumulation de contraintes, aussi minime soit-elle, correspond toujours aux sites où surviennent les secousses ultérieures. Autrement dit, les régions où les contraintes augmentent sont le théâtre de la majorité des répliques, intenses ou non. Inversement, toute réduction des contraintes diminue le risque de répliques, localisées dans ce que l'on nomme les zones d'ombre du séisme primaire.

L'analyse des contraintes de Coulomb expliquait la localisation de certains séismes du passé, mais pouvait-on utiliser cette méthode pour prévoir la localisation des séismes

en parallélogrammes, les déformations les plus importantes étant situées tout près de la faille. Après le séisme, les contraintes situées tout le long du segment de faille qui a glissé se sont partiellement dissipées *(c, en bleu)*. La ligne précédemment déformée a rompu, et les deux pans de la faille se sont éloignés de plusieurs mètres, tandis que les carrés du maillage les plus proches de la faille retrouvaient leur forme initiale. Les fortes contraintes se concentrent maintenant au-delà des deux extrémités du segment de faille qui a glissé, là où les carrés du maillage sont plus déformés qu'avant le séisme.



La prévision à l'aide des séismes précurseurs

Les idées exposées par R. Stein ont notablement changé notre vision de la sismicité, et affiné notre capacité à en prédire certaines caractéristiques. Cependant, le débat sur la prévisibilité des séismes, lancé il y a moins de dix ans, reste polémique, le scepticisme de certains tempérant l'enthousiasme des autres. En particulier, pour les contraintes de Coulomb, il apparaît clairement qu'une fraction notable des répliques d'un séisme, notamment celles naissant loin de l'épicentre, sont déclenchées non par la perturbation résiduelle des contraintes, mais par les contraintes transitoires liées au passage des ondes sismiques de la rupture principale. Pour ces raisons, les sismologues continuent d'envisager d'autres voies pour la prévision des séismes, en particulier une : l'analyse des secousses annonciatrices des grands séismes. Cette approche n'est pas nouvelle : depuis longtemps, notamment au Japon, en Grèce et en Californie, on a remarqué que plus du tiers des grands séismes est précédé de quelques semaines par des séismes de faible magnitude. Où en sont nos connaissances sur ces séismes précurseurs ?

Diverses expériences suggèrent que dans l'intervalle de temps séparant deux ruptures sismiques, les failles ne cessent jamais de glisser, mais coulissent très lentement, de quelques micromètres par mois, voire par an. Lors de ce glissement, les grains de roches de part et d'autre de la faille se décrochent, ce qui diminue pour la plupart des roches situées entre 3 et 15 kilomètres de profondeur la résistance de la faille. Lorsque ce glissement dépasse une valeur critique, la résistance par frottement chute significativement et la faille peut se déstabiliser. Dans le cas d'une petite faille, ce glissement relâche une part importante des contraintes élastiques présentes dans les roches aux alentours, ce qui compense la diminution de la résistance : cette faille glisse de façon stable. Quand la faille est grande, le même glissement relâche moins de contraintes élastiques. Comme la force de cisaillement varie peu et que la résistance décroit notablement, le glissement s'accélère, ce qui a pour conséquence une nouvelle réduction du frottement et le système s'emballe. Le glissement atteint ainsi des vitesses proches de un mètre par seconde : c'est un séisme.

Les failles ont une taille critique au-delà de laquelle elles se déstabilisent et sont le théâtre d'un séisme, mais la valeur de cette taille critique est controversée ; c'est pourtant l'une des clés de la prévisibilité des séismes. La mécanique impose que la taille d'une faille qui se déstabilise soit environ 10 000 à 100 000 fois supérieure à la longueur de glissement critique, pour lequel le frottement diminue notablement. On déduit des expériences de laboratoire que les glissements critiques sont généralement inférieurs au millimètre, ce qui suggère des dimensions critiques de faille au plus d'une dizaine de mètres. Pour ces failles, durant la phase d'accélération précédant le séisme, les déplacements de la roche seraient à une centaine de mètres de la faille, de l'ordre d'un centième de millimètre. En surface, la déformation des roches décroissant avec le cube de la distance, le déplacement serait indétectable : cette phase de nucléation passerait inaperçue, n'émettant pas de signes précurseurs.

