

Trente secondes avant **LE MÉGASÉISME**

Richard Allen

Pour se préparer au *Big One*, le mégaséisme qu'elle attend, la Californie développe *Shake Alert*, un système d'alerte rapide capable d'avertir plusieurs dizaines de secondes à plusieurs minutes à l'avance qu'une violente secousse va se produire.

L'ESSENTIEL

✓ Les réseaux d'alerte sismique rapide détectent les toutes premières ondes d'un tremblement de terre et donnent l'alerte plusieurs dizaines de secondes à l'avance, ce qui laisse le temps de se préparer au choc.

✓ Leur principe repose sur la détection des ondes de compression, qui arrivent toujours avant les ondes de cisaillement, les plus destructrices.

✓ Plus le réseau de sismomètres surveillant la zone sismique est étendu, plus le système d'alerte sismique rapide est fiable et ses prévisions en termes de magnitude précises.

✓ De par le monde, plusieurs réseaux d'alerte sismique rapide ont déjà fait leurs preuves. Un tel dispositif – le système pilote *Shake Alert* – est en cours de test en Californie.

Tom Whalen

Les tremblements de terre ne préviennent jamais. À cet égard, le séisme californien de Loma Prieta du 17 octobre 1989 est typique : peu après 17 heures, une rupture soudaine de la faille de San Andreas secoue assez fort la région de la baie de San Francisco pour abattre plus de deux kilomètres d'une autoroute à deux étages, détruire des parties du pont reliant San Francisco à Oakland, sa ville jumelle de l'autre côté de la baie, et tuer plus de 60 Californiens, pourtant bien préparés. Et cela recommencera. Mais quand ?

Une menace permanente est si inacceptable, que, depuis l'Antiquité, les hommes essaient de s'en prémunir. C'est pourquoi les sismologues ont toujours traqué le « signal précurseur » qui, même ténu, devrait permettre de déterminer où et quand tremblera la terre. Une traque qui n'a rien donné, à tel point que les chercheurs sont nombreux aujourd'hui à douter de l'existence même de ce signal...

Alerte en temps réel

Quoi qu'il en soit, tout espoir de protéger les populations n'est pas perdu. Dès les tout premiers mouvements du sol, les sismologues peuvent aujourd'hui prévoir en quelques secondes et avec assez de certitude l'intensité et la portée d'un tremblement de terre qui commence. En combinant cette sismologie en temps réel avec les performances des communications modernes, on peut imaginer mettre au point un système d'alerte sismique rapide. C'est ce que nous essayons de faire en Californie, où au sein de l'initiative CISN (pour *California Integrated Seismic Network*, réseau sismique intégré de Californie), plusieurs universités et agences gouvernementales se sont associées pour développer *Shake Alert* (littéralement « Alerte aux secousses »), le projet pilote du système californien d'alerte sismique rapide. Comme les systèmes déjà en place dans le monde, *Shake Alert* est conçu pour donner aux habitants quelques dizaines de secondes, voire une demi-minute d'avance. Certes, cela semble peu, mais c'est bien assez pour stopper les trains, arrêter les centrales nucléaires, ouvrir les portes d'ascenseurs, et prévenir pompiers et secouristes...

L'intérêt qu'à toute avance, même aussi courte, est évident dans le cas du séisme de Loma Prieta. Son épïcêtre se trouvait à quelque 100 kilomètres au Sud de San Francisco dans les montagnes de Santa

Cruz. Depuis le moment de la toute première secousse, les ondes sismiques les plus dévastatrices ont mis plus de 30 secondes pour atteindre San Francisco et Oakland, où sont mortes 80 pour cent des victimes. Si un système d'alerte rapide avait pu annoncer le séisme avec seulement 20 secondes d'avance, cela aurait suffi pour stopper les trains, maintenir les avions en vol, faire passer au rouge les feux à l'entrée des ponts, des tunnels et autres pièges de ce genre... En 20 secondes, les ouvriers travaillant dans les environnements à risque auraient eu le temps de fuir vers des zones sûres, les machines et les systèmes sensibles de se mettre en sécurité, les écoliers et les employés de plonger sous leurs bureaux, etc. Bref, toute une région aurait pu se préparer au choc !

