

structures souterraines en profondeur. Des calculs d'optimisation permettent d'obtenir des cartes des vitesses établies période par période. De cet ensemble de données on déduit, en chaque point de la zone étudiée, la courbe des vitesses en fonction de la longueur d'onde; en d'autres termes, on cartographie la dispersion. De nouveaux calculs d'optimisation conduisent alors à un modèle tridimensionnel des vitesses de propagation en profondeur, qui indique la géométrie des interfaces géologiques, l'épaisseur de la croûte et les variations des propriétés physiques dans ces unités géologiques.

Prenons l'exemple de la Californie, où les premières tomographies fondées sur le bruit sismique ont été obtenues en 2005 par deux équipes franco-américaines. On disposait sur place d'un réseau de 62 stations sismologiques enregistrant en permanence le mouvement du sol. Nous avons utilisé ces données pour calculer, par la méthode de corrélation, les temps de trajet correspondant aux 1891 paires possibles de stations. À partir de ces temps de trajets virtuels, nous avons cartographié la vitesse des ondes de Rayleigh et ainsi déterminé l'extension en profondeur des structures géologiques de surface (voir la figure 4).

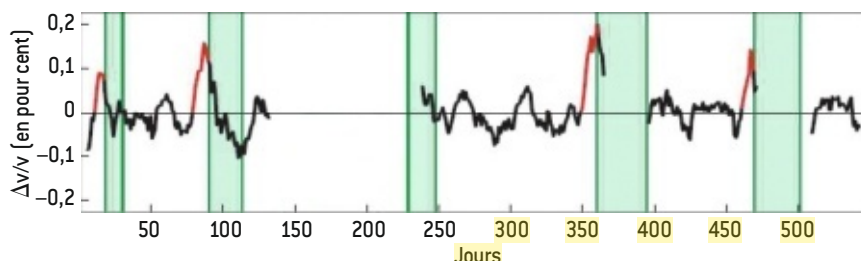
Du bruit sismique enfin rendu utile

Jusqu'à l'avènement de l'imagerie sismique passive, les enregistrements de bruit utilisés dans cet exemple étaient disponibles dans les bases de données, mais inutilisés. Aujourd'hui, tant de confrères se sont mis à exploiter la méthode de corrélation que le statut du bruit sismique a changé: de nuisible qu'il était, ce signal ténu est devenu un moyen précieux pour obtenir des informations sur les structures profondes. L'imagerie par le bruit sismique ambiant a connu un si grand essor ces dernières années, qu'une grande partie du globe a déjà fait l'objet de travaux analogues à l'étude pionnière sur la Californie. Ainsi, les cartes géologiques de nombre d'endroits de la planète mal explorés ont été précisées, et des nouvelles structures géologiques découvertes.

Ces avancées de la tomographie passive constituent un grand succès. Nous allons voir que l'imagerie sismique passive offre en plus la possibilité inédite de suivre l'évolution des structures géologiques au fil du temps. Nous l'avons déjà évoqué,



Maurice Mashaal



5. LE PITON DE LA FOURNAISE est un volcan assez prévisible pour y tester le pouvoir prédictif de l'imagerie sismique passive. Les variations relatives de la vitesse (v) de propagation des ondes sismiques dans ce grand édifice volcanique ont été suivies pendant plusieurs mois. On remarque des augmentations d'environ 0,1 pour cent de cette vitesse avant chaque épisode d'éruption (*bandes vertes*), et les diminutions qui suivent ces sauts de vitesse ont clairement un aspect prédictif. Pourra-t-on adapter cette méthode d'observation aux volcans difficiles, ceux qui explosent ou qui entrent en éruption rarement, tous les 1 000 ou 100 000 ans ? La question reste posée.

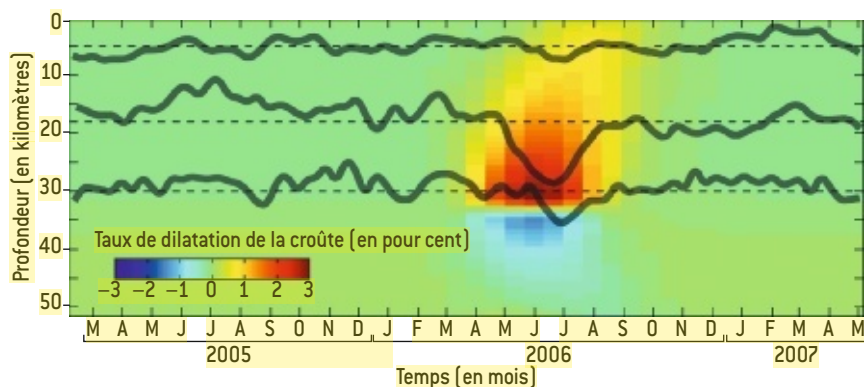
la vitesse des ondes sismiques –souvent la seule grandeur observable directement – est le principal indicateur de l'état des roches. Ainsi, beaucoup de descriptions de l'état physique des roches en profondeur (température, teneur en eau, etc.) sont en fait déduites des cartographies des vitesses sismiques. Or les conditions en profondeur changent, parfois de façon drastique, comme lors du dramatique mégaséisme du Japon le 11 mars 2011, où le déplacement relatif des plaques tectoniques a atteint plus de 25 mètres en quelques secondes.

