

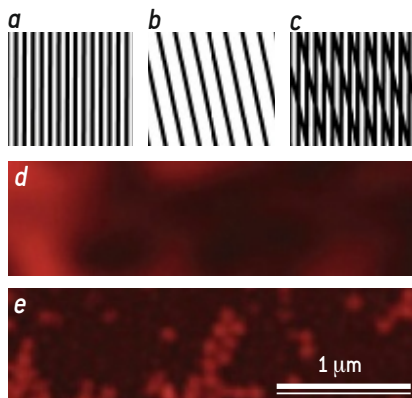
surface, alors qu'aucune lumière émise sur la cavité du laser ne peut être observée sans la sonde locale diffusante. En général, les études menées dans l'industrie pour caractériser l'émission d'un laser semi-conducteur portent sur son spectre et la qualité du faisceau qu'il produit à grande distance. L'image super-résolue que nous avons obtenue montre que le microscope en champ proche permet d'aller plus loin : en étudiant la distribution spatiale des ondes évanescentes sur la cavité du laser en fonctionnement, nous déterminons celle des ondes dans la cavité (voir la figure 3). Cette information est importante pour la fabrication de tels dispositifs.

La super-résolution en champ lointain

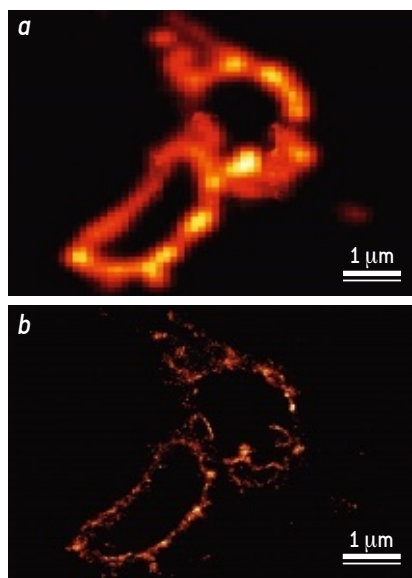
Les techniques de microscopie en champ proche sont au cœur de l'optique sub-longueur d'onde et ont donné naissance au domaine de la nano-optique. Toutefois, de récentes études ont montré que des images super-résolues peuvent être formées quand on utilise des instruments fonctionnant en champ lointain et donc limités par la diffraction, en particulier des microscopes optiques classiques. Illustrons deux principes de ces nouvelles approches, dans le cadre de l'imagerie de fluorescence.

En imagerie de fluorescence, on enregistre la distribution spatiale d'émetteurs fluorescents ou fluorophores, souvent des molécules organiques, répartis dans l'échantillon. L'imagerie en biologie étant le champ d'application privilégié de ces techniques, les échantillons sont en général des cellules ou des tissus vivants. L'intensité de la lumière fluorescente émise est proportionnelle au produit de la densité de fluorophores ($n(r)$, r étant la position du point observé dans l'échantillon) et de l'intensité incidente I_{inc} provenant de la source extérieure, un laser la plupart du temps.

Lorsqu'on forme l'image de l'intensité de fluorescence émise avec un microscope classique, la résolution est limitée à environ $\lambda/2$, où λ est la longueur d'onde de fluorescence. Une première approche pour améliorer la résolution est d'éclairer l'échantillon avec une intensité non uniforme. On parle alors de microscopie par « éclairage structuré ». Grâce au produit $n(r) I_{\text{inc}}(r)$, tout en ne détectant dans l'intensité de fluorescence que des variations spatiales supérieures à $\lambda/2$, on a accès



4. L'AMÉLIORATION DE LA RÉOLUTION en microscopie de fluorescence par éclairage dit structuré repose sur l'effet de moiré. En combinant l'objet (a) avec une illumination structurée (b), on obtient dans l'image un motif de grande période (c) qui peut être détecté par un système limité par la diffraction. En connaissant la structuration imposée à la lumière excitatrice, on retrouve à partir du motif les détails de l'objet. Ainsi, des billes fluorescentes de 50 nanomètres sont peu visibles en microscopie classique (d), mais nettes avec un éclairage structuré (e).



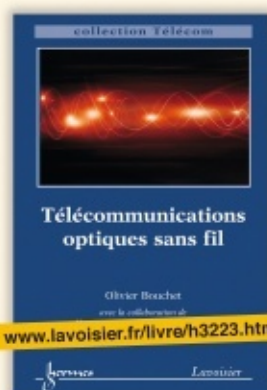
5. DES CELLULES produisent dans leur membrane des molécules fluorescentes – des fluorophores. En observant ces cellules en microscopie classique de fluorescence (a), on obtient une image de la distribution spatiale des fluorophores avec une résolution limitée à $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde de fluorescence. Pour améliorer la résolution, on utilise des fluorophores photoactivables (par une autre source de lumière), que l'on stimule à tour de rôle au cours de cycles de photoactivation. Quand une source isolée émet, on la localise avec précision en repérant le centre de la tache de diffraction qu'elle produit. Au cycle suivant, on peut localiser une autre molécule même si la distance la séparant de la précédente est inférieure à la longueur d'onde. L'image super-résolue (b) s'obtient en répétant ce processus.

à des informations sur la distribution des fluorophores à des échelles plus petites. Le principe repose sur un analogue de l'effet Moiré : en structurant l'intensité incidente à une échelle de $\lambda/2$, on gagne un facteur deux en résolution, limitée alors à $\lambda/4$ (voir la figure 4). En utilisant la réponse non linéaire des fluorophores, due à la saturation de l'émission fluorescente, on peut même aller au-delà de $\lambda/4$ et atteindre des résolutions de quelques dizaines de nanomètres.

Une autre approche consiste à former des images super-résolues en ne détectant l'émission que d'un seul fluorophore à la fois. En effet, même avec un microscope classique, on peut localiser une source unique avec précision en déterminant le maximum de la tache de diffraction produite. Même si la tache a une taille de l'ordre de $\lambda/2$, on peut localiser son maximum avec une précision inférieure à $\lambda/2$ si le rapport signal sur bruit est suffisant et si le détecteur a des pixels assez petits pour enregistrer précisément la tache de diffraction. La limite est alors contrôlée par le bruit de fond, et non par la longueur d'onde.

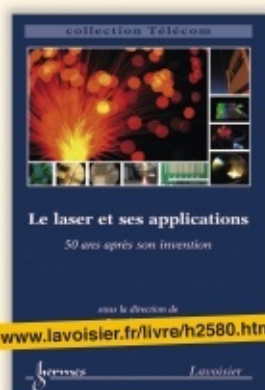
Mais quand l'échantillon contient un grand nombre de fluorophores, comment faire en sorte qu'un seul émette à la fois ? En 2006, deux équipes ont répondu à la question en obtenant des images super-résolues de distribution de fluorophores dans des cellules biologiques. Elles ont utilisé des fluorophores photo-activables : excités par un laser, ces particules émettent seulement quand une impulsion produite par un autre laser de longueur d'onde différente les rend actives. Si à chaque instant, une seule source émet dans une zone de taille limitée par la diffraction, on peut localiser cette source avec précision en utilisant un microscope classique (voir la figure 5). En enregistrant les positions de chaque source, on réalise une image de la distribution des fluorophores avec une résolution bien inférieure à λ . Mais la technique est limitée par la probabilité faible d'avoir deux sources émettant en même temps tout en étant séparées de moins de $\lambda/2$.

Ces nouvelles approches en champ proche et en imagerie de fluorescence permettent aujourd'hui aux scientifiques d'obtenir des images avec une résolution spatiale de l'ordre de quelques nanomètres. En imagerie optique, l'exploitation des lois de la physique sous de nouveaux angles permet encore de spectaculaires progrès...