Cependant, en pratique, les chiffres diffèrent. Les études des lois de frottement des grandes failles déduites de séismes, ainsi que les expériences de laboratoire menées sur des failles constituées de roches broyées ou fragmentées, suggèrent que le glissement critique de telles failles matures peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. Par conséquent (en tenant compte du facteur 10 000 à 100 000), ce sont des failles kilométriques qui se déstabiliseraient ; avant de produire un séisme, elles créeraient par leur glissement, à plusieurs kilomètres, des déplacements importants, de l'ordre du millimètre, détectables en surface. Ces déformations de surface seraient les causes des phénomènes précurseurs rapportés depuis des décennies : déformations des roches, variation de niveau ou de la géochimie des eaux, perturbations des courants électriques et magnétiques...

Signes de rupture

On n'en serait pas pour autant capable de faire des prévisions à court terme, car tout glissement lent sur une faille ne conduit pas nécessairement à un séisme : le glissement peut ralentir et s'arrêter au bout de quelques minutes ou de quelques jours. Des observations récentes du mouvement des roches (positionnement par satellite et grâce à des détecteurs de mouvement enfouis profondément) ont mis en évidence ces épisodes transitoires qui s'éteignent sans sursaut sismique. Interprétés comme des signaux précurseurs, ils conduiraient à de fausses alertes. Quelle serait la proportion de ces dernières pour l'ensemble des prédictions ? Nous l'ignorons aujourd'hui.

à venir ? Il y a six ans, je me suis associé au géophysicien James Dieterich, de l'Observatoire géologique des États-Unis, et au géologue Aykut Barka, de l'Université technique d'Istanbul, pour étudier la faille turque du Nord de l'Anatolie, l'une des régions à risque les plus peuplées du monde. Après avoir identifié les zones où les contraintes de Coulomb avaient le plus augmenté à la suite des tremblements de terre passés, nous avons estimé à 12 pour cent la probabilité qu'un séisme de magnitude supérieure à sept survienne, entre 1997 et 2027, sur le segment de faille proche de la ville d'Izmit. Une telle probabilité peut sembler assez faible, mais sur les autres segments (sauf un) de cette faille longue de 1 000 kilomètres la probabilité ne dépassait jamais un à deux pour cent.

Nous n'avons pas eu à attendre longtemps pour obtenir confirmation de nos prévisions. En août 1999, un tremblement de terre de magnitude 7,3 dévasta Izmit, tuant 25 000 personnes et faisant plus de 6,5 milliards d'euros de dégâts. Ce tremblement de terre n'était en fait que le plus récent d'une série de 12 séismes importants survenus sur la faille Nord-anatolienne depuis 1939, dans une succession ressemblant à l'effondrement d'un jeu de dominos. Au terme de quatre séismes consécutifs ayant eu lieu en cinq ans, 700 kilomètres de faille avaient glissé. Nous avons postulé que les contraintes agissant sur chaque segment de faille avaient été transférées après chaque séisme vers un segment voisin le long de la faille, et y avaient déclenché le séisme suivant, notamment à Izmit.

En novembre 1999, le treizième domino tomba : un séisme de magnitude 7,1 frappa en un point de la faille situé à 100 kilomètres plus à l'Est, près de la ville de Düzce. A. Barka avait calculé l'augmentation des contraintes consécutives au séisme d'Izmit, et avait publié ses résultats dans la revue *Science* deux mois plus tôt. Les prévisions de A. Barka avaient encouragé les ingénieurs à faire fermer les bâtiments scolaires de Düzce qui avaient déjà été endommagés par la

© POUR LA SCIENCE - N° 306 AVRIL 2003

AFB Corbis

Des bâtiments se sont effondrés à Düzce, en Turquie, lors de la terrible secousse qui a ravagé la ville en novembre 1999.