De tels événements nous rappellent que la Terre se déforme continûment, à la faveur des mouvements tectoniques, des éruptions volcaniques, des séismes, etc. Peut-on détecter les petits changements de la propagation des ondes sismiques accompagnant ces déformations, de préférence avant leurs dangereux climax ? Pour cela, il importe de disposer d'une technique facile à mettre en œuvre de façon répétée et assez précise, ce qui est le cas de la méthode de corrélation.

Pour mesurer les très petits changements de la vitesse de propagation des ondes sismiques, il est nécessaire d'analy-

ser des trajets très longs, où les retards s'accumulent. On s'appuie pour cela sur les ondes de la coda. Ce mot, qui signifie «queue» en latin, désigne la fin des sismogrammes, c'est-à-dire la fin ténue de l'enregistrement d'un séisme. Ces ondes parcourent la région autour des capteurs en suivant des trajets beaucoup plus longs que les ondes directes, de sorte qu'elles sont plus sensibles aux changements du milieu.

En collaboration avec les chercheurs de l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble et de l'Institut de physique du Globe de Paris, nous avons utilisé en 2008 les ondes de la coda pour détecter un signal avant-coureur des éruptions du piton de la Fournaise, sur l'île de la Réunion. Les mesures de la vitesse de propagation des ondes sismiques sous cet édifice volcanique (voir la figure 5) montrent des variations relatives de vitesse en fonction de la date sur une durée de plusieurs mois. Or chaque chute de vitesse est suivie d'une éruption, ce qui s'explique par la déformation de l'édifice volcanique lors de la montée des matériaux éruptifs. Ce gonflement met sous tension les couches superficielles, ce qui se traduit par une chute



6. GRÂCE À CE TYPE DE STATION SISMIQUE (*ci-contre*), les sismologues étudient les effets d'un séisme silencieux dans la région de Guerrero, une zone de subduction au Mexique. Ainsi, à une profondeur d'environ 30 kilomètres, une variation de la vitesse de propagation des ondes sismiques de l'ordre de 0,2 pour cent a été mise en évidence durant sept mois environ (*graphique ci-dessus*). L'analyse en parallèle de données géodésiques a permis de conclure que cette variation de vitesse et la dilatation de la roche en profondeur sont simultanées, ce qui suggère que la première provient de la seconde.



field, en Californie, le groupe français qui a travaillé à La Réunion a observé une chute de vitesse relative de l'ordre de 0,08 pour cent au moment du séisme, suivie d'une lente récupération en plusieurs années. Cette évolution est-elle une réponse des roches à leur déformation en profondeur, ou à l'endommagement des couches de surface dû aux fortes vibrations produites par le séisme ?

La question est très discutée. Pour faire avancer les débats en isolant l'effet de la déformation profonde, nous avons récemment entrepris de mesurer à partir du bruit sismique le changement entraîné par des séismes silencieux. On nomme ainsi des séismes importants qui se produisent lentement, c'est-à-dire jusqu'à plusieurs mois, alors qu'un séisme normal ne dure que quelques dizaines de secondes. Ces séismes ne produisent pas les vibrations destructrices des séismes classiques, et ils étaient passés inaperçus jusqu'à ce qu'on les découvre au Japon grâce à la géodésie, dans les années 2000.

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Campillo et al., Nouveaux développements de l'imagerie et du suivi temporel à partir du bruit sismique, *Comptes Rendus Géoscience*, sous presse (publié en ligne le 1^{er} septembre 2011, doi:10.1016/j.crte.2011.07.007).

F. Brenguier et al., Postseismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from continuous seismological observations, *Science*, vol. 321, pp. 1478-1481, 2008.

N. M. Shapiro et al., High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise, *Science*, vol. 307, pp. 1615-1618, 2005.

R. L. Weaver et O. I. Lobkis, Ultrasonics without a source : Thermal fluctuation correlation at MHz frequencies, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, pp. 134301-134304, 2003.

