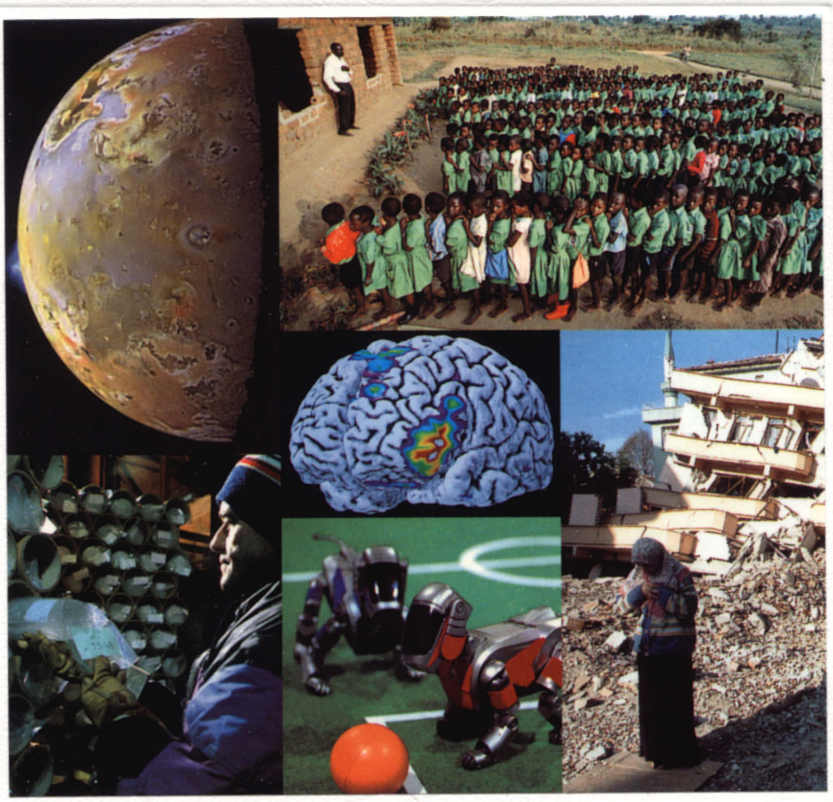
LA SCIENCE au présent

2001



Une année d'actualité scientifique et technique

Sismologie

LA FAILLE NORD-ANATOLIENNE

➔ *La faille nord-anatolienne (F.N.A.) traverse la Turquie sur plus de 1 000 kilomètres de longueur. Il s'agit de l'un des décrochements les plus sismiques au monde, comparable à la célèbre faille de San Andreas en Californie. L'origine de cette grande cassure est liée aux processus de collision et d'extrusion continentales. Collision entre l'Arabie et l'Eurasie au niveau des régions montagneuses de l'Anatolie orientale et du Caucase ; extrusion d'un bloc qui s'échappe vers l'ouest, comprenant presque toute l'Asie Mineure, l'Égée et une partie de la Grèce. L'extrusion continentale se réalise par coulissement latéral le long de failles de dimension lithosphérique, qui se révèlent donc similaires aux frontières des plaques reconnues plus classiquement. Au cours du XX^e siècle, la F.N.A. a eu un comportement sismique singulier qui révèle un couplage élastique significatif entre les différents segments qui composent cette faille. Six très grands séismes se sont déclenchés successivement entre 1939 et 1967, rompant d'est en ouest des segments contigus de la faille nord-anatolienne sur plusieurs centaines de kilomètres. Les tremblements de terre destructeurs du 17 août et du 12 novembre 1999 ont prolongé inexorablement cette suite de ruptures jusqu'aux abords de la mégalopole d'Istanbul...*

Rolando Armijo
directeur du laboratoire de tectonique, I.P.G.P.