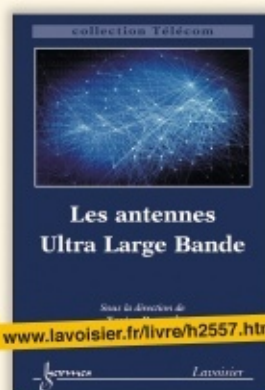
www.lavoisier.fr/livre/h3223.html

O. BOUCHET, avec la collaboration de H. Sizun et C. Boisrobert
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
336 p., 16 x 24, 2011
ISBN : 978-2-7462-3223-5, **89 €**



www.lavoisier.fr/livre/h2580.html

P. BESNARD, P.-N. FAVENNEC (Sous la dir.)
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
376 p., 15,5 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2580-0, **79 €**



www.lavoisier.fr/livre/h2557.html

X. BEGAUD (Sous la dir.)
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
320 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2557-2, **80 €**



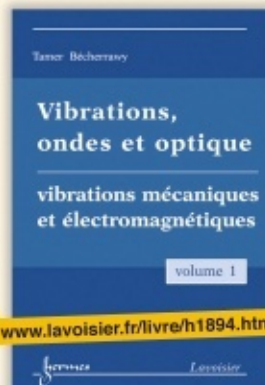
www.lavoisier.fr/livre/h2458.html

N. MOREAU
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
232 p., 15,5 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2458-2, **59 €**



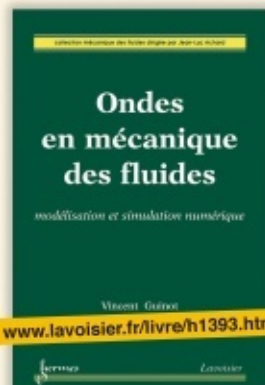
www.lavoisier.fr/livre/h2592.html

B. DÉMOULIN, P. BESNIER
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
432 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2592-3
110 €



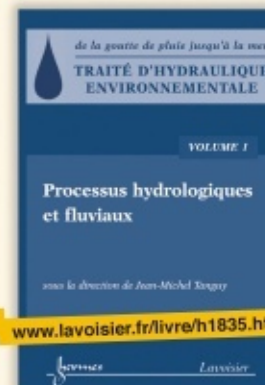
www.lavoisier.fr/livre/h1894.html

En 4 volumes
T. BÉCHERRAWY
Les 4 volumes groupés, 2008
ISBN : 978-2-7462-1894-5
280 €



www.lavoisier.fr/livre/h1393.html

V. GUINOT
Collection Mécanique des fluides, dirigée par Jean-Luc Achard
392 p., 16 x 24, 2006
ISBN : 2-7462-1393-1, **95 €**



www.lavoisier.fr/livre/h1835.html

En 9 volumes
J.-M. TANGUY
Les 9 volumes groupés, 2010
ISBN : 978-2-7462-1835-2,
845 €



www.lavoisier.fr/livre/h2494.html

C. RUMELHARD, C. ALGANI, A.-L. BILLABERT
Collection Hyperfréquences, dirigée par Daniel Pasquet
416 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2494-0
95 €



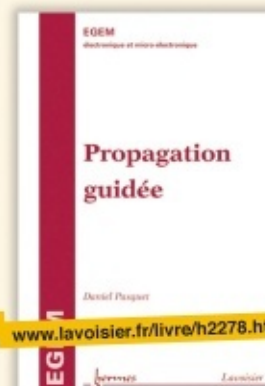
www.lavoisier.fr/livre/h1882.html

B. PIETTE
Collection Hyperfréquences, dirigée par Daniel Pasquet
312 p., 16 x 24, 2007
ISBN : 978-2-7462-1882-6
75 €



www.lavoisier.fr/livre/h2222.html

En 2 volumes
J.-P. MARAGE, Y. MORI
Les 2 volumes groupés, 2009
ISBN : 978-2-7462-2222-9
135 €



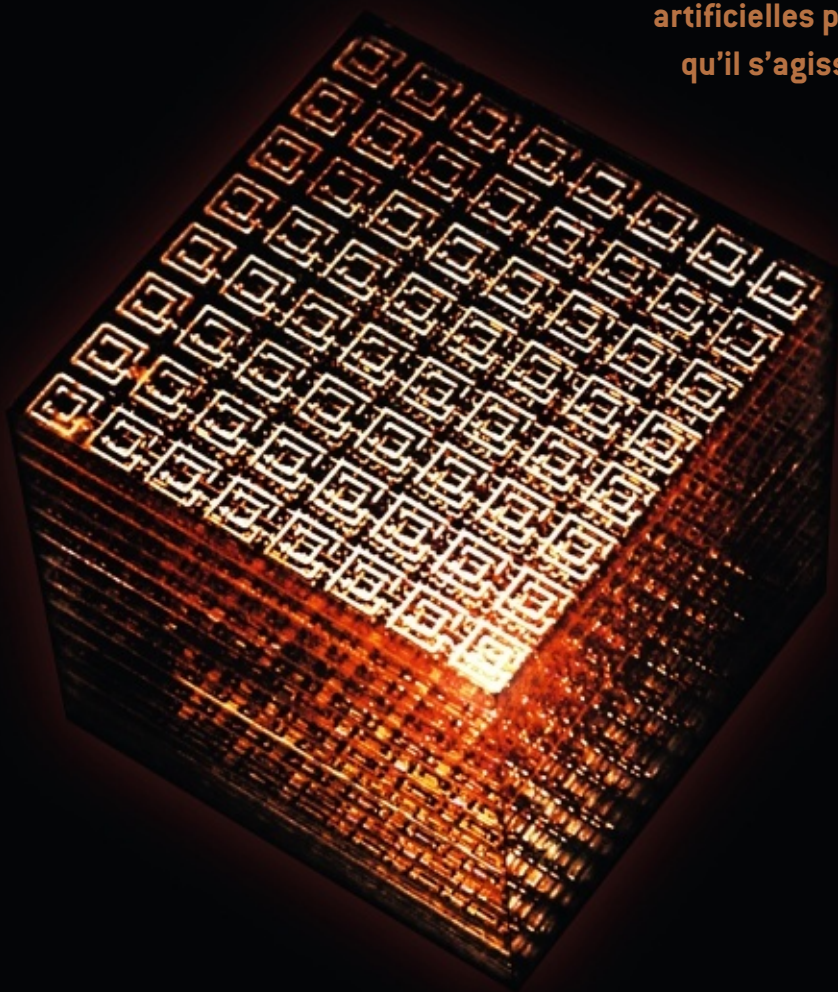
www.lavoisier.fr/livre/h2278.html

D. PASQUET (Sous la dir.)
Série Électronique et micro-électronique (Traité EGEM), dirigée par Robert Baptist et D. Pasquet
350 p., 16 x 24, 2011, relié
ISBN : 978-2-7462-2278-6
120 €

Les ondes sous l'emprise des **métamatériaux**

Sébastien Guenneau, Stefan Enoch et Ross McPhedran

Les physiciens élaborent des structures artificielles pour conformer à volonté les ondes, qu'il s'agisse de lumière, de vagues sur la mer ou encore d'ondes sismiques.



1. CE DISPOSITIF est une lentille quasi parfaite pour certaines ondes qu'il transmet sans les déformer. Cet effet résulte de l'agencement calculé de petits circuits élémentaires, des anneaux de cuivre fendus.

Les Grecs anciens avaient imaginé un casque rendant le dieu des enfers invisible: la Kunée d'Hadès. Depuis se succèdent les légendes et les fictions où des « capes d'invisibilité » confèrent à celui qui s'en revêt le pouvoir de disparaître à la vue. Or les physiciens parviennent aujourd'hui à conformer les ondes de façon à escamoter une partie de l'espace. Ils emploient pour cela des structures composées de motifs élémentaires ayant une taille inférieure à la longueur d'onde incidente. Nous allons expliquer comment les chercheurs déduisent ces structures de transformations reliant l'espace réel à un espace virtuel, où une partie de l'espace d'origine a été supprimée. Puis nous évoquerons plusieurs de ces structures que l'on nomme des métamatériaux.

Qu'est-ce exactement qu'un métamatériau? Le mieux est de répondre à cette question dans le cas le plus spectaculaire: celui des métamatériaux optiques. Pour une onde lumineuse monochromatique, le champ électromagnétique réalise un cycle d'oscillation pour chaque lon-

gueur d'onde parcourue. Il est donc clair que ses interactions avec un matériau seront plus compliquées si la structure de ce dernier comporte des détails de taille inférieure à la longueur d'onde. Or, au sein d'un matériau optique usuel, chaque cube mesurant une longueur d'onde lumineuse de côté contient des milliards d'atomes ou de molécules. On peut donc en général considérer que les propriétés optiques d'un tel milieu sont constantes dans toutes les directions sur une longueur d'onde au moins et en pratique sur de bien plus grandes distances. La plupart des matériaux naturels et artificiels sont de tels matériaux : on les dit isotropes. Toutefois, il existe aussi des matériaux naturels dits anisotropes dont la structure microscopique crée des directions privilégiées. C'est le cas des matériaux biréfringents, dont l'indice de réfraction optique n'est pas le même dans toutes les directions.