Certains chercheurs ont imaginé que les essaims de petits séismes, fréquents dans les régions à forte sismicité, pourraient être considérés non pas comme une « conversation » entre ruptures, mais comme la conséquence de ces lents mouvements épisodiques : ils seraient des répliques bruyantes de séismes profonds et silencieux... Si cela était avéré, au moins pour certains d'entre eux, l'étude fine de la localisation et des mécanismes de ces « répliques » permettrait de mieux cerner la géométrie et le glissement de ces failles invisibles, et ainsi d'améliorer notre connaissance des lois de frottement. On pourra alors, mais alors seulement, progresser sur la question des précurseurs à court terme, pour repérer, au cours d'une instabilité lente, les signes d'une accélération vers la rupture, et déterminer la dimension de la zone en phase de nucléation. Il s'agira alors de préciser à quelle échéance l'instabilité naîtra : dans une heure, un jour, une semaine ? Il restera une autre difficulté de taille à surmonter, pour parachever la prédiction : sur quelle distance totale, la rupture se propagera-t-elle : sur cinq kilomètres ? Sur 50 kilomètres ? Cela reviendrait à prévoir une magnitude cinq dans le premier cas et une magnitude sept pour le second... les conséquences seraient bien différentes.

Pascal BERNARD
Laboratoire de sismologie,
Institut de physique du Globe de Paris.

première secousse, au grand dam des responsables de l'éducation qui ne savaient plus où accueillir les élèves. Certains de ces bâtiments s'écroulèrent lors de la secousse de novembre.

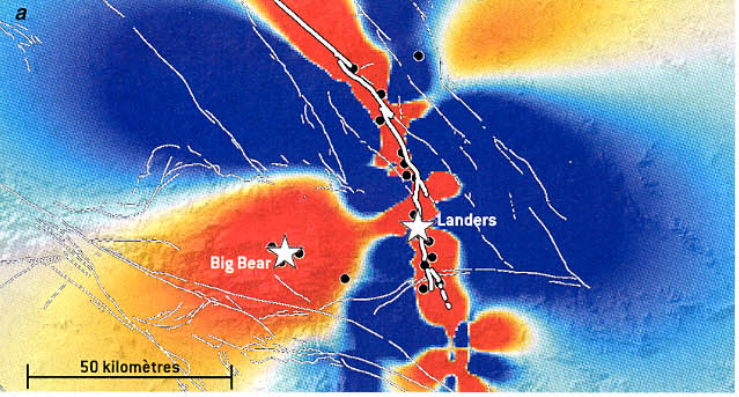
D'après les calculs que nous avons effectués après l'événement avec Tom Parsons, de l'Observatoire géologique des États-Unis, Shinji Toda, du Centre de recherches sur les failles actives du Japon, A. Barka et J. Dieterich, il faut s'attendre encore à d'autres répercussions du séisme d'Izmit. Les contraintes transférées pendant cette secousse ont fait passer de 1,9 à 4,2 pour cent la probabilité d'un séisme important en 2003 dans la capitale voisine, Istanbul. Pour les 30 prochaines années, le risque est de 62 pour cent ; dans l'hypothèse où les séismes se déclencheraient de façon aléatoire, le risque serait seulement de 20 pour cent.