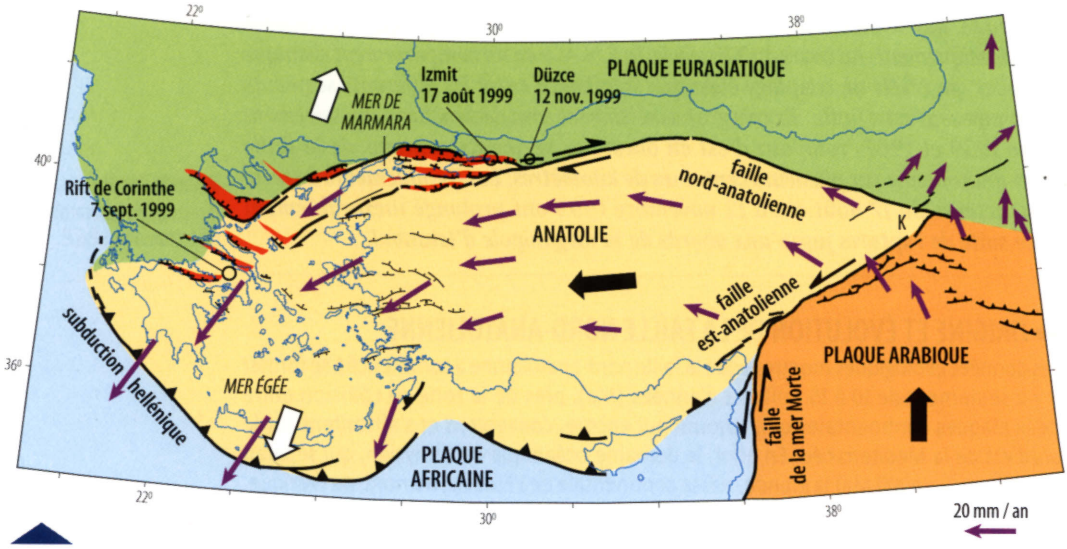
➔ ORIGINE ET ÉVOLUTION DE LA FAILLE NORD-ANATOLIENNE

Les données géologiques montrent que la faille nord-anatolienne a commencé à se former il y a seulement de 10 à 15 millions d'années (Ma), près de la zone de collision entre deux plaques continentales qui, aujourd'hui encore, convergent et s'affrontent sur le bord est de la Méditerranée. En effet, le domaine océanique dit téthysien, qui séparait au Crétacé (il y a 100 Ma) la grande masse continentale de l'Eurasie, au nord, de l'Afrique, de l'Arabie et de l'Inde, au sud, n'a pas cessé de se réduire. Une convergence de direction nord-sud entre les plaques a conduit à la fermeture progressive des mers et à une situation de collision continentale en plusieurs points. Actuellement, la Méditerranée reste le plus important vestige du domaine océanique initial. Les régions de collision sont marquées sur le bord de l'Eurasie par de grandes chaînes de montagnes et des plateaux, comme l'Himalaya et le Tibet, au contact de l'Inde, ou les montagnes du Zagros, le plateau est-anatolien et le Caucase, au contact de l'Arabie.

On sait maintenant que la F.N.A. a pris naissance dans cette dernière zone de collision (Arabie-Eurasie). Dans cette zone, la croûte a été comprimée, raccourcie, épaissie. La topographie s'y est élevée et l'énergie potentielle a donc été augmentée. C'est de cette région montagneuse qu'émanent les failles nord-anatolienne et est-anatolienne, grands décrochements respectivement de sens dextre et sénestre qui séparent le bloc anatolien de l'Eurasie et de l'Arabie, rendant possible son mouvement vers l'ouest. Comme une noix qui s'échappe d'un étau qui se resserre, le bloc anatolien se déplace vers une région moins confinée, dépourvue de croûte continentale et possédant beaucoup moins d'énergie potentielle : c'est le fond de la Méditerranée, au contact de la zone de subduction hellénique (fig. 1).

De quelle façon et en combien de temps la F.N.A. s'est-elle développée, rendant ainsi possible le processus d'extrusion continentale ? Des éléments de réponse se