L'anisotropie des matériaux naturels peut être imitée artificiellement en remplaçant les arrangements atomiques par des arrangements de dispositifs optiques de tailles inférieures à la longueur d'onde. Un métamatériau est donc un matériau dont certaines propriétés, optiques par exemple, ne résultent pas de sa composition chimique élémentaire, mais d'une architecture artificielle (voir la figure 1). Cette dernière lui confère des propriétés, dites effectives, qui dépendent de la direction.

Invisibilité par réfraction

Aujourd'hui, les physiciens savent de mieux en mieux conférer à un matériau l'anisotropie nécessaire pour donner à une onde électromagnétique ou autre une conformation fixée. John Pendry, de l'*Imperial College* de Londres, David Schurig, de l'Université d'État de Caroline du Sud, et David Smith, alors à l'Université de San Diego, ont indiqué en 2006 la méthode générale pour y parvenir.

Avant d'expliquer l'idée de cette méthode, rappelons que la propagation du champ électromagnétique dans le vide ou dans un matériau transparent est décrite par les équations de Maxwell. Ces équations fondamentales de l'électromagnétisme décrivent de quelle façon se comportent dans le temps et l'espace les composantes indissociables du champ électromagnétique, à savoir le champ électrique et le champ magnétique.

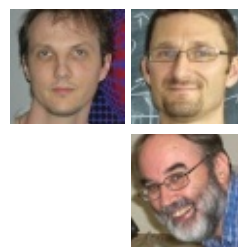
Toutefois, au sein d'un matériau transparent (et aux propriétés linéaires), la réaction de la matière aux champs électrique et magnétique modifie ces derniers de façon proportionnelle. Cette réaction est caractérisée par deux grandeurs, la permittivité diélectrique, notée ϵ , pour ce qui est du champ électrique, et la perméabilité magnétique, notée μ , pour ce qui est du champ magnétique. Elles caractérisent la « réponse » du matériau au champ électromagnétique. La stratégie de J. Pendry et de tous les concepteurs de métamatériaux consiste à contrôler les grandeurs ϵ et μ dans le volume occupé par le métamatériau et ainsi à modifier à volonté la propagation d'un champ électromagnétique dans la structure.

L'entreprise serait compliquée si J. Pendry n'avait trouvé une méthode mathématique pour la ramener à la recherche d'une transformation géométrique, un changement de métrique pour être plus précis. On désigne par ce terme un changement de la définition de la distance entre deux points, qui en pratique se traduit par un changement des coordonnées spatiales. Les équations de Maxwell gardent la même forme lorsqu'on fait des changements de coordonnées d'espace. En revanche, ϵ et μ sont modifiées, ce qui crée des directions privilégiées, donc un milieu anisotrope.

Puisque, dans un tel milieu, ces grandeurs dépendent de la direction, ϵ et μ ne sont plus représentées chacune par un seul nombre, mais par un tableau de 3×3 nombres appelé tenseur. Toutefois, oublions ce détail technique et retenons seulement que, pour décrire l'anisotropie, les physiciens emploient un formalisme qui, au prix d'une complication de la nature mathématique de ϵ et de μ , leur permet de changer d'espace (et de coordonnées) tout en conservant la forme habituelle des équations de Maxwell, ainsi que la forme des calculs usuels en électromagnétisme.

Pour obtenir un milieu anisotrope structuré à volonté, J. Pendry définit d'abord ce qu'il souhaite : par exemple, une situation où les ondes contournent une certaine région de l'espace. Par changement de métrique, il passe dans un espace virtuel où est réalisé ce qu'il souhaite : par exemple que cette région soit réduite à un point. Il impose que ϵ et μ y soient constantes, de sorte que les ondes s'y propagent en ligne droite. Une fois obtenu cet espace virtuel où la permittivité et la perméabilité sont uniformes, le changement inverse

LES AUTEURS



Sébastien GUENNEAU et Stefan ENOCH sont chercheurs du CNRS à l'Institut Fresnel de l'Université d'Aix-Marseille. Ross MCPHEDRAN est professeur à l'Université de Sydney, en Australie.

L'ESSENTIEL

- ✓ Les métamatériaux sont des dispositifs conçus pour réfracter les ondes de façon contrôlée.
- ✓ Une méthode géométrique générale détermine, à partir des trajets recherchés pour les ondes, les propriétés que doit avoir le métamatériau.
- ✓ On a ainsi créé des capes d'invisibilité capables d'escamoter une partie de l'espace ainsi que des lentilles qui, en principe, ont une résolution parfaite.
- ✓ Ces métamatériaux sont toutefois très sensibles à la longueur d'onde et ne fonctionnent que sur un spectre étroit.

Minas H. Tanielian, Boeing Phantom Works

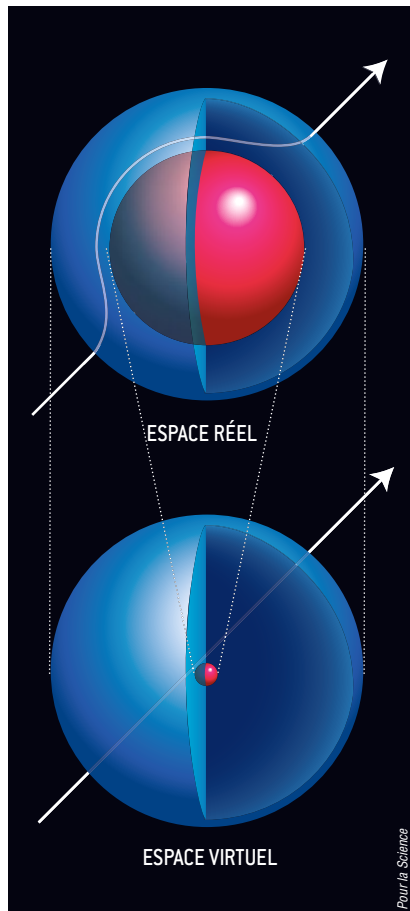
de coordonnées déforme les trajets des ondes, de façon à réaliser la situation souhaitée : par exemple contourner la région à dissimuler. Cependant, ce retour à l'espace réel modifie aussi ϵ et μ , c'est-à-dire que leurs valeurs varient dans l'espace selon un certain motif. Nous voyons que pour déformer comme on le souhaite les trajectoires des ondes électromagnétiques, il suffit de « sculpter » le matériau selon le motif en ϵ et μ indiqué par la transformation géométrique de J. Pendry.

Et cela fonctionne ! En mai 2006, cinq mois après avoir publié leur méthode, J. Pendry et ses collègues ont fabriqué grâce à elle une cape d'invisibilité, où ils ont fait ainsi disparaître de la vue (dans le domaine des micro-ondes) un cylindre plat de cuivre de trois centimètres de rayon.

Pour obtenir sa cape d'invisibilité, J. Pendry a choisi une transformation géométrique qui revient à comprimer une boule en une coquille sphérique, délimitée par deux sphères concentriques. Dans l'espace virtuel, le matériau est une boule homogène pointée (c'est-à-dire dont le centre est exclu) ; dans l'espace réel, il correspond à une boule évidée d'un noyau sphérique, où on loge l'objet à cacher (voir la figure 2).

Dans l'espace virtuel, les ondes électromagnétiques traversent la boule en ligne droite sans être perturbées par le point central. Dans l'espace réel, elles contournent le noyau, à la manière de l'eau d'une rivière s'écoulant sans turbulences autour d'un rocher (voir la figure 3). Autrement dit, elles sont insensibles à l'objet placé dans le noyau, qui est comme transparent.