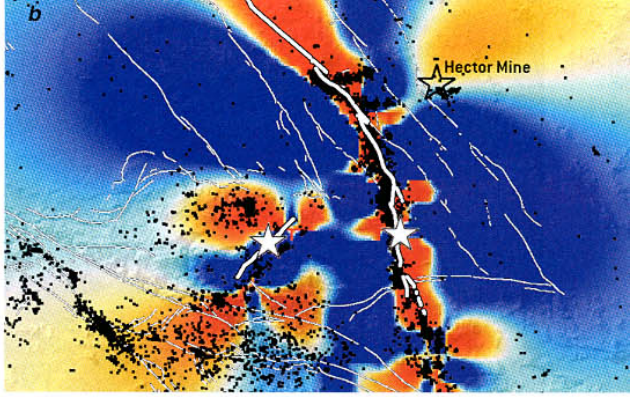
L'hypothèse de déclenchement par les contraintes désigne certaines régions comme des zones à risques sismiques élevés, mais en élimine d'autres, où le danger faiblit. En Turquie, les régions où les risques ont été revus à la baisse sont relativement peu peuplées par rapport à Istanbul. Nous avons aussi montré qu'une zone à risques, la région de San Francisco, est relativement à l'abri des séismes de magnitude élevée. Depuis le séisme de magnitude 7,9 qui a dévasté la région en 1906, cinq millions de personnes s'y sont concentrées. Nous avons montré que le séisme a délesté de leurs contraintes plusieurs lignes parallèles à la faille de San Andreas, tandis que les contraintes se sont accumulées dans des zones de la faille situées plus au Nord ou plus au Sud. C'est peut-être pourquoi le nombre de secousses dévastatrices a été divisé par dix depuis 1906, par rapport aux années 1830-1906. Toutefois, les calculs montrent que les contraintes recommencent à s'accumuler dans cette région, le long des failles ; l'effondrement d'autoroutes et les dégâts provoqués par la secousse de Loma Prieta en 1989 sont peut-être le signe avant-coureur du réveil de la sismicité dans cette zone.

La prévision du lieu et de la date

Ainsi l'étude des séismes en Turquie et en Californie du Sud confortait notre hypothèse selon laquelle même de minuscules modifications des contraintes ont des effets notables, tant catastrophiques que bénéfiques. Cependant, malgré le nombre croissant d'exemples en faveur de cette hypothèse, nous ne comprenions pas pourquoi le foyer d'environ un quart des séismes que nous avions étudiés se trouvait dans des zones où les contraintes avaient diminué. Nos collègues les plus sceptiques nous ont fait remarquer que, selon notre théorie, aucun séisme n'aurait dû s'y produire. Nous savons aujourd'hui que la sismicité ne disparaît pas totalement des zones où les contraintes sont minimales, et qu'elle ne survient pas nécessairement dans les zones où les contraintes sont maximales. C'est plutôt le nombre de séismes par unité de temps qui diminue dans les zones d'ombre et qui augmente dans les zones de contraintes par rapport aux taux enregistrés avant le séisme.

Nous sommes parvenus à cette conclusion grâce à une théorie proposée par J. Dieterich en 1994. Elle rejette l'idée classique selon laquelle les frottements entre deux pans de roche ne varieraient qu'entre deux valeurs : une valeur élevée quand la roche est immobile, et une valeur faible quand la roche glisse. En fait, la rugosité de la roche dépend de la vitesse de glissement et de l'histoire des mouvements de la roche. Ces résultats sont le fruit d'expériences de laboratoire où l'équipe de J. Dieterich a scié une faille





Erkan Bozkurt usgs, Keith Richards-Dinger u.s. Navy et Shin Ji Toda

2. À la suite du séisme de magnitude 7,3, survenu en 1992 à Landers, dans le Sud de la Californie, les contraintes dans le sol ont augmenté *(en rouge)* le long de la faille passant par Landers et dans une région située à l'Ouest de la ville *(a)*. Ailleurs, les contraintes ont diminué *(en bleu)*. Les secousses qui ont suivi le séisme *(les points noirs)* ont frappé dans les zones où les contraintes avaient augmenté, en particulier dans la ville de Big Bear, touchée par un séisme de magnitude 6,5 trois heures après le séisme de Landers. Cette coïncidence s'est confirmée durant les sept années suivantes : sur la carte de variation des contraintes consécutives aux séismes de

miniature dans une dalle de granit de la taille d'une voiture avant d'y déclencher de minuscules tremblements de terre.