trouvent au milieu de son parcours, en mer de Marmara, et à son extrémité apparente, le golfe de Corinthe, en Grèce. Dans la mer de Marmara, il est possible d'estimer un déplacement total de 85 kilomètres vers l'ouest du bloc anatolien par rapport à l'Europe. Il y a 5 Ma, la F.N.A. aurait cassé le verrou constitué par les Dardanelles, avant de se propager au travers des fonds de la mer Égée et de s'avancer vers la Grèce. Les grabens de Grèce centrale et, plus particulièrement, le golfe de Corinthe ont bien enregistré l'arrivée de la F.N.A. En effet, le golfe – ou rift – de Corinthe s'est ouvert violemment entre la Grèce continentale et le Péloponnèse, telle une grande fissure, depuis environ 1 Ma. Les traces de cette séparation sont visibles sur la côte sud du golfe, où une série spectaculaire de terrasses marines soulevées, en marches d'escalier, témoigne d'une très forte vitesse de déformation. Le rift de Corinthe peut donc être vu comme une entaille ouverte à l'extrémité occidentale de la F.N.A., presque au contact avec la zone de subduction hellénique. Grâce aux techniques modernes de la géodésie spatiale, particulièrement au G.P.S. (Global Positioning System), il est maintenant possible d'avoir une image instantanée du mouvement d'extrusion de l'Anatolie et une estimation de la vitesse de déplacement latéral sur la F.N.A. : environ 2 cm/an. La mise en charge



1. Extrusion du bloc anatolien, qui s'échappe de la zone de collision entre l'Arabie et l'Europe, vers la zone de subduction hellénique. Les flèches indiquent la vitesse du mouvement, mesurée avec la technique G.P.S., de certains points par rapport à l'Europe. La moitié orientale de la F.N.A. est linéaire et simple, la moitié occidentale sinueuse et compliquée, avec des failles normales et des fossés d'effondrement (en rouge).

de la F.N.A. se fait donc à ce taux, et l'extrusion continentale en est le moteur. Si tout le déplacement se réalisait à terme sous forme de glissement sismique sur la faille, la déformation élastique accumulée sur 250 ans devrait engendrer en tout point de la faille un déplacement latéral dextre soudain de 5 mètres, associé à un gros tremblement de terre. Ces valeurs correspondent à peu près à la période de récurrence moyenne et au déplacement unitaire typiques des grands tremblements de terre engendrés par la F.N.A.