Que se passe-t-il à l'intérieur de la cape ? Un observateur situé dans la région

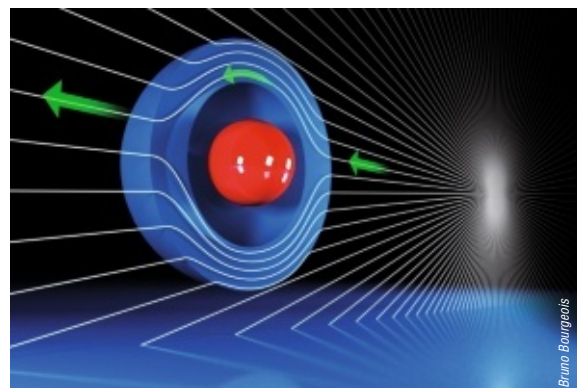
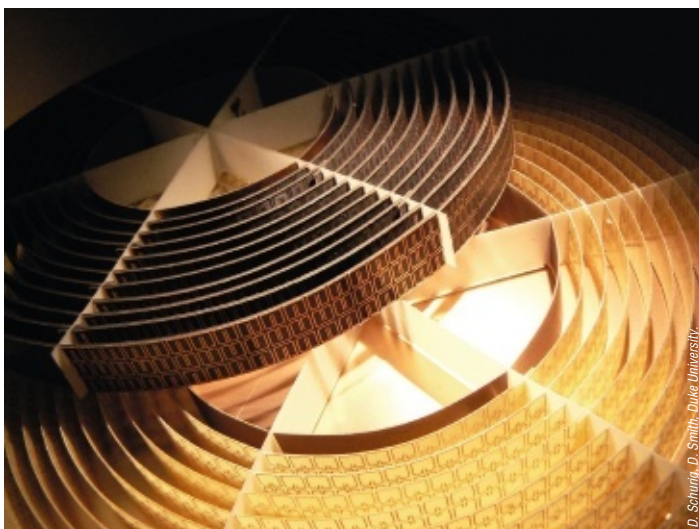


2. DANS UN ESPACE VIRTUEL, on considère un volume sphérique dont le centre (*en rouge*) est exclu. Une transformation géométrique lui associe, dans l'espace réel, une coquille sphérique dont les dimensions extérieures sont conservées, mais celles du cœur notablement augmentées. Certaines caractéristiques du milieu, homogènes dans l'espace virtuel, deviennent anisotropes, ce qui a pour conséquence que les ondes électromagnétiques (*flèches blanches*) contournent le cœur de la coquille.

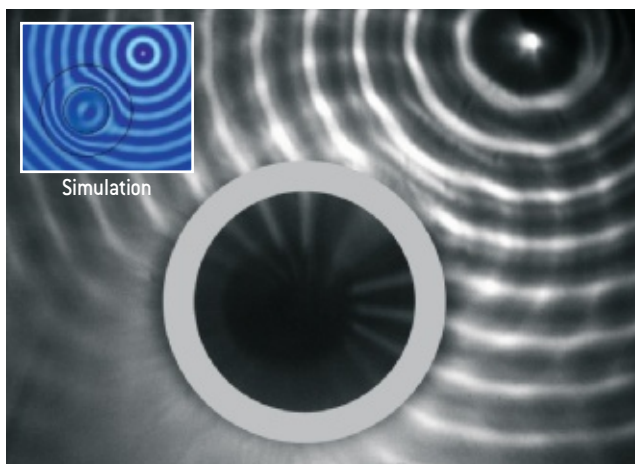
centrale est coupé du monde extérieur. Plongé dans le noir le plus complet, il ignore ce qui se passe en dehors de la cape : il se trouve dans une sorte de trou noir optique. C'est ce que confirment les simulations numériques. Elles montrent aussi que les ondes qui contournent le noyau d'invisibilité se reforment derrière lui avec la même phase que celle qu'elles auraient eue si elles s'étaient propagées dans le vide.

En fait, la cape d'invisibilité de J. Pendry fonctionne seulement à deux dimensions et dans le domaine des micro-ondes. À quoi ressemble-t-elle ? Le cylindre de cuivre qu'elle fait disparaître est entouré d'une structure cylindrique creuse d'apparence hétérogène, dont le rayon extérieur est de six centimètres. Si l'on y regarde de plus près, cet anneau est constitué lui-même de dix cylindres concentriques à la surface desquels sont imprimées des petites boucles en cuivre : des résonateurs en forme d'anneaux fendus. C'est cet ensemble qui constitue le métamatériau et qui forme la cape d'invisibilité. Notons que son emploi suppose aussi celui d'un guide d'ondes afin de prépositionner le champ électrique à la verticale.

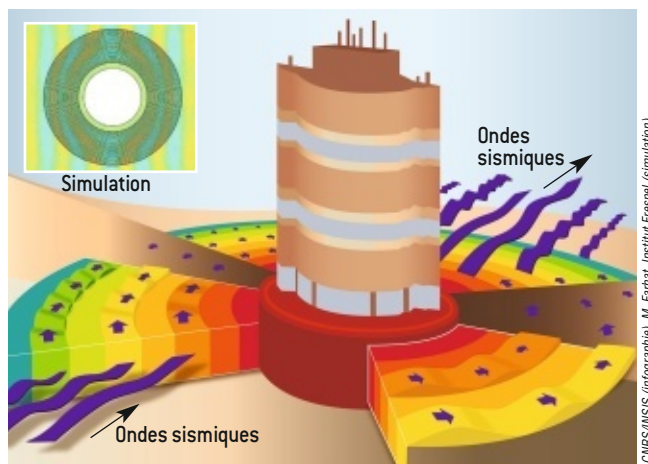
Peut-on étendre le principe de la cape de J. Pendry au domaine du visible ? Oui, mais il faut en pratique franchir de nombreux obstacles. La sensibilité des métamatériaux à la longueur d'onde gêne la réalisation d'une cape efficace à plus d'une longueur d'onde. Il faudra ensuite passer à trois dimensions. Enfin, la réalisation de résonateurs à anneaux fendus de taille au moins dix fois inférieure à la longueur



3. LA CAPE D'INVISIBILITÉ DE J. PENDRY (*ci-contre à gauche*) détourne les ondes centimétriques ou micro-ondes, comme sur le schéma ci-dessus. Cette propriété résulte de la présence de minicircuits de taille inférieure à la longueur d'onde et de l'architecture en anneaux concentriques.



4. CETTE CAPE ANTIVAGUES (au premier plan, masquée par un disque car elle brille au flash) stabilise et aplatit un train incident de vaguelettes (en haut à droite). En mer, de tels dispositifs pourraient protéger des plateformes pétrolières ou des portions de côte.



5. UNE CHAPE ANTISISMIQUE est une cape d'invisibilité pour les ondes dites de Rayleigh. Elle est structurée de façon que ces ondes de surface – les plus destructrices lors d'un séisme – contournent son centre, donc épargnent les fondations du bâtiment.

d'onde visée reste pour l'heure un défi technique : dans le cas du spectre visible, il faudrait des motifs de quelques dizaines de nanomètres seulement...

Malgré ces obstacles, les avancées théoriques et techniques ont été si rapides que certains physiciens prévoient l'élaboration de capes d'invisibilité dans le domaine visible d'ici une dizaine d'années. Aux longueurs d'onde radio, les applications porteraient sur le développement de boucliers ou casques protecteurs électromagnétiques. Des capes d'invisibilité pourraient isoler les appareils sensibles du rayonnement électromagnétique ambiant dans les carlingues des avions ou les hôpitaux. On peut aussi imaginer des casques protecteurs contre les ondes des téléphones portables...

La transposition de ces principes à la réalisation de capes acoustiques, sismiques ou déviant les vagues de la mer est aussi possible. Ainsi, notre équipe marseillaise a récemment réalisé une petite structure déviant les vagues. Elle est constituée d'un disque métallique évidé et de 20 centimètres de diamètre, divisé en secteurs concentriques et radiaux. Nous avons vérifié son efficacité au cours d'une expérience en cuve à ondes, et constaté que la structure rend en effet la surface liquide étale en son centre. Une telle structure, à une échelle bien plus grande bien sûr, pourrait protéger des plateformes pétrolières ou certaines zones côtières contre les tsunamis (voir la figure 4).

Une cape sismique est aussi envisageable. Avec Alexander Movchan, de l'Uni-

versité de Liverpool, au Royaume-Uni, nous avons proposé une solution en nous concentrant sur les plus destructrices des ondes associées aux tremblements de terre : les ondes de Rayleigh, qui sont un type particulier d'onde de flexion (le sol fléchit en surface). Ces recherches ont produit une chape, qui, placée dans les fondations d'un immeuble, le protégerait en grande partie des effets d'un séisme (voir la figure 5). Les ondes de flexion contourneraient le centre de la chape et continueraient leur chemin sans traverser le bâtiment à protéger.

Lentille parfaite

Grâce au principe mis au point par J. Pendry et ses collègues, la réalisation d'une lentille parfaite est aussi envisageable. On nomme ainsi une lentille qui ne déforme pas l'image, ne l'inverse pas et qui a une résolution infinie (l'image d'un point est strictement un point). Les lentilles convergentes convexes usuelles, d'indice de réfraction supérieur à celui du vide ($n = 1$), forment sur le plan image une image inversée, et où deux points distants de moins d'une demi-longueur d'onde environ ne peuvent être distingués. Cette limite ultime de résolution est due à la diffraction de la lumière incidente sur l'objet imagé. On la croyait infranchissable avant l'avènement de la lentille parfaite.