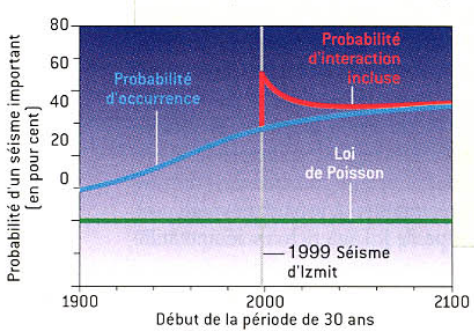
Quand on calcule le comportement d'un séisme en considérant que les frottements évoluent, on constate que la loi d'Omori – qui exprime le nombre de répliques en fonction du temps – devient une propriété fondamentale non seulement des répliques, mais de tous les séismes. Selon la loi d'Omori, le nombre de secousses commence par augmenter avant de diminuer progressivement, ce qui explique pourquoi le nombre de séismes résultant d'une augmentation des contraintes varie au cours du temps. De surcroît, la théorie de J. Dieterich révèle une caractéristique de la sismicité après un tremblement de terre important que la loi d'Omori masque complètement : dans les zones où un séisme important libère les contraintes, le nombre de répliques diminue immédiatement, mais retrouve progressivement ses valeurs antérieures selon une loi prévisible. Ces considérations nous ont permis, pour la première fois, de prévoir comment le nombre de répliques varie en fonction du temps après une chute ou après une brusque augmentation des contraintes. Quand nous nous contentions de calculer les contraintes de Coulomb, nous étions capables de définir la localisation générale des tremblements de terre à venir, mais pas le moment de leur survenue.

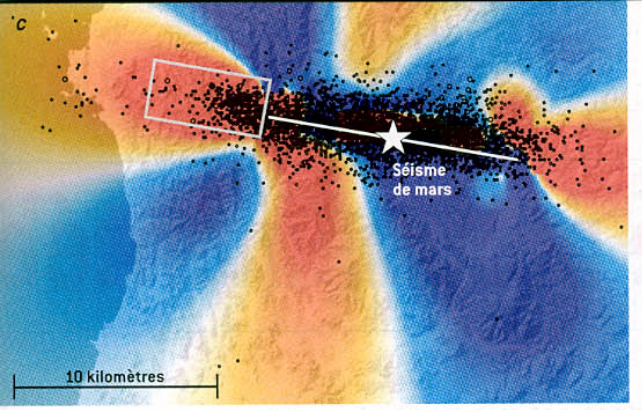
Notre nouvelle théorie fut confirmée par une étude globale menée au début de l'année 2001. T. Parsons a étudié la centaine de tremblements de terre de magnitude supérieure à sept qui a eu lieu dans le monde durant les 25 dernières années, et a examiné toutes les répliques de magnitude supérieure à cinq ayant eu lieu à moins de 250 kilomètres de chaque séisme primaire. Parmi ces répliques (plus de 2 000), 61 pour cent ont eu lieu là où un séisme antérieur avait augmenté les contraintes. La majeure partie de ces chocs étaient si éloignés du séisme principal qu'on ne les aurait pas considérés auparavant comme des répliques. Dans tous les cas, le nombre de ces répliques variait comme le prédisent les lois de Dieterich et d'Omori.