M. Campillo et A. Paul, Long range correlations in the seismic coda, *Science*, vol. 299, pp. 547-549, 2003.

T. L. Duvall et al., Time distance helioseismology, *Nature*, vol. 362, pp. 430-432, 1993.

de vitesse des ondes sismiques (de l'ordre du millième) faible, mais décelable. Ce résultat – la détection passive de signaux précurseurs des éruptions volcaniques – est très encourageant. Il n'est toutefois que préliminaire : volcan de point chaud, le piton de la Fournaise est un volcan effusif à activité régulière, donc peu dangereux et relativement prévisible. Le véritable enjeu de la prévision volcanologique reste la détection de signes précurseurs certains sur les volcans explosifs que sont les volcans de subduction (Stromboli, Vésuve, mont Saint Helens, etc.), où la rareté des grands événements bien mesurés rend difficile le test des méthodes. Il reste donc d'importants essais à mener pour valider la méthode dans de tels contextes.

Le problème des signaux précurseurs d'un séisme est comparable, mais plus difficile pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'hypocentre d'un séisme, c'est-à-dire la zone qui bougera un jour, n'est pas connu d'avance. Ensuite vient le fait que les séismes commencent en profondeur, sans que ce déclenchement soit associé à des effets mesurés en surface, comme c'est le cas pour les éruptions volcaniques.

L'attention des chercheurs s'est donc portée sur les déformations de grandes amplitudes associées aux séismes une fois que ceux-ci se sont déjà produits. Ainsi, après un séisme de magnitude 6 à Park-

Du bruit pour sonder les séismes silencieux

Au Mexique, nous avons suivi un séisme silencieux de magnitude 7,6, qui s'est déroulé pendant environ six mois. Tout récemment, Diane Rivet, dans notre équipe à Grenoble, a montré que les déformations qu'il a produites dans la croûte terrestre ont induit un léger changement des propriétés élastiques, qui se traduit par un changement de la vitesse des ondes (*voir la figure 6*).

Ce résultat démontre qu'il est possible d'exploiter le bruit sismique pour suivre dans le temps l'état de tension de la roche profonde. Bien entendu, d'autres facteurs que ces tensions dues au séisme sont à prendre en compte, tels les effets non linéaires des matériaux de surface, la teneur en eau des couches superficielles, la thermo-élasticité, etc. Il n'en demeure pas moins que la possibilité de mesurer l'état de déformation des roches profondes est apparue. Elle pourra trouver des applications en sismologie, mais aussi dans l'industrie, par exemple pour étudier un lieu potentiel de stockage du dioxyde de carbone ou un gisement d'hydrocarbures. Le bruit sismique n'est plus un vil ensemble d'ondes parasites, mais l'utile chuchotement des océans qui nous révèle l'intérieur de la Terre, voire son évolution géologique. ■

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Dossier Pour la Science

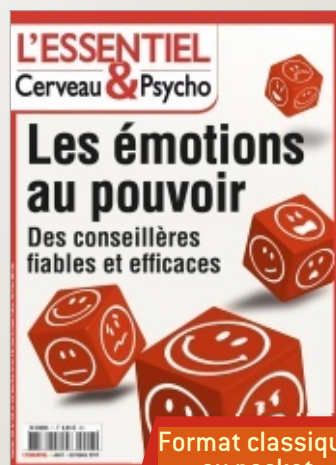
Découvrir la chimie qui régule les écosystèmes ou la vie autour des sources hydrothermales des abysses ; exploiter de façon raisonnée la richesse des fonds marins (microalgues, ressources minérales, méthane...) ; découvrir des médicaments nouveaux ; protéger les mers contre les marées noires ou les déchets plastiques... Aujourd'hui, la chimie est au centre d'une alliance durable entre les hommes et les océans.

Numéro 73, octobre-décembre 2011 – Prix : 6,95 €

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Émotions sociales, émotions individuelles, neuropsychologie des émotions : les émotions ont une influence notable sur nos comportements et nos décisions. Dans ce nouveau numéro thématique, découvrez les émotions dans tous leurs états et apprenez pourquoi elles sont les alliées de la raison.

Numéro 7, août-octobre 2011 – Prix : 6,95 €



Format classique ou pocket



Format classique ou pocket

Cerveau & Psycho

Notre attention est-elle menacée ? Sollicitations de la publicité, des smartphones, des alertes e-mail au travail : il est de plus en plus difficile de rester concentré. Neurobiologistes et psychologues dévoilent les rouages de cette capacité.