Le genre de système d'alerte rapide qui aurait été nécessaire lors du séisme de Loma Prieta est déjà en place au Japon, au Mexique, à Taïwan, en Turquie, en Roumanie. Le dispositif japonais serait le plus perfectionné au monde. Ces réseaux ont pour fonction de diffuser à l'échelle nationale des alertes par le biais des radios, des chaînes de télévision, des réseaux de téléphonie mobile et des systèmes d'affichage situés par exemple dans les centres commerciaux et dans les espaces publics. Depuis la mise en place des premiers de ces systèmes, il y a trois ans et demi, plus d'une dizaine de tremblements de terre les ont déjà activés. Dans les usines, les écoles, les trains ou les automobiles, les gens ont bénéficié d'un temps limité, mais précieux, pour se préparer, et les alertes n'ont entraîné ni mouvement de panique ni accident routier.

Un système californien d'alerte rapide

Il est donc plus que temps d'avoir aussi un système d'alerte rapide en Californie. Le *Big One*, c'est-à-dire le mégaséisme attendu depuis longtemps, ne s'est pas encore produit sur la faille de San Andreas. S'il est construit à temps, le système d'alerte rapide californien sauvera des vies.

Les plaques tectoniques qui pavent notre planète dérivent, et les continents se heurtent. À leurs marges, des pans entiers de croûte terrestre s'affrontent et se déforment pour absorber les tensions. Or il y a des limites à l'élasticité de la croûte terrestre, ce qui explique que pour relâcher les tensions, elle se rompt par épisodes le long de nombreux plans que

LE FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME D'ALERTE RAPIDE SHAKE ALERT

Les systèmes d'alerte rapide sont conçus pour détecter les tout premiers frémissements de la terre juste avant un séisme important, de façon à donner l'alarme le plus tôt possible avant l'arrivée des secousses les plus intenses. Le projet de système californien *Shake Alert*, par exemple, est fondé sur un réseau de sismomètres numériques déployés dans l'ensemble de l'État (voir ci-contre). L'objectif est de parvenir à donner aux gens jusqu'à une minute pour anticiper le choc, ce qui dépend avant tout de l'endroit où se trouvera l'épicentre...

L'alerte rapide d'un point de vue scientifique

Les ondes P (ondes primaires) sont des ondes de compression.



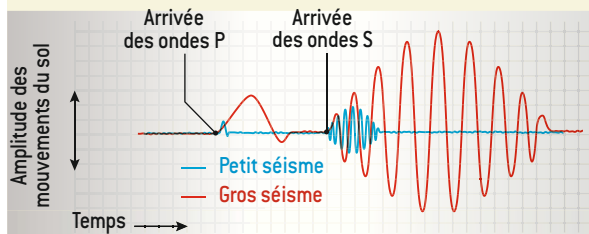
Sens de progression de l'onde

Les ondes S (ondes secondaires) sont des ondes de cisaillement.

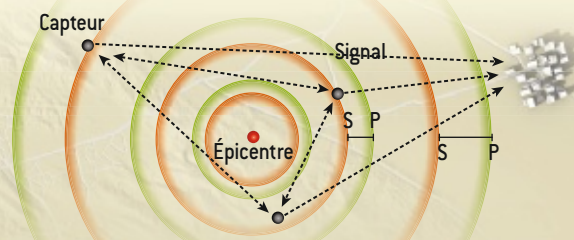


Sens de progression de l'onde

Les séismes sont à l'origine d'au moins deux types d'ondes sismiques : les ondes P, rapides mais peu destructrices, qui, tel le son dans l'air, se propagent en comprimant la roche de proche en proche ; les ondes S, moins rapides et très destructrices, qui, telles les vagues sur la mer, se propagent en déplaçant la roche de haut en bas.



Pour discriminer les macroséismes des centaines de microséismes se produisant chaque jour, les systèmes d'alerte rapide analysent la forme des ondes P. Les petits séismes émettent des ondes P brèves et de haute fréquence (flèche bleue ci-dessus), tandis que les séismes importants envoient une impulsion de grande amplitude et de basse fréquence (flèche rouge).