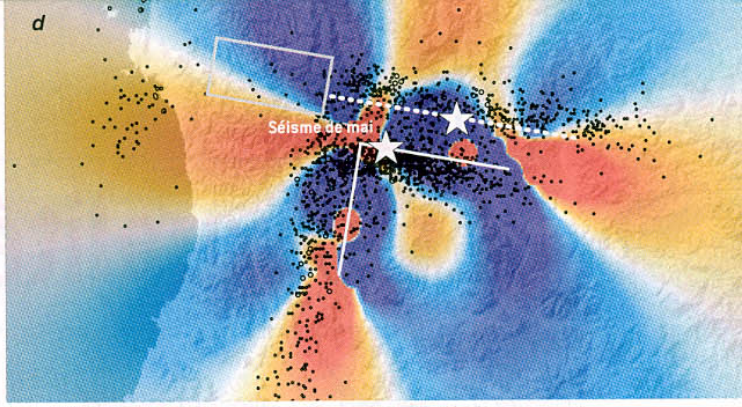
Maintenant que nous utilisons régulièrement la loi de Dieterich dans nos analyses de sismicité, nous voyons apparaître des interactions plus complexes que celles mises au jour par les seules contraintes de Coulomb. Jusqu'à présent, nous n'avions expliqué que des situations relativement simples, telles celles de la Turquie ou de la Californie, où un tremblement de terre notable stimule la sismicité dans certaines régions et la ralentit dans d'autres. Nous savions que pour valider notre hypothèse du déclenchement par les contraintes, il nous faudrait trouver un exemple où des chocs successifs d'intensités comparables augmenteraient ou diminueraient la fréquence des répliques dans une même région, comme un variateur augmente ou réduit la luminosité d'un lampadaire.

Un prochain séisme près d'Istanbul

La probabilité qu'un séisme majeur frappe à moins de 50 kilomètres d'Istanbul diffère selon la méthode de calcul. Cette probabilité reste constante au cours du temps dans les modèles où les séismes sont des événements purement aléatoires *(en vert)*. Dans un type de prévisions plus fines, nommé probabilité de récurrence, on prédit qu'après un séisme la probabilité d'une deuxième secousse dévastatrice augmente avec le temps écoulé *(en bleu)*. Cette augmentation du risque est fondée sur l'hypothèse selon laquelle les contraintes le long d'une faille s'accumulent progressivement à la suite d'une secousse importante. Quand on intègre dans ce modèle les transferts de contraintes qui ont eu lieu lors du séisme de 1999 à Izmit *(en rouge)*, la probabilité qu'un séisme important survienne d'ici 30 ans à Istanbul augmente de près de 25 pour cent. La raison de cette augmentation est qu'une partie des contraintes relâchées près d'Izmit en 1999 s'est déplacée vers l'Ouest, le long de la faille, et s'est concentrée près de la ville. Cette probabilité dite d'interaction va décroître continûment dans le temps à mesure que la probabilité de récurrence augmentera. Les deux prévisions convergent aux alentours de 54 pour cent en 2060, si toutefois le prochain grand tremblement de terre n'a pas lieu d'ici là.







Big Bear et de Landers *(b)*, on constate que les séisme survenus pendant cette période se sont déclenchés dans les zones de contraintes maximales, culminant avec le séisme de Hector Mine, en 1999. Ainsi, les séismes se déclenchent dans les zones de contraintes, mais très rarement dans les zones où les contraintes sont minimes. Les séismes bouleversent les contraintes dans une même région. Ainsi, en mars 1997, une secousse de magnitude 6,5 *(c, l'étoile)* a augmenté les contraintes à l'Ouest de la faille de Kagoshima, au Japon. Un nouveau séisme, de magnitude 6,3, est survenu 48 jours après, trois kilomètres au Sud. La répartition des contraintes *(d)* s'en est trouvée modifiée.

Avec S. Toda, nous avons découvert un exemple spectaculaire de ce phénomène, que nous avons nommé sismicité à bascule. Au début de l'année 2001, nous avons commencé à analyser une paire inhabituelle de séismes de magnitude 6,5 qui avaient frappé en 1997 la ville de Kagoshima, au Japon. Immédiatement après le premier tremblement de terre – au mois de mars –, un brusque sursaut d'activité sismique s'était produit sur une région de 25 kilomètres carrés située juste au-delà du segment de la faille qui avait glissé. Nous avons calculé l'endroit où s'étaient accumulées les contraintes transférées après le séisme initial, et avons découvert qu'il était précisément localisé dans la zone de forte sismicité. Le nombre de séismes dans cette région avait commencé à décroître immédiatement après le séisme, exactement comme le prédisait la loi de Dieterich. Toutefois, quand le second choc s'est produit, trois kilomètres au Sud du premier et sept semaines plus tard, les sismologues ont enregistré une baisse de la sismicité de plus de 85 pour cent. Le calcul a confirmé que l'ancienne zone d'activité sismique était tombée dans la zone d'ombre du second séisme. En d'autres termes, le premier séisme avait fait augmenter la sismicité, et le second l'avait réduite.