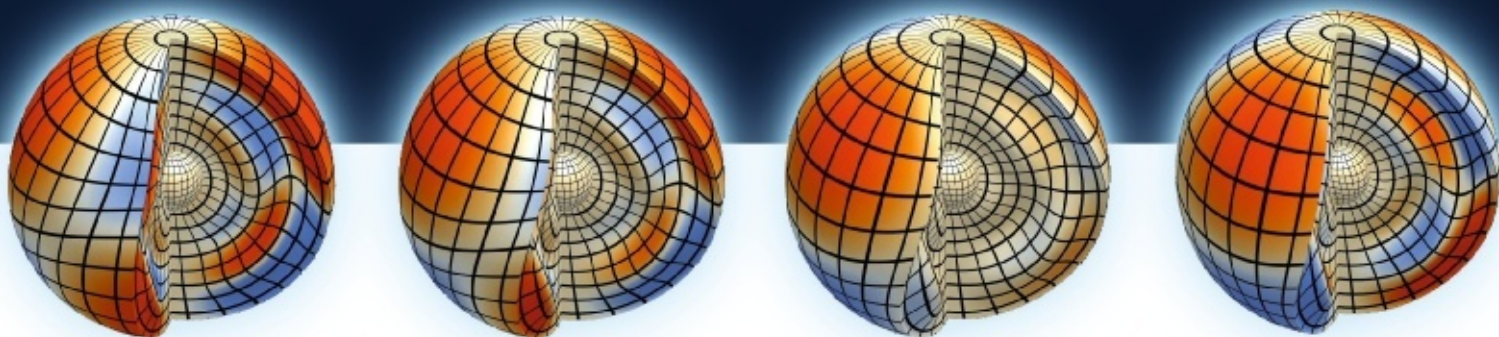
À lire aussi : les liens entre grands-parents et petits-enfants, des gaz dans le cerveau, et bien d'autres sujets.

Numéro 47, septembre-octobre 2011 – Prix : 6,95 €

Numéro 48 en vente dès le 15/11.

POUR LA
SCIENCE

L'astérosismologie :



L'observation, avec les satellites CoRoT et Kepler, des ondes sismiques qui agitent la surface des étoiles fait entrer la physique stellaire dans une nouvelle ère.

Éric Michel, Michel Auvergne et Annie Baglin

Cette cloison que vous projetez d'abattre est-elle pleine ou creuse ? D'expérience, vous savez qu'il suffit de taper à sa surface et d'écouter le son qui en résulte : s'il est sourd, étouffé, le mur est plein. Si en revanche le son est « clair », il y a tout à parier que la cloison n'est pas très dense.

Analyser le son que produit un objet pour déterminer sa structure interne est une technique couramment employée par de nombreux artisans, industriels et scientifiques. Les sismologues étudient par exemple la propagation des ondes acoustiques engendrées par les séismes pour sonder l'intérieur de la Terre : l'analyse des temps de parcours les renseigne sur les différentes couches traversées.

Il en est de même avec les étoiles. Loin d'être immobiles, elles vibrent en permanence en raison de divers processus qui agitent le gaz brûlant dans leurs entrailles. Les infimes oscillations visibles en surface offrent aux astronomes un aperçu de leur structure interne.

Si le principe de cette « sismologie stellaire », ou astérosismologie, est sim-

ple, sa mise en œuvre est un véritable défi, tant en termes d'observations que de modélisation théorique. Longtemps limité par les difficultés des observations au sol, le domaine connaît une révolution depuis le lancement du satellite franco-européen CoRoT, fin 2006, et du satellite américain Kepler, en 2009. Une avalanche de nouvelles observations d'une précision inédite apportent un éclairage nouveau sur des questions brûlantes de la physique stellaire.

De nouvelles observables

Car contrairement à ce que l'on pourrait penser, il reste beaucoup à apprendre de la physique des étoiles. En première approximation, une étoile est une boule de gaz très chaud, née de la contraction gravitationnelle d'un nuage de gaz et de poussière interstellaire. Lorsque le cœur est assez chaud et dense pour que s'y amorce la fusion nucléaire de l'hydrogène, la contraction s'arrête. Tant que cette source d'énergie perdure, l'étoile est en équilibre entre sa propre gravité et la pression interne.

Cette phase qui dure la majeure partie de sa vie est nommée séquence principale. Une fois l'hydrogène épuisé, l'étoile connaît ensuite successivement des phases de contraction puis de fusion d'autres éléments, avant de connaître une fin plus ou moins violente selon sa masse initiale.

Ce tableau fait déjà intervenir de nombreux processus physiques complexes : réactions nucléaires, interactions entre rayonnement et matière, propriétés thermodynamiques en conditions extrêmes, etc. Il est cependant loin d'être complet. De nombreux autres processus entrent en jeu : transport de l'énergie par le brassage convectif dans les couches proches de la surface, ségrégation des différents éléments chimiques au fil du temps sous l'effet de la gravité et du flux de rayonnement, mélange associé à la circulation à grande échelle induite par la rotation de l'étoile, influence d'un champ magnétique éventuel, etc. Ces phénomènes complexes à modéliser modifient la structure interne des étoiles, et par là, leur évolution.

Or notre compréhension actuelle des étoiles repose essentiellement sur des gran-