Un système d'alerte rapide combine les signaux de nombreuses stations sismologiques, pour corrélérer dans le temps les secousses notables dues aux ondes P et repérer l'épicentre par une méthode de triangulation. Dès qu'il a terminé, il envoie une alerte électronique, qui précèdera l'onde S de plusieurs dizaines de secondes. L'estimation de la magnitude et la localisation de l'épicentre sont d'autant plus précises que le nombre de stations sismologiques est important.

Aire ci-dessous

Les trains de banlieue freinent automatiquement, réduisant les risques de déraillement.

Les usines arrêtent de tourner et mettent les équipements en mode protection.

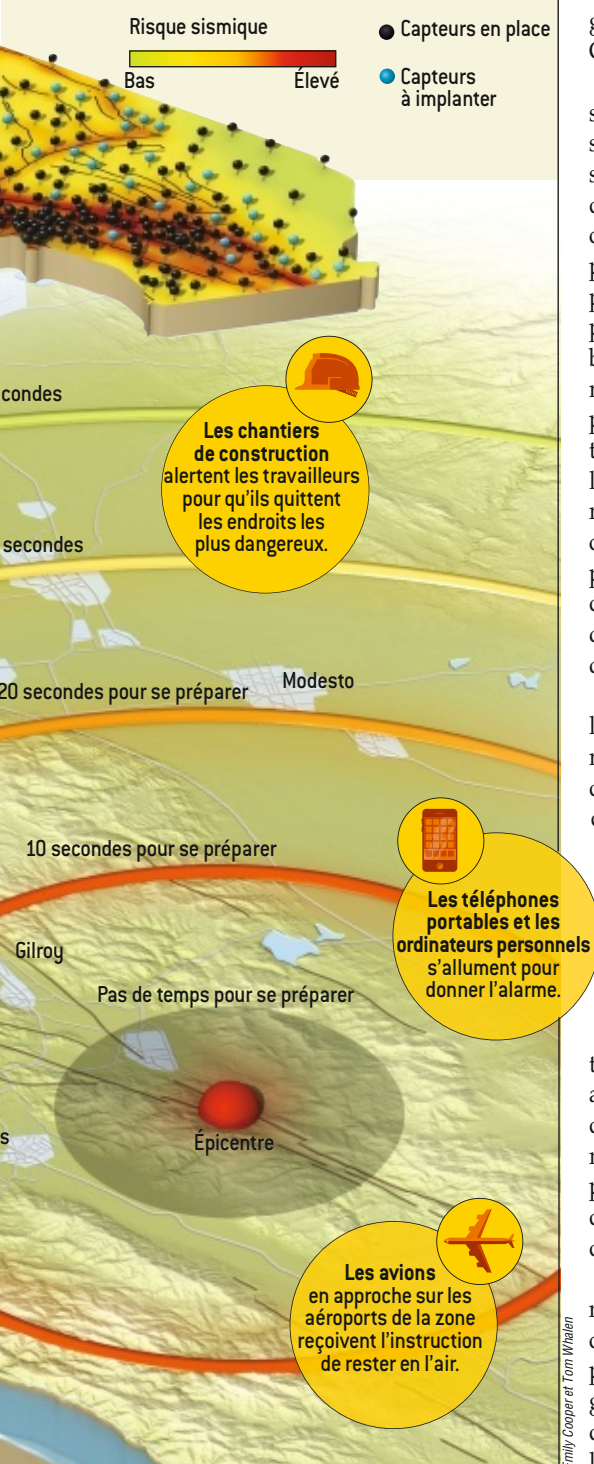
Les ascenseurs des tours s'arrêtent à l'étage le plus proche et ouvrent leurs portes.

Une alarme spéciale retentit dans les écoles et les élèves se réfugient sous leurs tables.

Combien de temps après l'alerte ?

Dans le scénario prévu, en cas de rupture de la faille de San Andreas au Sud de la baie de San Francisco, les habitants des zones peuplées auront plus d'une demi-minute pour se préparer au choc.