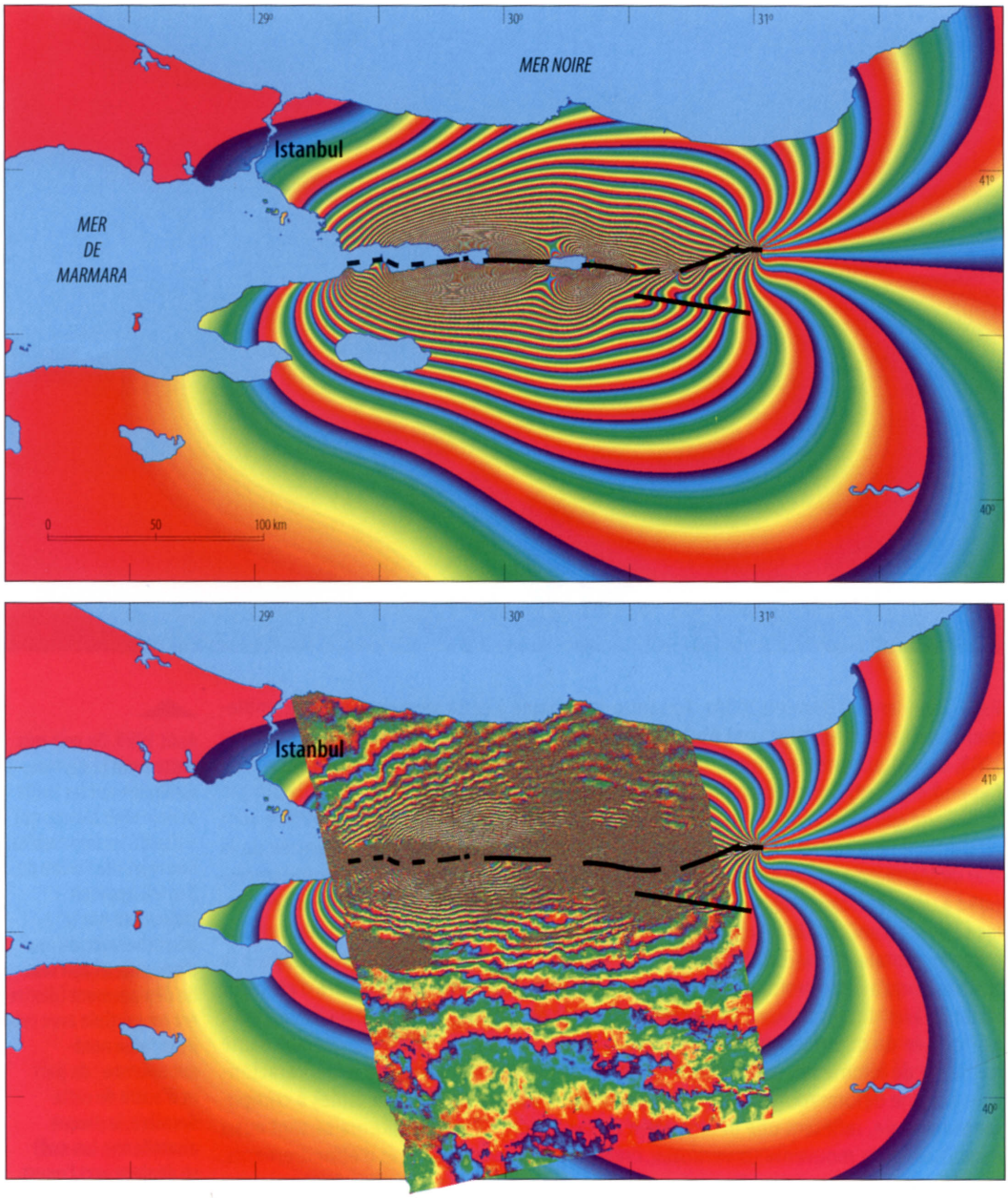
➡ LES SÉISMES DE 1999

L'étonnante séquence de grands séismes du XXe siècle s'est enchaînée entre 1939 et 1967 d'est en ouest, de façon analogue à celle de la naissance et de la propagation de la

Août 1999. On voit très nettement la rupture, soulignée par les traits et pointillés blancs, qui a cisaillé les immeubles. Son rejet (de l'ordre de 3 m ici) apparaît clairement par le décrochement du mur d'enceinte et son sens de déplacement (dextre) est compatible avec celui de la faille nord-anatolienne : de part et d'autre de cette dernière, la plaque anatolienne (au sud) se déplace vers l'ouest par rapport à la plaque eurasienne (au nord).

F.N.A. pendant les derniers 10 Ma. Faisant suite logique à cette séquence, deux tremblements de terre meurtriers ont ébranlé la région immédiatement à l'est d'Istanbul en 1999, avec épicentres à Izmit le 17 août ($M=7,4$) et à Düzce le 12 novembre ($M=7,2$). Cependant, contrairement aux séismes précédents, qui avaient rompu la partie simple et linéaire qui caractérise la moitié orientale de la F.N.A., les ruptures de 1999 se sont produites à l'endroit où la géométrie de la faille devient plus complexe, à l'entrée de la mer de Marmara. L'étude de ces ruptures révèle une segmentation compliquée, qui correspond à une hétérogénéité de déplacement significative. Considérés dans leur ensemble, les séismes d'août et de novembre 1999 ont rompu une faille presque verticale sur une longueur totale d'environ 180 kilomètres, d'une largeur de 15 kilomètres (depuis la surface jusqu'à cette profondeur), et provoqué un déplacement latéral dextre d'ampleur variable, avec des maximums de 5 mètres observés en surface. La rupture du mois d'août est formée de quatre segments principaux, en échelon, bien distincts, chacun d'une trentaine de kilomètres de longueur. Ils sont séparés par des zones de relais caractérisées par une déformation diffuse, où prédominent fissures obliques et failles à composante normale, reflétant une déformation en extension. Ces failles normales sont aussi responsables de mouvements verticaux, créateurs de soulèvements et d'effondrements. La ville de Gölçük, située sur l'une des zones de relais, a subi de tels effondrements vers la mer, aussi spectaculaires que dramatiques.

Cartographier précisément la rupture d'un tremblement de terre permet une bonne compréhension du phénomène tellurique et une meilleure appréciation de son rôle dans le cycle sismique d'une région. Une question importante concerne l'extension totale de la rupture et la distribution du déplacement qui s'est produit le long de celle-ci pendant le séisme de façon presque instantanée (en quelques dizaines de secondes). Des observations directes collectées sur le terrain, immédiatement après le séisme (routes, ouvrages décalés par la faille), sont cruciales. Pour le séisme d'août 1999, néanmoins, la rupture passe sous la mer à l'ouest de Gölçük et elle ne peut pas être observée directement. Aussi, afin