La lentille parfaite théorique consiste en une couche parfaitement plate d'indice de réfraction négatif. Rappelons que l'indice optique ou l'indice de réfraction d'un

matériau est le rapport des vitesses de la lumière dans le vide et dans le matériau : $n = c/v$. Toutefois, la vitesse v de propagation de la lumière dans un milieu est intimement liée à la perméabilité magnétique μ et à la permittivité électrique ϵ par la relation $\mu\epsilon v^2 = 1$, ou, ce qui revient au même, $n = \pm c\sqrt{\mu\epsilon}$.

Sauf rares exceptions, les milieux optiques naturels ont tous une perméabilité et une permittivité positives, et en conséquence un indice de réfraction n positif et supérieur à 1. Toutefois, vers 1968, le physicien russe Victor Veselago s'est intéressé au cas des matériaux ayant une perméabilité et une permittivité négatives. Il a montré que les lois de l'optique impliquent que les matériaux correspondants – qui sont, en pratique, des métamatériaux – ont un indice négatif (c'est-à-dire $n = -c\sqrt{\mu\epsilon}$). L'étude de la réfraction négative était née, et avec elle celle de la « lentille plate de Veselago » : une simple lame d'indice négatif égal à -1 .

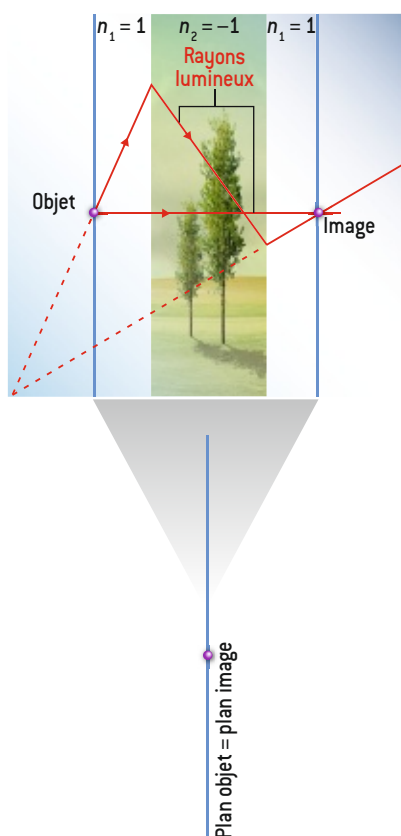
C'est une fois de plus J. Pendry qui, en 2000, en proposa la réalisation. Il avait en effet montré qu'une alternance périodique de fils métalliques et de résonateurs à anneaux fendus présentait une permittivité négative pour les basses fréquences et une perméabilité négative autour de certaines fréquences dites de résonance. Il réalisait ainsi en pratique, mais pour certaines fréquences seulement, le milieu optique imaginé par V. Veselago.

Là encore, la méthode géométrique générale expliquée plus haut permet de se représenter facilement les effets de la

lentille de V. Veselago. Le changement de coordonnées choisi fait passer de l'espace réel à un espace virtuel où la tranche occupée par la lentille plate est réduite à un plan: c'est une sorte de repliement de l'espace sur lui-même qui a été opéré lors du passage dans l'espace virtuel, dont la conséquence dans l'espace réel est que μ et ϵ sont négatives, ainsi que n . Notons qu'ici μ et ϵ restent de simples nombres sous l'effet de cette transformation géométrique qui n'introduit pas de direction privilégiée, donc d'anisotropie.

L'effet optique de ce repliement d'espace est de confondre le plan objet et le plan image (voir la figure 6), ce qui explique qu'il n'y ait pas d'inversion d'image et que la résolution soit infinie. En effet, dans l'espace virtuel, tout point objet étant son propre point image, il en résulte dans l'espace réel que tout point est transformé en un point et uniquement en ce point. Notons par ailleurs que la lentille parfaite de V. Veselago est aussi une sorte de cape d'invisibilité, puisque tout ce qui se trouve dans l'épaisseur de la lentille est invisible.

De concept théorique, la lentille de V. Veselago était donc devenue une curiosité de laboratoire ne fonctionnant qu'à partir des résonateurs de J. Pendry et pour une longueur d'onde fixe... Pourtant, depuis la proposition de J. Pendry, plusieurs équipes ont mis au point des prototypes de lentilles parfaites dans le domaine des ondes centimétriques. La principale difficulté pour descendre dans le



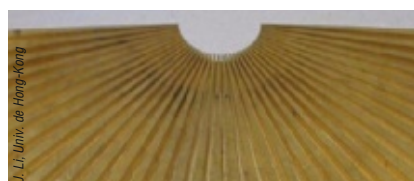
6. LA LENTILLE PARFAITE consiste en une lame d'indice optique égal à -1 . La réfraction atypique qui en résulte fait que l'image d'un point objet est le point symétrique par rapport au plan médian de la lentille (en haut). Tout se passe comme si la lumière continuait son chemin en ligne droite en l'absence de lentille, c'est-à-dire comme si l'espace occupé par la lentille avait été réduit à un plan par le changement de métrique (en bas). Initialement théorique, ce concept connaît aujourd'hui plusieurs réalisations à partir de métamatériaux.

domaine du visible est que les métaux, pierre angulaire des métamatériaux, sont fortement absorbants aux longueurs d'onde optiques, ce qui limite la résolution de la lentille parfaite de J. Pendry et V. Veselago.

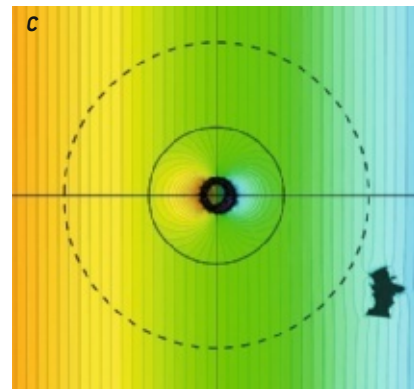
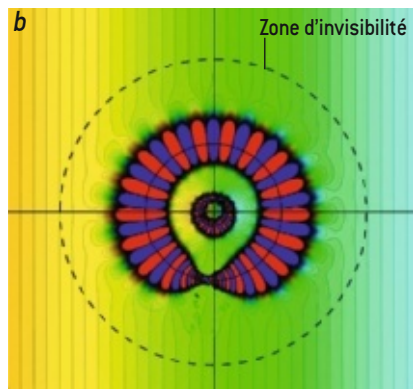
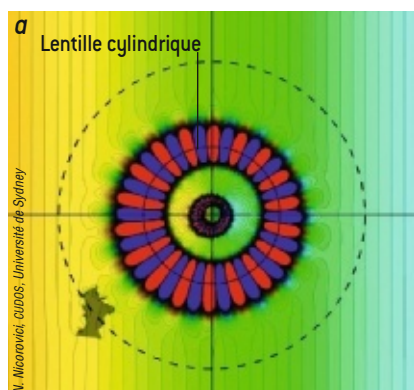
Course à la réalisation de lentilles parfaites

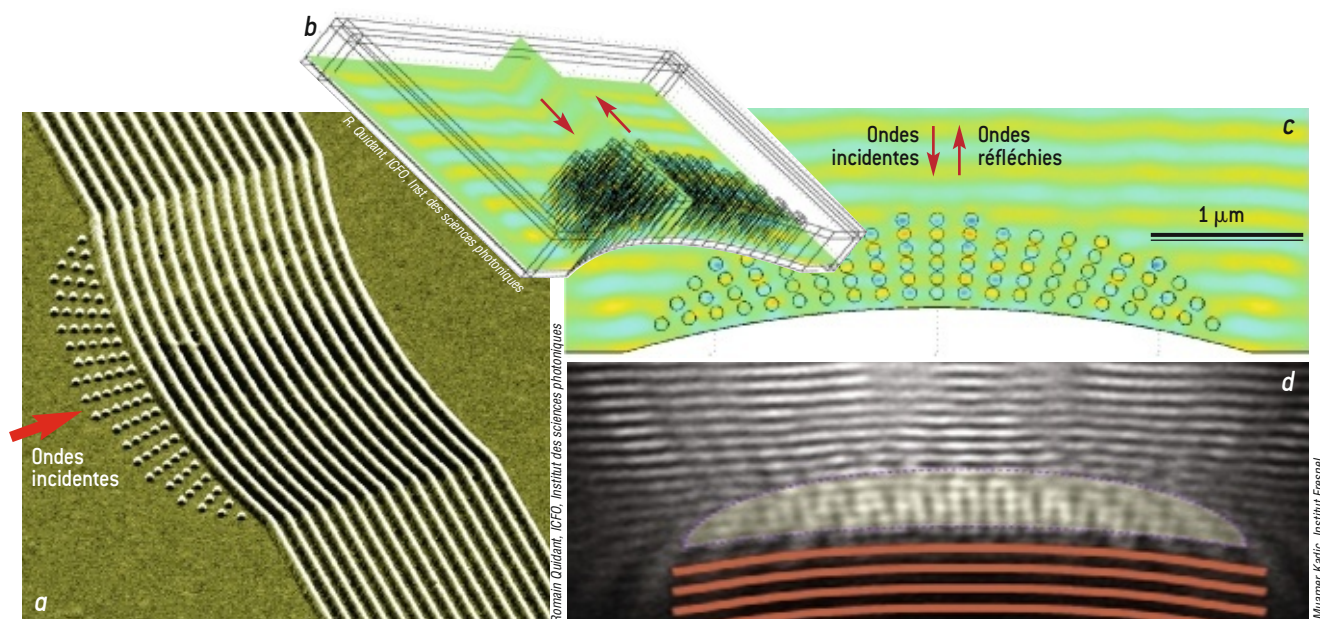
Toutefois, en 2005, l'équipe de Xiang Zhang à l'Université de Los Angeles a démontré expérimentalement une résolution supérieure à un cinquième de longueur d'onde à travers un métamatériau constitué d'un mince film d'argent pris en sandwich entre deux couches de semi-conducteur, pour une fréquence du domaine visible. Depuis lors, une course effrénée à la réalisation de lentilles parfaites s'est engagée, avec des résolutions atteignant aujourd'hui un vingtième de longueur d'onde dans le proche infrarouge.