Bien que les séismes y soient fréquents, la Californie n'est pas encore dotée d'un système d'alerte rapide. C'est pourquoi plusieurs agences gouvernementales américaines et des universités se sont associées pour proposer de couvrir tout cet État d'un réseau de surveillance. Même si le projet s'élève à quelque 80 millions de dollars, il permettra de sauver de nombreuses vies et de limiter les dégâts quand surviendra une secousse notable.



L'on nomme des failles. Le long d'un plan de faille, les deux blocs rocheux se déforment, absorbant les contraintes, mais jusqu'à un certain point. Quand les contraintes emmagasinées sont trop importantes, les deux blocs glissent brusquement l'un contre l'autre, ce qui libère les tensions qui les déformaient. L'énorme énergie, qui décennie après décennie s'est accumulée, se relâche d'un seul coup sous la forme d'ondes mécaniques se propageant de 3,5 à 6 kilomètres par seconde. Ce sont elles qui font trembler le sol.

Des centaines de tremblements de terre se produisent chaque jour. La plupart sont si faibles que nous ne les percevons pas sans l'aide des sismomètres, c'est-à-dire de capteurs du mouvement du sol. Au cours de ces microséismes, la longueur de plan de faille qui décroche ne mesure guère plus de un à deux mètres, ce qui est trop peu pour rendre le phénomène perceptible en surface. Au cours d'un séisme de magnitude 5, en revanche, la longueur du plan de faille qui décroche atteint deux ou trois kilomètres. En surface, on sent alors la terre trembler, mais les constructions modernes résistent aux secousses associées. À la magnitude 8, la rupture se propage sur des centaines de kilomètres dans le plan de faille, créant une déchirure qui peut atteindre la surface et provoquer la rupture d'un bâtiment en deux.

Les sismologues surveillent l'accumulation des contraintes entre les tremblements de terre, et ont pu ainsi identifier de nombreuses portions de faille proches de la rupture. Pour autant, ces failles ne sont pas forcément sur le point de se rompre, car la structure profonde des failles joue aussi un rôle important dans le risque sismique. Cette structure ne pouvant être connue avec précision, la plupart des sismologues doutent qu'il sera possible de créer un système capable de prévoir un grand séisme avec quelques jours ou quelques heures d'avance. Jusqu'à preuve du contraire, le mieux que l'on sache faire aujourd'hui pour parer aux dangers d'un violent séisme est de le détecter dès son déclenchement afin de donner immédiatement l'alerte.

Certaines caractéristiques des séismes nous y aident. Ce que nous percevons comme une secousse prolongée se décompose en fait en plusieurs phases. L'énergie d'une rupture de la croûte se propage dans la terre sous deux formes distinctes : les ondes P et les ondes S (voir l'encadré ci-

contre). Ces deux types d'ondes partent en même temps de la surface de la faille, mais leur ressemblance s'arrête là. Les ondes P sont des ondes de compression comparables aux ondes sonores. Elles se propagent relativement vite (à quelque six kilomètres par seconde), mais véhiculent peu d'énergie. Pour leur part, les ondes S sont des ondes transversales s'apparentant aux vagues. Elles se déplacent plus lentement (à quelque 3,5 kilomètres par seconde) et représentent l'essentiel de l'énergie d'un séisme. Elles provoquent des mouvements horizontaux et verticaux du sol, si violents que les immeubles ressemblent à des coquilles de noix sur une mer déchaînée.

En outre, toutes les ondes sismiques ne se ressemblent pas ; suivant la taille de la zone de rupture et l'importance du glissement qui se produit, elles prennent des formes différentes. Les ondes P lors d'une rupture de petite taille et impliquant un glissement réduit sont d'amplitude relativement limitée et de hautes fréquences : elles produisent un petit signal bref. Les séismes plus puissants correspondant à une rupture de plus grande taille et à un glissement plus ample produisent des trains d'ondes P de plus grande amplitude et de fréquences plus basses. Une différence que l'on peut comparer à celle qui sépare le pépiement d'un moineau du grondement d'un ours.