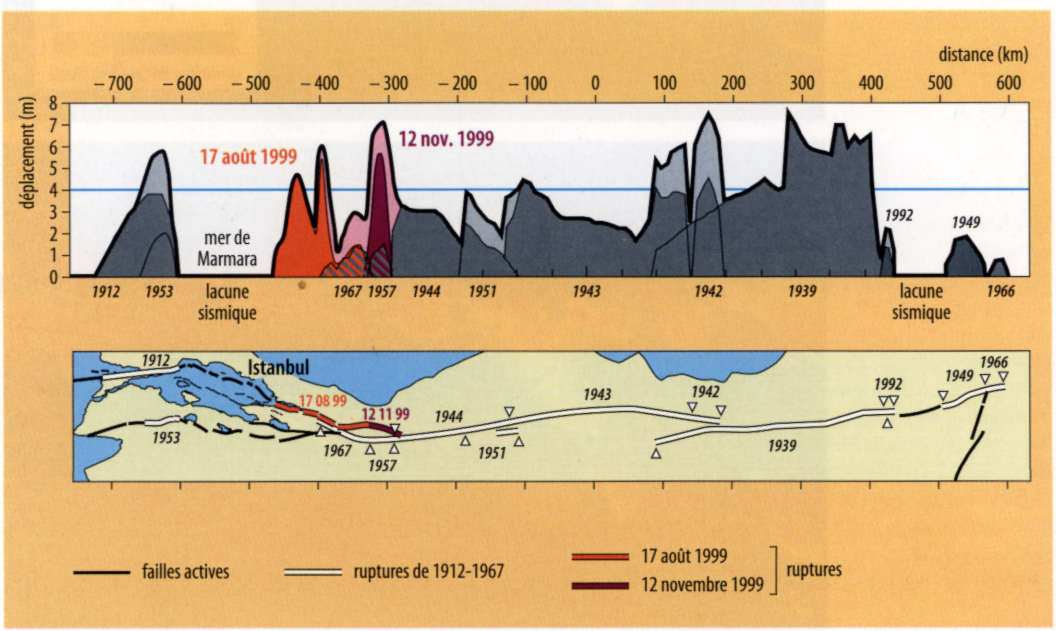
2. Imagerie radar (système S.A.R., des satellites européens E.R.S.) de la région d'Izmit. En haut, interférogramme synthétique. En bas, interférogramme observé. Les couleurs décrivent pour chaque point de la surface la variation de la distance Terre-satellite, avant et après le séisme d'août 1999. Chaque frange, ou cycle de couleur, représente une variation de 28 mm (une demi-longueur d'onde du radar). L'interférogramme synthétique est obtenu avec un modèle de dislocation dans un milieu élastique et les déplacements mesurés sur le terrain. L'interférogramme observé (plus bruité et couvrant une seule route de passage du satellite) est superposable, au premier ordre, avec le modèle synthétique direct.

de mieux connaître la complexité de la rupture, particulièrement en profondeur, il faut disposer d'enregistrements sismométriques sophistiqués en champ proche, qui sont rares, ou bien de données géodésiques de qualité. La technique d'interférométrie S.A.R. (Synthetic Aperture Radar), par exemple, permet d'avoir une image très précise du champ de déplacement grâce aux données acquises par les satellites européens E.R.S. (European Remote Sensing). L'interférogramme obtenu pour la région épicentrale du séisme d'août (fig. 2) révèle un fait important : la rupture s'est prolongée sous la mer, d'une trentaine de kilomètres, à l'ouest de Gölçük, vers Istanbul. Il montre aussi qu'un autre segment, situé à 10 kilomètres au sud de la rupture principale et ayant déjà rompu lors du tremblement de terre de 1967, a de nouveau glissé en 1999, de quelques dizaines de centimètres. Finalement, le séisme de novembre a prolongé la rupture d'août de 35 kilomètres à son extrémité orientale, tout en fermant une petite boucle cinématique nécessaire entre deux segments de la faille ayant déjà rompu auparavant. Désormais, le prochain segment qui devrait rompre, en toute logique, se trouve plutôt à l'ouest (cf. hors-texte p. 157).