Outre la lentille plate de V. Veselago, Nicolae Nicorovici, de l'Université de Sydney, Graeme Milton, de celle d'Utah, et l'un d'entre nous (R. McPhedran) ont proposé en 2005 un principe de lentille cylindrique produisant un nouvel effet d'invisibilité. Cette équipe a étudié le comportement insolite d'une excitation lumineuse au voisinage d'un cylindre de permittivité négative (mais pas obligatoirement d'indice négatif). Elle a montré que ce dispositif se comporte comme une lentille parfaite dont le grossissement



7. CETTE LENTILLE CYLINDRIQUE MÉTALLIQUE (à gauche, une moitié vue de l'intérieur) fonctionne par réaction, c'est-à-dire que les dipôles atomiques dont elle est formée réagissent à la présence des dipôles de l'objet d'une façon qui le rend invisible dans une certaine zone. La simulation numérique (ci-dessous) montre les champs électriques (lobes rouges et bleus) induits par cette réaction dans trois situations: quand l'objet (ici, une figurine) s'approche de la zone d'invisibilité (cercle en pointillés, a), quand elle y est (b) et quand elle en sort (c). On voit que le champ n'est pas perturbé en dehors de la zone d'invisibilité.





8. UN RÉSEAU PLASMONIQUE constitué de points gravés sur une surface métallique (a) fournit un autre exemple d'invisibilité par réaction. L'arrivée d'ondes électromagnétiques [flèche rouge] crée des ondes électroniques de surface nommées plasmons. Comme le montrent la

simulation numérique (b et c) et les mesures (d), ces plasmons absorbent l'onde incidente et, grâce aux stries gravées à l'arrière qui font office de miroir, la restituent intacte – malgré la courbure du miroir qui, en l'absence du réseau plasmonique, l'aurait déformée.

est dû à sa courbure : comme avec une lentille convexe, une image virtuelle agrandie est créée en avant de la lentille. Et elle a montré que le dispositif fonctionne aussi comme une cape d'invisibilité : sous certaines conditions (pour certaines longueurs d'onde), il réagit à la présence des champs magnétiques et des dipôles électriques atomiques d'un objet et efface ainsi le champ électromagnétique associé à ce dernier (voir la figure 7). Le principe fonctionne aussi avec tout grand ensemble de dipôles atomiques, mais à une longueur d'onde précise et pour une cape homogène de permittivité négative ou d'indice de réfraction égal à -1 .

Invisibilité par réaction

Pour comprendre cette forme d'invisibilité, on peut là encore utiliser la méthode géométrique de J. Pendry. Comme ce dernier l'a fait remarquer, considérer un indice négatif revient à replier une portion de l'espace pour la faire disparaître. Dans le cas présent, le repliement se fait vers l'extérieur, de sorte que le dipôle électrique ou la myriade de dipôles atomiques dont est formé un objet disparaissent non pas derrière cette cape d'invisibilité, mais devant... Le dispositif n'a pas encore été réalisé, mais il pourrait en principe rendre presque invisible tout objet dont la réponse électromagnétique serait analogue à celle d'un ensemble de dipôles. Sa réalisation, qui

demande un indice de réfraction proche de -1 , reste pour le moment un défi technique.

Quels types d'invisibilité avons-nous présenté à ce stade ? La cape d'invisibilité de J. Pendry et la lentille de V. Veselago sont deux cas d'invisibilité par réfraction. La première a pour effet de créer un indice de réfraction anisotrope positif (produit de la permittivité et de la perméabilité, qui sont ici deux ensembles de neuf nombres positifs) et la seconde un indice de réfraction isotrope négatif. Quant à la lentille parfaite cylindrique, supposée être caractérisée par un indice de réfraction proche de -1 , elle crée une invisibilité par réaction. Ce type d'invisibilité par réaction peut aussi être réalisé par des structures en échiquier dont les cases alternent des indices positifs et négatifs : la réaction consiste alors en la création de plasmons (des ondes électroniques de surface) qui vont absorber l'onde électromagnétique incidente, puis la restituer en arrière du dispositif, les cases d'indice négatif permettant un repliement de l'espace sur lui-même.

Nous voyons que les types d'invisibilité tendent à se multiplier et s'étendent à tous les types d'ondes. D'une manière générale, c'est l'art de la conformation à volonté du champ électromagnétique qui ne cesse de s'enrichir d'année en année. Il se fonde sur l'invariance de forme des équations fondamentales de la physique, et définit un nouveau modèle en physique des ondes : celui de la physique transformationnelle. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Nicolet, *Les capes d'invisibilité et l'optique transformationnelle, Images de la Physique 2010*, CNRS, 2010.

S. Guenneau *et al.*, *Negative refraction in 2-D checkerboards by mirror anti-symmetry and 3-D corner lenses*, *New Journal of Physics*, vol. 7, p. 164, 2005.

F. Zolla *et al.*, *Electromagnetic analysis of cylindrical invisibility cloaks and the mirage effect*, *Optics Letters*, vol. 32, pp. 1069-1072, 2007.

J. Pendry *et al.*, *Controlling electromagnetic fields*, *Science*, vol. 312, pp. 1780-1782, 2006.

Ulf Leonhardt et Thomas Philbin, *Geometry and Light : The Science of Invisibility*, Dover publication, 2010.

A. Alu et N. Engheta, *Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings*, *Physical Review E*, vol. 72, 016623, 2005.

Michel Campillo

Ce bruit sismique qui sonde la Terre

L'analyse mathématique du simple bruit sismique améliore la cartographie des structures géologiques souterraines et permet, pour la première fois, d'étudier l'évolution de ces structures au cours du temps.