Juste un sismomètre

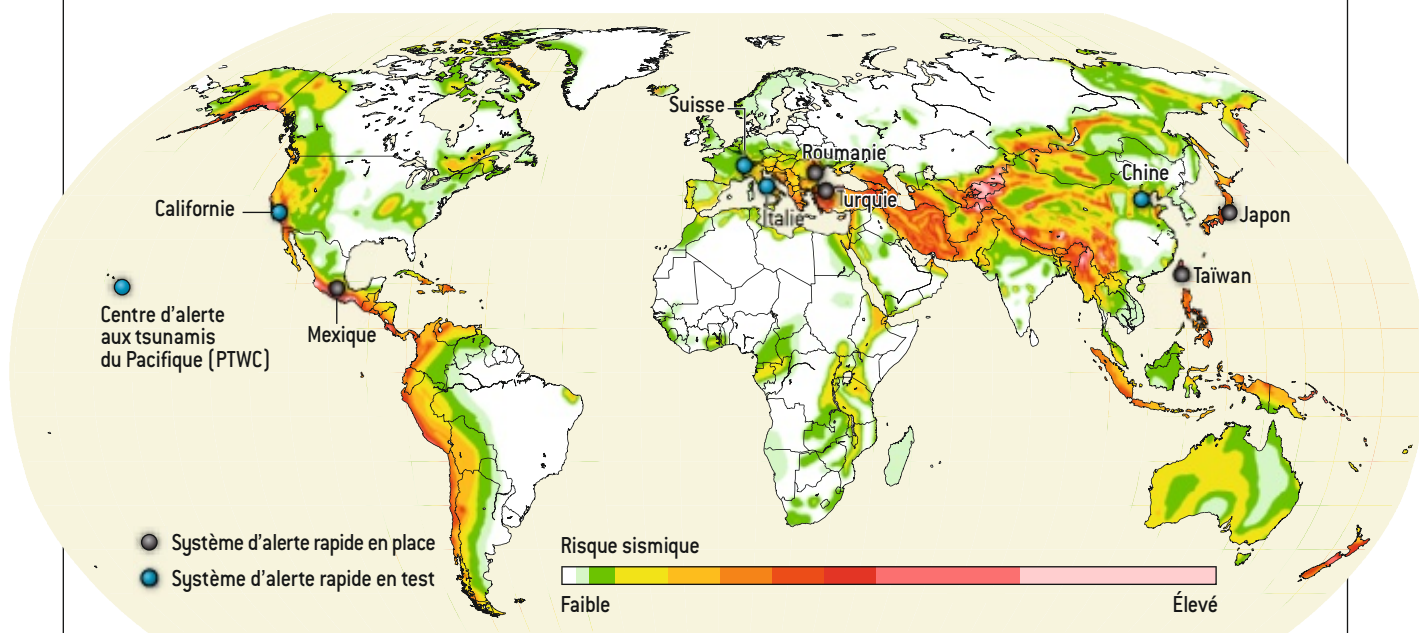
Un unique sismomètre suffit à estimer la magnitude d'un tremblement de terre à partir des caractéristiques des ondes P : un train de forte amplitude et de basses fréquences déclencherait une alerte. Cette approche fondée sur l'usage d'une seule station sismologique semble être la façon la plus rapide de donner l'alerte près de l'épicentre. Toutefois, les ruptures de faille varient – tous les tremblements de terre ne se ressemblent pas – et la nature des terrains situés sous le sismomètre influe aussi sur l'onde P. Cette variabilité du signal enregistré par le sismomètre augmente le risque de fausse alerte (alarme sans séisme) et celui d'absence d'alerte en présence d'un tremblement de terre bien réel...