➔ LE RISQUE SUR ISTANBUL

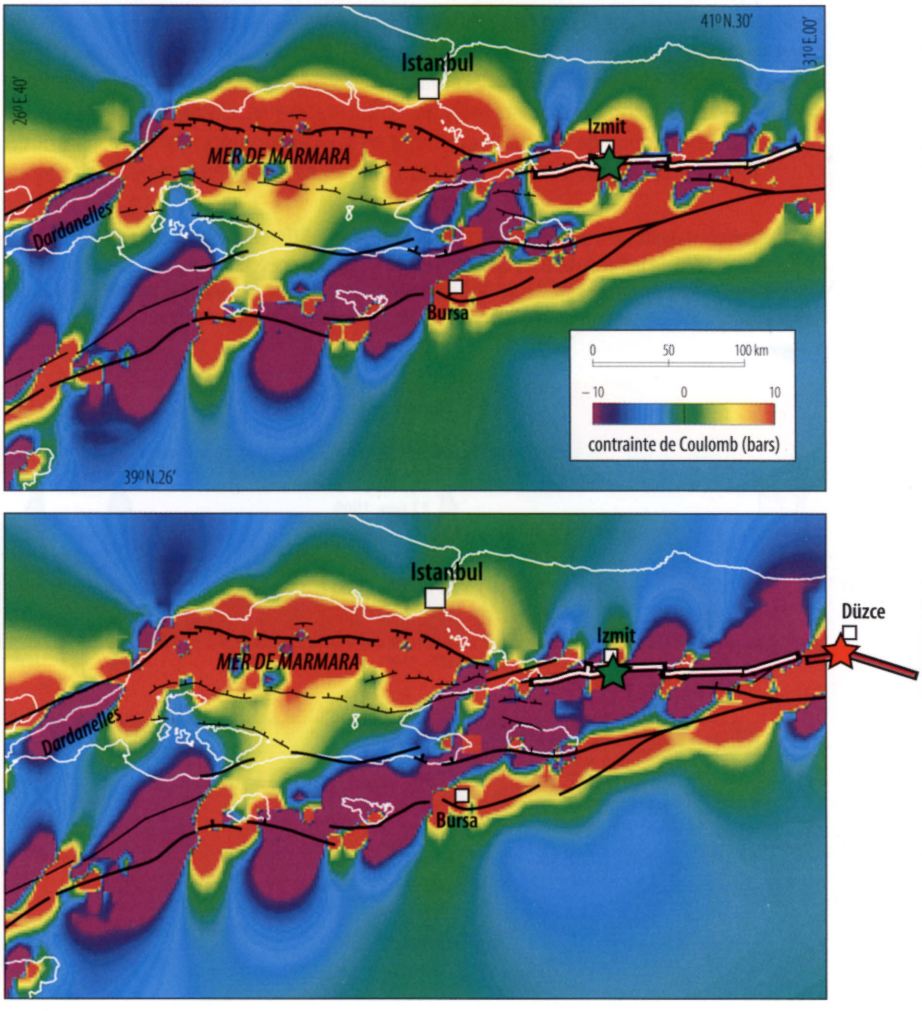
Quel risque sismique pèse désormais sur la ville d'Istanbul ? Il est certainement difficile à estimer, mais probablement très grand, si l'on considère la population importante de l'agglomération (plus de dix millions d'habitants) et son fort taux de croissance urbaine, peu contrôlée, pendant les dernières décennies. Une évaluation sérieuse du risque sismique dans cette région doit cependant intégrer l'information récemment acquise sur les failles, sur les vitesses de charge tectonique et sur les ruptures sismiques connues. D'une part, un catalogue historique assez complet est disponible pour les séismes

3. Déplacement dextre (en gris, mauve et rouge) associé aux différents grands séismes du XX^e siècle, représenté en fonction de la distance le long de la F.N.A. Le trait épais supérieur et les nuances claires représentent les valeurs cumulées. De 1939 à 1967, une séquence de ruptures progresse de 800 kilomètres vers l'ouest. Les séismes de 1999 prolongent cette série, sans pourtant remplir la zone de lacune sismique d'Istanbul (entre les ruptures de 1912 et d'août 1999).