À l'écoute des dialogues sismiques

En épiant les conversations entre tremblements de terre, nous avons montré que la sismicité résulte de nombreuses interactions. Bien que des phénomènes différents du transfert de contraintes influent aussi sur ces interactions, nous pensons qu'il existe suffisamment de preuves pour reconsidérer les prévisions sismiques classiques. En précisant les calculs de probabilité des secousses dangereuses par la prise en compte des petites variations de contraintes, les sismologues aideront les gouvernements, les assurances et le public en général à mieux évaluer les risques encourus. Nos analyses prenant en compte le déclenchement par les contraintes ne donnent pas le même classement des zones sensibles que les prévisions classiques. Inversement, des failles considérées comme dangereuses dans l'approche classique semblent présenter, d'après notre analyse, moins de risques que prévu.

Quel que soit le type de prévision sismique considéré, il est très difficile de démontrer sa validité, et pratiquement impossible de le mettre en défaut. Le hasard joue un rôle important, et il est tout aussi difficile de prévoir le lieu et la date d'un séisme majeur, que de prévoir les conditions météorologiques qui donneront un déluge local. Pourtant les météorologues ont un avantage notable par rapport aux sismologues : ils ont accumulé des millions de fois plus de données, ce qui leur a permis d'améliorer leurs prévisions. De surcroît, les données météorologiques sont beaucoup plus faciles à mesurer que les tensions dans les entrailles de la Terre, et les tremblements de terre sont heureusement beaucoup plus rares que les tempêtes.

Progressivement, les modèles vont être améliorés. Nous avons commencé à recenser les zones à risques près des villes sensibles d'Istanbul, Landers, San Francisco et Kobe. Nous nous préparons également à étudier Los Angeles et Tokyo, où un tremblement de terre important aurait des conséquences désastreuses. Deux séismes ont eu lieu le long de la faille Denali, en Alaska, le 23 octobre 2002 (de magnitude 6,7) et le 3 novembre 2002 (de magnitude 7,9) et nous avons établi qu'il s'agissait à nouveau d'une séquence liée à la libération de contraintes. D'après nos estimations, le premier séisme a augmenté la probabilité de survenue du second dans les dix jours d'un facteur 100. Nous continuons à tester notre théorie sur des séismes de faible magnitude ne présentant pas de danger, beaucoup plus nombreux et, par conséquent, plus faciles à prévoir.

Malgré le caractère incertain des prévisions probabilistes, les sismologues se doivent de poursuivre leur rêve de prévoir les séismes, afin de mieux protéger les millions de personnes qui vivent le long des zones de faille les plus actives du globe. Avec des enjeux aussi considérables, on se doit d'étudier tous les facteurs qui participent au déclenchement des tremblements de terre, notamment le rôle des contraintes.

Ross Stein est géophysicien à l'Observatoire américain d'étude des risques sismiques, à Menlo Park, en Californie.

Auteur & Bibliographie

Tom Parsons, Shinji Toda, Ross Stein, Aykut Barka et James Dieterich, *Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul : An Interaction-Based Probability Calculation*, in *Science*, vol. 288, pp. 661-665, avril 2000.

Robert Geller, David Jackson, Yan Kagan et Francesco Mulargia, *Earthquakes Cannot Be Predicted*, in *Science*, vol. 275, p. 1616, mars 1997.

http://scec.ess.ucla.edu/ffykagan/perspective. html.

Animations de séismes : http://quake.wr.usgs.gov/~ross