Une solution possible à ce problème consiste à combiner les données enregistrées par plusieurs sismomètres distants de quelques kilomètres. Une approche, qui, compte tenu du fait que les terrains

LES SYSTÈMES D'ALERTE RAPIDE DANS LE MONDE

Il existe actuellement cinq systèmes d'alerte sismique rapide dans le monde. Chacun d'eux est adapté à la géologie et aux besoins particuliers du pays qui l'a installé. Au Mexique, des capteurs placés sur la côte Pacifique détectent les séismes se produisant dans la zone de subduction située au large et déclenchent des alarmes à Mexico. Cette métropole de 20 millions d'habitants est en effet particulièrement en danger, car elle est construite sur d'anciens lacs où les ondes sismiques entrent

en résonance et se concentrent. De même, le système roumain est conçu pour donner l'alerte à Bucarest lorsqu'un séisme se déclenche dans les montagnes des Carpates à quelque 150 kilomètres. Au Japon, en revanche, c'est tout le pays qui est menacé. Après le séisme de Kobé en 1995 et ses 6 000 victimes, plus de 2 000 stations sismiques ont été installées sur tout le territoire, ce qui a produit le système d'alerte sismique rapide le plus étendu et le plus perfectionné de la planète.



se trouvant sous les capteurs varient, devrait livrer une estimation moyenne de la magnitude. La mise en place de réseaux sismologiques transmettant les données des capteurs vers une station de traitement est nécessaire. On doit souligner cependant que toute seconde perdue dans le traitement des données ou la transmission est problématique, car en une seconde, les dévastatrices ondes S progressent de trois à cinq kilomètres...

Il semble donc que la meilleure solution consiste à combiner l'approche par station unique et celle par réseau, afin de donner l'alerte rapidement dans les zones proches de l'épicentre tout en s'assurant que, plus loin de l'épicentre, la secousse la plus violente sera annoncée avec quelques dizaines de secondes d'avance.

Ainsi, tout système d'alerte rapide résulte d'un compromis entre la nécessité d'avoir une bonne précision sur la localisation de l'épicentre, et celle de prévoir le séisme le plus longtemps possible à l'avance. Plus on multiplie les données recueillies par le réseau sismologique, meilleures seront les prévisions ; mais à mesure

que l'on améliore la qualité des alertes, on diminue le temps dont disposent les populations pour se mettre à l'abri avant la secousse. Or, pour certains usagers du système, il vaut mieux risquer quelques fausses alertes et avoir davantage de temps pour réagir. Dans une école, par exemple, on tolérera facilement quelques fausses alarmes, si cela permet d'avoir plus de temps pour mettre les enfants à l'abri. D'ailleurs, les fausses alertes seront autant d'occasions de s'entraîner pour acquérir les bons réflexes. En revanche, si une seconde suffit à éteindre un réacteur nucléaire, il est beaucoup plus long et donc très coûteux de le remettre en production. Les opérateurs nucléaires ont donc intérêt à privilégier la précision et à éviter au maximum les fausses alertes. Ils ne voudront agir qu'en ayant la certitude de l'imminence d'un séisme.

Des systèmes d'alerte rapide de natures diverses sont en fonctionnement dans le monde depuis longtemps. Dans les années 1960, les ingénieurs japonais ont par exemple intégré des sismomètres dans les rails du TGV japonais *Shinkansen*. Toute

secousse un peu trop forte déclenche une alarme dans la cabine de pilotage, afin que le conducteur fasse ralentir le train. Des chercheurs japonais ont aussi construit des réseaux de sismomètres destinés à avertir de l'avance des secousses les plus violentes.

Le système mexicain

Quant au réseau d'alerte rapide mexicain, il est conçu pour détecter les séismes sous-marins proches de la côte afin que les habitants de Mexico soient prévenus. Cette métropole de 20 millions d'habitants est en effet installée sur des fonds lacustres qui amplifient les effets des ondes sismiques. Étant donné la distance entre la côte et la ville, on peut avoir une soixantaine de secondes au moins pour réagir. Mis en service en 1993, le système d'alerte mexicain a passé son premier test deux ans plus tard. Le 9 octobre 1995, un séisme de magnitude 8 s'est déclenché au large de la côte de Manzanillo. Le système d'alerte a détecté le tremblement et a diffusé des alertes sur les chaînes de radio

et de télévision de Mexico, et par l'intermédiaire de fréquences radio dédiées. Grâce à l'alerte, le métro a été arrêté quelque 50 secondes avant l'arrivée de la secousse, et l'évacuation des écoles s'est déroulée comme prévu.