importants des trois derniers siècles ; d'autre part, il est possible d'utiliser une démarche bien rodée, fondée sur l'utilisation d'un modèle mécanique simple. Il s'agit du calcul de la contrainte critique de Coulomb, un paramètre qui définit bien les variations spatiales de la contrainte dans un milieu élastique autour d'une dislocation. Lorsque l'on additionne les effets de la contrainte séculaire imposée par la charge tectonique (le mouvement entre l'Anatolie et l'Europe) et les effets des différents séismes, spécialement ceux de 1999, on obtient quelques éclairages intéressants. Premièrement, on confirme que les deux séismes de 1999 étaient, avec cette approche, « prévisibles ». Le danger sismique important dans la zone d'Izmit était ainsi spécifiquement évoqué dans au moins trois articles

4. Charge tectonique et contrainte de Coulomb dans la région de la mer de Marmara. La figure du haut représente la situation juste avant les séismes de 1999. La rupture d'Izmit (trait blanc ; étoile verte pour l'épicentre) se produit dans l'une des zones où la contrainte est élevée (en rouge). La figure du bas incorpore l'effet du séisme d'août. La contrainte diminue près de la rupture (en mauve), mais augmente aux extrémités. Celle qui est située à l'est a rompu le 12 novembre. La zone avec une charge importante au sud d'Istanbul est identifiée comme dangereuse.



scientifiques publiés avant les événements. Il faut noter, en revanche, que l'on ne disposait pas d'une évaluation quantitative en termes de probabilité, encore moins d'une prédiction temporelle précise. Un deuxième résultat important de cette analyse est que l'on peut identifier très clairement une zone particulièrement chargée, avec des contraintes élevées. Elle est située en mer de Marmara, à quelques dizaines de kilomètres au sud d'Istanbul (fig. 4). Cette zone dangereuse s'allonge sur 160 kilomètres et est superposable au système de fossés profonds et de grandes failles actives qui traversent d'est en ouest la mer de Marmara. La modélisation de la contrainte de Coulomb indique aussi que la surcharge imposée par les séismes de 1999 sur cette zone est relativement petite, de seulement 1 à 5 bars.

Finalement, il est instructif de considérer la précédente série de tremblements de terre destructeurs que connut la région, aux XVII^e^ et XVIII^e^ siècles. Au cours de cette séquence, l'enchaînement des ruptures associées aux différents séismes semble avoir entièrement traversé la mer de Marmara, d'est en ouest, au sud d'Istanbul. La ville en a gardé une mémoire amère. C'est en 1668 qu'un très grand tremblement de terre ouvre la séquence et, comme au XX^e^ siècle, cette première rupture a lieu à des centaines de kilomètres à l'est d'Istanbul, sur la partie plus linéaire de la F.N.A. La série tarde un peu à se poursuivre, mais en 1719 se produit un grand séisme dont l'aire de destructions est superposable à celle des deux événements de 1999. Plus tard, en 1754, un séisme fortement ressenti à Istanbul semble prolonger la rupture sous la partie orientale de la mer de Marmara. Puis, deux grands séismes s'enchaînent pendant une même année, le 22 mai et le 5 août 1766. Le premier a lieu sous la partie occidentale de la mer de Marmara et le second, qui ferme la série, se produit vers les Dardanelles. Que peut-on en conclure ? Il semble que, lorsque tout le système de failles est proche de la rupture, on arrive à un stade critique caractérisé par une susceptibilité extrême aux petites perturbations et à une forte corrélation entre parties distantes du système. De petits incréments

BIBLIOGRAPHIE

R. Armijo, B. Meyer, A. Hubert et A. Barka, « Westward propagation of the North Anatolian fault into the northern Aegean : Timing and Kinematics », in *Geology*, 27, pp. 267-270, 1999 / R.S. Stein, A. Barka et J.H. Dieterich, « Progressive Failure on the North Anatolian fault since 1939 by Earthquake Stress Triggering », in *Geophys. J. Int.*, 128, pp. 594-604, 1997 / A. Barka, « The 17 August 1999 Izmit Earthquake », in *Science*, 285, pp. 1858-1859, 1999 / A. Hubert-Ferrari et al., « Seismic hazard in the Marmara Sea following the 17 August 1999 Izmit earthquake », in *Nature*, 404, pp. 269-272, 2000 / S. McClusky et al., « Global Positioning System Constraints on the plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus », in *J. Geophys. Res.*, 105, pp. 5695-5719, 2000.