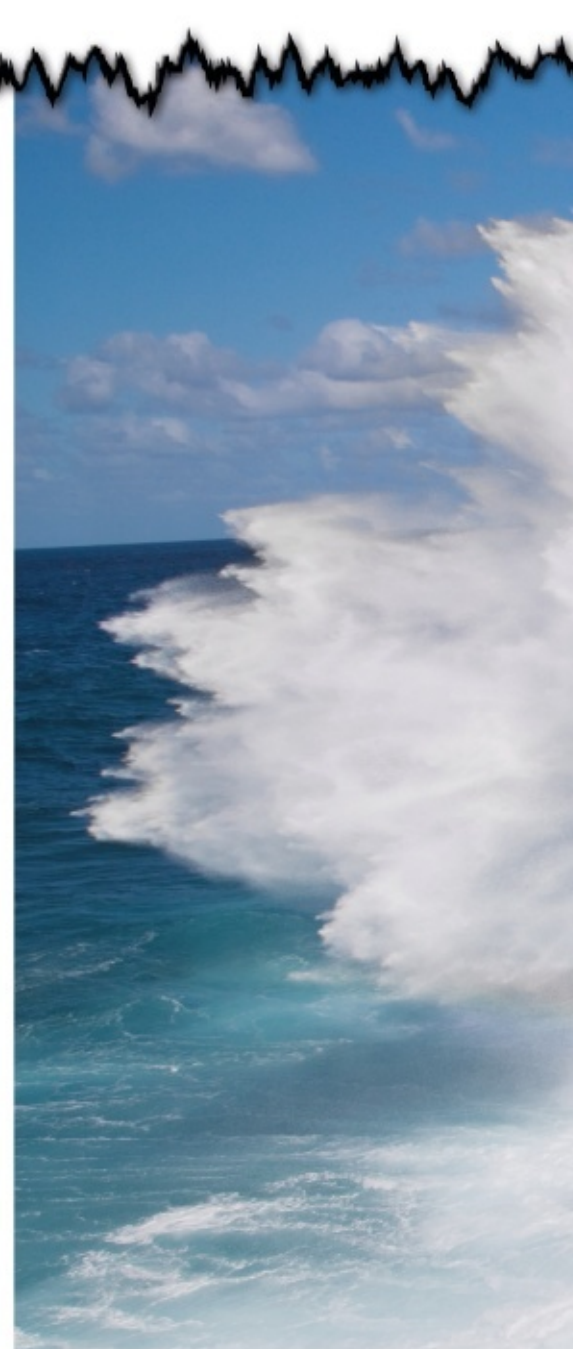
Une « lumière » éclaire l'intérieur de la Terre : les ondes sismiques. Les sismologues savent mettre en images la structure du monde souterrain à partir de ces vibrations qui se propagent dans les profondeurs du sol. Ils exploitent pour cela les ondes émises par les tremblements de terre ou des sources artificielles comme des explosions. Toutefois, cette imagerie sismique active ne se pratique que dans certaines zones, ou seulement à petite échelle et à certains moments.

C'est pourquoi les géophysiciens cherchent à utiliser aussi le « bruit » sismique qui agite faiblement, mais sans cesse, l'intérieur de la Terre. Il provient pour l'essentiel des microséismes dus aux interactions des mers avec la croûte terrestre (voir la figure 1). Judicieusement exploités, des enregistrements assez longs de ce bruit révèlent la structure souterraine. Après avoir expliqué comment, nous présenterons quelques-unes des premières applications géologiques de

cette méthode, notamment la recherche de signes avant-coureurs des séismes et des éruptions.

Les ondes sismiques sont un cas particulier d'ondes élastiques au sein des solides (voir la figure 2). Il en existe deux principaux types : les ondes P qui sont des ondes de compression, et les ondes S qui sont des ondes de cisaillement (la vibration est transversale à la propagation). Ces ondes dites de volume se combinent pour donner en surface des ondes, qui peuvent être soit des ondes de Love ou L (des ondes S guidées dans les couches superficielles) ou des ondes de Rayleigh ou R (dont les caractéristiques évoquent celles des vagues sur la mer).

Les ondes sismiques ont d'abord été utilisées pour faire de l'imagerie sismique active. Comparables à celles de l'imagerie médicale, les méthodes pour ce faire se fondent sur la mesure des temps de parcours d'ondes dans le terrain étudié. Ainsi, on parle de tomographie sis-



mique lorsqu'on utilise des ondes ayant traversé un volume souterrain pour reconstituer et cartographier les zones de propagation à forte ou à faible vitesse.

L'imagerie active à ses limites

Pour sa part, la « sismique réflexion » est le pendant de l'échographie : on y exploite les échos dus aux interfaces des couches géologiques pour reconstituer précisément leurs formes. On doit à ces méthodes la découverte de la structure de la Terre en couches concentriques, puis celle des variations latérales de vitesses de propagation au sein de ces couches, qui trahissent les mouvements de convection à l'origine de la tectonique des plaques.

À plus petite échelle, les ondes sismiques sont aussi au service de la prospec-

tion d'hydrocarbures. La mise en évidence de lits de rivières ayant coulé il y a plusieurs dizaines de millions d'années, ou encore celle de cratères d'impacts enterrés sous plusieurs kilomètres de sédiments marins, est un spectaculaire sous-produit de la sismique réflexion pétrolière. Ces prouesses ne sont pas sans prix ni peines : il faut mettre en œuvre des centaines, voire des milliers, de sources et de capteurs. Seuls des objectifs économiques rendent possibles pareilles explorations, et tant leurs résultats que leurs retombées se limitent donc à des cibles particulières. Il est en outre difficile de les répéter, de sorte qu'elles ne permettent d'étudier l'évolution du sous-sol dans le temps qu'à grands coûts.

À ces limitations pratiques de l'imagerie sismique active s'ajoutent celles qui pèsent sur le recueil des données associées aux séismes. Les mesures utiles à l'étude

de la structure profonde de la planète sont les enregistrements des séismes de magnitude 5 ou plus. La compilation des temps d'arrivée des ondes a produit des modèles moyens des régions géologiques du globe, qui ont ensuite été précisés. Ce travail de précision a été rendu possible par le développement des réseaux de stations sismologiques, mais souffre de limites indépassables : rareté des mesures sur l'océan, qui couvre pourtant la plus grande partie du globe, limitations imposées sur le déroulement du travail à terre par les guerres et les conflits intérieurs, etc.

1. LES CHOCS DES VAGUES sur la côte ou le plateau océanique sont à l'origine d'un bruit sismique permanent. À cela s'ajoute le bruit engendré par les affrontements de trains de houle océanique qui, en mettant toute la colonne d'eau en vibration, font aussi trembler le fond.

L'ESSENTIEL

- ✓ Les océans émettent sans cesse des signaux sismiques, non seulement près des continents, mais aussi en profondeur.
- ✓ Comparable à une lueur qui éclaire l'intérieur de la Terre, ce bruit sismique peut être traduit en images des structures géologiques n'importe où sur le globe.
- ✓ Pour la première fois, il devient aussi possible de suivre dans le temps les phénomènes géologiques, voire de les prévoir.



Michel CAMPILLO, sismologue, est professeur à l'Université Joseph Fourier, à Grenoble, où il effectue ses recherches à l'Institut des sciences de la Terre. Il est aussi membre de l'Institut universitaire de France.

Ces limites liées à l'homme pourront sans doute être dépassées un jour, mais il existe un obstacle géologique infranchissable : les séismes ne sont pas répartis partout, mais sont concentrés sur quelques grandes failles et dans les zones de subduction, ces régions où des plaques océaniques plongent dans le manteau. Et disposer des sources artificielles d'énergies comparables à celles de séismes n'est pas envisageable, car il faudrait déclencher des explosions thermonucléaires pour atteindre les énergies nécessaires...

Les limites de l'imagerie sismique active poussent les sismologues à rechercher une autre façon d'obtenir les temps de parcours des ondes sismiques au sein des terrains géologiques : c'est pour cette raison qu'est née l'imagerie sismique passive. De quoi s'agit-il ?

Mesurer la corrélation entre deux points

À la base des méthodes d'imagerie sismique passive se trouve l'idée que les vibrations observées en deux points distants ne sont pas indépendantes. Au sein de la Terre, tout phénomène à l'origine d'ondes élastiques émet de l'énergie vibratoire dans toutes les directions. Ainsi, de même que l'on parvient à détecter les vibrations du sol lorsqu'un séisme se produit à des milliers de kilomètres, une petite vibration produit des microsignaux sismiques partout au sein de la Terre. Mesurés en deux points différents, ces signaux seront décalés temporellement, mais liés au même événement.

En calculant une certaine fonction $C(\tau)$ de leur décalage temporel τ , on peut faire apparaître ce lien. Cette fonction – la fonction de corrélation – est définie comme la moyenne temporelle du produit des deux signaux, l'un pris en un instant t et l'autre en cet instant décalé de τ , c'est-à-dire pris à l'instant $t - \tau$ (voir l'encadré page 67). En l'absence de lien entre deux signaux et un même événement, la fonction de corrélation est nulle ; en présence d'un lien, elle sera non nulle pour tous les décalages τ pour lesquels ce lien existe. C'est cette corrélation entre les signaux provenant d'une même source – même microscopique – que l'on exploite en imagerie sismique passive, méthode qui fut introduite en héliosismologie et en acoustique ultrasonore.