En service depuis 2007, le système japonais fait pour sa part un large usage des nouvelles techniques de communication. Les alertes sont non seulement diffusées par les radios et les télévisions, mais aussi par l'intermédiaire de récepteurs spéciaux répartis dans les foyers, les bureaux et les écoles. Des fenêtres s'ouvrent sur les écrans d'ordinateur, montrant une carte actualisée en temps réel de l'épicentre et de la progression des ondes sismiques. Un chronomètre décompte le temps restant avant l'arrivée de la secousse et en donne l'amplitude prévue. De leur côté, les opérateurs de téléphonie mobile envoient à tous les téléphones des textos annoncés par un signal sonore caractéristique. Dans les installations dangereuses, telles les centrales nucléaires, les chemins de fer, les aéroports, etc., des systèmes de communications dédiés donnent l'alerte, laquelle est adaptée au destinataire.

L'expérience nipponne montre que les systèmes d'alerte rapide ne sauvent pas seulement des vies, mais qu'ils diminuent l'ampleur des pertes économiques dues à un séisme. La survenue en 2003 de deux tremblements de terre près de Sendai avait ainsi entraîné des dégâts directs et d'autres indirects dus, notamment, à des incendies s'élevant à plus de 11 millions d'euros dans l'usine de semi-conducteurs OKI. Suite au séisme, cette unité de production a dû fermer une première fois 17 jours, puis à nouveau 13 jours. La Société OKI a ensuite investi quelque 420 000 euros pour équiper l'usine d'un système d'alerte rapide. Deux tremblements de terre comparables ont eu lieu depuis, qui n'ont entraîné que 150 000 euros de pertes et respectivement 4,5 et 3,5 jours de chômage technique.

La Californie est une zone de forte sismicité. Depuis 2006, plusieurs universités et agences fédérales américaines travaillent à la mise au point d'un système d'alerte rapide pour la Californie. *Shake Alert*, le pilote de ce système, intègre environ 400 stations sismiques qui commenceront bientôt à envoyer des alertes à un premier groupe d'utilisateurs. Le dispositif envoie aux personnes proches de l'épicentre des alertes immédiates produites par la station la plus proche,

puis aux autres habitants des alertes plus précises issues du réseau des stations sismologiques. On prévoit de pouvoir envoyer les alertes cinq secondes seulement après les premières ondes P.

Toutefois, la Californie a encore beaucoup de chemin à parcourir avant d'être couverte par un réseau aussi dense que celui du Japon. Les 400 stations sismiques existantes sont toutes concentrées autour des zones urbaines de Los Angeles et de la baie de San Francisco, ce qui laisse de vastes zones non couvertes. Même si la plupart des Californiens habitent dans ces deux agglomérations ou à proximité, le dispositif serait moins efficace si le séisme se déclenchait dans une zone non couverte. Au Japon, des capteurs sont implantés tous les 25 kilomètres dans l'ensemble du pays. Si un tel maillage existait en Californie, le système produirait moins de fausses alarmes et la population serait prévenue plus tôt.

COMME AU JAPON, IL FAUDRAIT VEILLER à diffuser les alertes sur tous les appareils reliés aux réseaux de télécommunication, car, généralement, chacun a son portable avec soi.

Comme au Japon, il faudrait veiller à diffuser les alertes sur tous les appareils reliés aux réseaux de télécommunication, car, généralement, chacun a son téléphone portable avec soi. On pourrait ainsi recevoir une alerte simple sur son téléphone annonçant la magnitude prévue et décomptant le temps jusqu'à l'arrivée de la secousse. On pourrait aussi ajouter des conseils simples, tels que : « Mettez-vous à l'abri dans un refuge » ou « Réfugiez-vous sous la table ». Les organismes et entreprises de grande taille, répartis sur plusieurs sites, auront sans doute besoin d'informations plus détaillées, telles des cartes de progression des ondes sismiques ou de répartition des secousses.