SITES INTERNET

http://www.ipgp.jussieu.fr/dept-sce/tecto/
http://quake.wr.usgs.gov/study/turkey/
http://kandilli.koc.net/earthquake.html

LOGIQUE D'UNE SÉQUENCE DE SÉISMES

Cas unique au monde, la série de ruptures du XX^e^ siècle sur la F.N.A. présente un sérieux défi aux sismologues, ingénieurs et politiques responsables de la gestion du risque sismique. Pour commencer, en cinq ans seulement, de 1939 à 1944, les 700 kilomètres de la partie la plus linéaire de la faille ont rompu, coup sur coup, produisant de grands tremblements de terre et des déplacements latéraux de 3 à 7 mètres (fig. 3). Cette progression rapide vers l'ouest s'est ensuite ralentie, tout en se continuant par des séismes un peu plus petits, en 1957 et 1967, dans la région où la trace de la faille devient plus complexe, à l'approche de la mer de Marmara. Cependant, en 1999, deux grands séismes meurtriers, avec des déplacements de plus de 4 mètres, reprennent la séquence inexorablement, rapprochant davantage les ruptures de la ville d'Istanbul. De mémoire d'homme, nul autre système de failles n'a montré un comportement aussi bien corrélé, dans l'espace et dans le temps. Ce comportement n'est pourtant pas si surprenant si l'on considère la régularité, à long terme, du mouvement entre les plaques, ou l'élasticité du milieu cortical, manifeste à l'occasion de chaque séisme. Aussi, des modèles mécaniques simples utilisant ces observations permettent de visualiser l'évolution de la déformation et des contraintes, sans toutefois expliquer les détails de l'enchaînement des séismes.

de la contrainte sont alors suffisants pour déclencher la rupture du système de failles sur une grande longueur, par une séquence d'événements en cascade. En l'état actuel des connaissances, force est de constater qu'une telle cascade d'événements a bel et bien commencé, et il n'est pas audacieux d'affirmer que la région en bordure de la mer de Marmara, au sud d'Istanbul, présente un très haut risque sismique ■

▶ *La Science au présent 1997* « La Prédiction des séismes », p. 163.
▶ *La Science au présent 2000* « Un violent séisme en Turquie », p. 83.

Techniques

LES PUCES À ADN ET LES LABORATOIRES SUR PUCE

Les progrès techniques, en particulier la miniaturisation, ont permis le développement d'appareillages d'analyse performants pour les biologistes. Après la puce à ADN (appelée ainsi par analogie avec les circuits intégrés), mise au point au début des années 1990 et permettant d'effectuer sur une surface de quelques millimètres carrés des milliers d'analyses biologiques, apparaît aujourd'hui le laboratoire sur puce visant à réaliser, à terme, les différentes étapes d'une analyse, depuis la préparation de l'échantillon jusqu'aux résultats, obtenus sous la forme d'un signal électronique. Ces microsystèmes ouvrent de nouvelles voies pour la recherche génétique, médicale et pharmaceutique, et offrent de nouvelles perspectives dans d'autres domaines tels que les contrôles sanitaires ou la protection de l'environnement.

Michel Bellis
Claude Vauchier

Michel Bellis
Centre de recherche de biochimie macromoléculaire, Montpellier

LES PUCES À ADN OU BIOPUCES

Depuis une vingtaine d'années, un des buts des biologistes est de connaître la séquence intégrale du génome de plusieurs espèces animales et végétales. Cette tâche nécessite la manipulation d'un nombre très important d'entités biologiques, entre autres des clones

LE TRANSCRIPTOME

L'ensemble des molécules d'ARN messager d'une cellule constitue le transcriptome. Les ARN messagers sont une réplique des gènes qui sont à l'état actif dans une cellule. Quelques-uns peuvent jouer un rôle structural ou catalytique, mais la plupart d'entre eux sont traduits en protéines et participent ainsi à toutes les fonctions de la cellule. Chez l'homme, on considère qu'il existe environ 50 000 gènes qui s'expriment de manière différentielle dans plus de 200 types cellulaires. Dans un type cellulaire particulier, par exemple les fibroplastes, on dénombre 300 000 copies d'ARN messager qui représentent le résultat de l'expression d'environ 10 000 à 20 000 gènes. La grande majorité de ces ARN messagers sont présents à moins de 15 copies par cellule. Certaines puces à ADN détectent la présence d'une copie d'ARN messager par cellule.