Le système d'alerte rapide californien serait peu onéreux par rapport aux coûts d'un séisme majeur. Nous estimons qu'une soixantaine de millions d'euros suffiraient à effectuer la mise à niveau des réseaux existants et à ajouter les quelque 100 stations sismologiques supplémentaires nécessaires. Le tout pourrait prendre cinq ans. Les Californiens se féliciteront-ils dans six ans de ces modestes investissements ? ■

L'AUTEUR



Richard ALLEN, géophysicien, est directeur-adjoint du Laboratoire de sismologie de l'Université de Californie à Berkeley, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. M. Allen, O. Kamigaichi et P. Gasparini (dir.), **New methods and applications of earthquake early warning**, *Geophysical Research Letters*, vol. 36, n° 5, 2009.

Richard Allen, Paolo Gasparini et Osamu Kamigaichi, **Earthquake early warning**, *Seismological Research Letters*, vol. 80, n° 5, pp. 682-782, 2009.

R. Allen et al., **The status of earthquake early warning around the world : an introductory overview**, *Seismological Research Letters*, vol. 80, n° 5, pp. 682-693, 2009.

Le site du projet *Shake Alert* : www.cisn.org

Quand la mécanique s'inspire DES PROTÉINES

Jerry Brown

La protéomimétique est l'art de déduire, des structures des protéines, des principes simples applicables à l'ingénierie.

L'ESSENTIEL

- ✓ Moteur, cliquet, ressort... Les protéines présentent une grande variété de structures remplissant diverses fonctions.
- ✓ Leur étude fournit de nouvelles idées aux ingénieurs pour améliorer des mécanismes ou en concevoir de nouveaux.
- ✓ Le superenroulement de deux chaînes protéiques, par exemple, permet de revisiter le concept d'assemblage à tenons et mortaises.
- ✓ Les myosines, quant à elles, suggèrent des astuces pour amplifier l'action d'un levier et l'adapter aux besoins.

La nature a souvent inspiré l'homme depuis l'apparition des premiers objets fabriqués, il y a quelque 70 000 ans. Son étude à différentes échelles, en particulier, a conduit à de nombreuses innovations en ingénierie. Jusqu'au XVII^e siècle, les sources d'inspiration étaient des structures visibles à l'œil nu. L'invention du microscope offrit de nouvelles perspectives.

En 1948, par exemple, l'ingénieur suisse George de Mestral inventa le principe du Velcro en observant des graines de bardane au microscope : elles sont hérissées de minuscules crochets qui s'agrippent aux mailles d'un tissu. Plus récemment, D. Bechert, du Centre aérospatial allemand, Konrad Koeltzsch, de l'Université d'État de l'Ohio, aux États-Unis, et leurs collègues se sont aperçus, en étudiant la peau de requin, qu'une surface recouverte de petites écailles correctement orientées diminue la turbulence dans les liquides ; plusieurs applications ont découlé de cette observation, notamment un revêtement pour avion qui permet des économies de carburant. Et nous sommes loin d'avoir fait le tour des structures de la nature. La biomimétique – quand l'ingénierie imite la biologie – a beaucoup plus à nous apprendre.

Les techniques biophysiques du XX^e siècle, en particulier la cristallographie aux rayons X, mais aussi la résonance

magnétique nucléaire, voire la microscopie électronique, ont révélé aux ingénieurs la diversité du monde moléculaire. Les molécules présentent une variété quasi infinie de formes, de compositions, d'arrangements géométriques et de tailles qui leur confèrent des structures et dynamiques propres dont dépendent leurs propriétés chimiques et fonctionnelles. Parmi toutes les classes de molécules, les protéines, par la diversité de leurs structures et de leurs fonctions, pourraient devenir l'une des principales sources biologiques d'inspiration des ingénieurs – suffisamment, en tout cas, pour que cette inspiration mérite le nom de protéomimétique.

Ingénieuses protéines

À l'aide de plusieurs exemples, nous allons voir qu'elles fournissent déjà de nouvelles conceptions ou variations utiles de systèmes mécaniques bien connus, tels le système tenon-mortaise ou les leviers – conceptions qui peuvent être appliquées aux échelles tant macroscopique que microscopique. Mais auparavant, examinons pourquoi les protéines sont si prometteuses pour l'ingénierie.

La structure des protéines peut se comprendre à plusieurs niveaux ou hiérarchies. La structure primaire d'une protéine est la chaîne d'acides aminés assemblés