Comment ? Pour le saisir, le mieux est de se pencher sur un théorème démon-

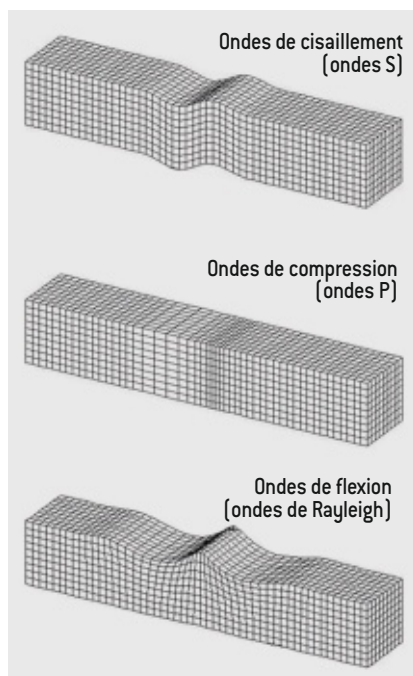
tré par Yves Colin de Verdière pour expliquer le succès de la méthode. Ce mathématicien de l'Université de Grenoble s'est intéressé à la fonction de corrélation des signaux parvenus en deux points A et B depuis une infinité de sources sismiques aléatoires réparties de façon homogène au sein d'un solide élastique de géométrie quelconque. Il a montré que la fonction de corrélation est égale au signal reçu directement en B si une seule source ponctuelle se trouve en A. Un résultat étonnant, qui explique la généralité de la méthode de corrélation de bruit.

A priori, ce théorème semble peu utile, car il faudrait avoir dans la Terre une infinité de microsources sismiques. Pourtant, nous allons voir qu'il s'applique approximativement. Avec Nicolas Shapiro, aujourd'hui à l'Institut de physique du Globe de Paris, nous avons démontré en 2004 que des signaux enregistrés par des capteurs séparés de plusieurs milliers de kilomètres sont corrélés. Cela nous a permis de mesurer le temps que durerait le trajet d'une onde sismique émise en l'une des stations. À partir de là, il devenait clair que le résultat purement mathématique de Y. Colin de Verdière peut s'appliquer même si ses prérequis ne sont pas parfaitement réalisés. Examinons pourquoi.

La Terre n'est certes pas remplie uniformément de microsources sismiques s'activant aléatoirement. Pour autant, si l'on exploite la gamme des périodes vibratoires allant de 5 à 50 secondes, que les sismologues qualifient de microsismiques, on peut se rapprocher de la situation imaginée par Y. Colin de Verdière. Comme tous les bruits, le bruit microsismique est un signal constitué d'un mélange incohérent d'ondes sismiques de longueurs d'onde différentes.

Aux hautes fréquences, de nombreuses sources produisent du bruit. C'est particulièrement le cas des activités humaines, mais elles ont un caractère très local. Deux sources régulières de bruit microsismique existent toutefois, toutes les deux ressenties à grande distance et toutes les deux d'origine maritime.

Depuis plus d'un siècle, en effet, les sismologues se sont aperçus qu'ils enregistraient les impacts successifs de la houle sur le plateau continental et les côtes. Particulièrement fort durant les tempêtes, le bruit ainsi émis dans le sol est caractérisé par une période d'environ 15 secondes. Outre ce phénomène, il arrive que des trains de houle produits dans des régions



2. LES ONDES SISMIQUES apparaissent sous quatre formes. Les ondes S et les ondes P, qui se propagent en profondeur, se combinent pour former en surface des ondes de flexion nommées ondes de Rayleigh et des ondes de cisaillement, les ondes de Love. Pour faire de l'imagerie, les sismologues enregistrent les ondes S, les ondes P et les ondes de Rayleigh.

différentes se rencontrent en mer. Leurs interactions produisent une agitation de forme indistincte, mais qui se caractérise par une fréquence double, donc une période de l'ordre de sept à huit secondes. Ce clapot a pour effet de mettre en vibration toute la colonne d'eau au-dessus de laquelle il se produit. En fonction de la hauteur de celle-ci, il arrive fréquemment que s'installe en outre un phénomène de résonance, qui transforme la colonne d'eau en une sorte de « trompette sismique » émettant dans le sol marin un bruit océanique caractéristique.

On dispose ainsi de sources sismiques susceptibles d'apparaître aléatoirement sur la plus grande partie de la planète

(les océans). Pour autant, les tempêtes ou les affrontements de houles ne sont pas assez fréquents pour couvrir complètement et efficacement la Terre. Heureusement, notre planète multiplie l'efficacité de ces sources microsismiques grâce aux propriétés diffusives de sa structure interne.

La Terre, et surtout sa croûte, est loin d'être homogène. Comme le suggère l'observation en montagne de grandes tranches de terrain, elle est faite de mélanges plus ou moins fins de roches et de sédiments, souvent disposés en couches disloquées par des failles, plissées et décalées, traversées de cheminées volcaniques, etc. Bref, la croûte est très hétérogène. Toutes ces sous-structures diffractent les ondes

élastiques et leur font parcourir des chemins si longs et si complexes (voir la figure 3) qu'une partie du champ d'onde devient diffus.

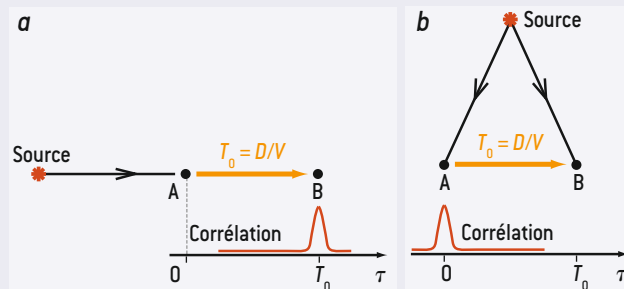
Ce caractère diffusif du sous-sol est un atout pour la méthode des corrélations, puisqu'il crée l'équivalent d'une multitude de sources sismiques secondaires aléatoires (émettant erratiquement) et réparties de façon grossièrement homogène. Ainsi, même si les conditions du théorème de Y. Colin de Verdière ne sont pas parfaitement réalisées, l'expérience montre que les résultats obtenus en l'appliquant quand même sont bons. C'est ce que nous avons montré dès 2001 : en utilisant la partie tardive des sismogrammes (ce que l'on

L'EXPLOITATION DU BRUIT SISMIQUE PAR CORRÉLATION

L'exploitation du bruit sismique repose sur la corrélation des signaux vibratoires $u(t)$ et $v(t)$ reçus en deux points A et B. La fonction de corrélation entre u et v dépend d'une variable τ qui s'interprète comme le décalage temporel entre les deux signaux. Cette fonction $C_{u,v}(\tau)$ est définie par la moyenne temporelle du produit $u(t)v(t-\tau)$:

$$C_{u,v}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(t)v(t-\tau) dt$$

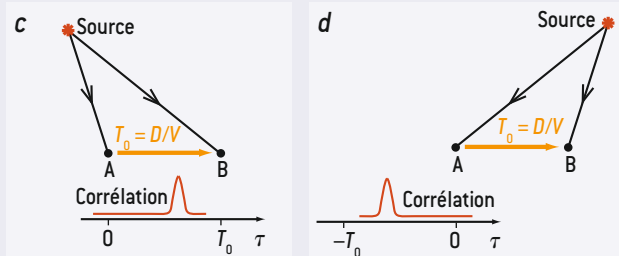
Afin de saisir la signification de cette fonction, traçons-la (en orange) dans quelques cas. On convient ici que l'origine $\tau = 0$ de l'axe des τ est l'instant d'arrivée du signal en A et qu'elle sera donc placée sous ce point, tandis que la valeur de τ correspondant au temps de propagation de A à B, qui vaut $T_0 = D/V$ (D étant la distance AB et V la vitesse des ondes, ici constante), sera placée sous B. Commençons par le cas (a) où une unique source émettant pendant un temps bref mais supérieur à T_0 se trouve dans l'alignement de A et B, puis par le cas (b) où la source est sur leur médiane.



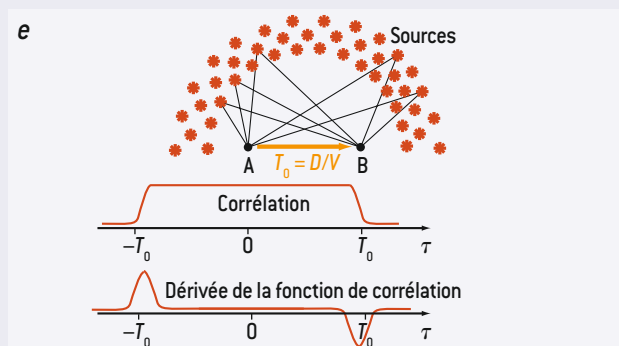
Dans le premier cas (a), la corrélation entre les deux signaux est centrée sur le décalage τ égal à T_0 , ce décalage étant le temps nécessaire pour que les signaux aillent de A à B. Dans le second cas, l'arrivée des signaux est simultanée en A et B, de sorte que la corrélation est centrée sur $\tau = 0$.

Considérons maintenant les cas plus généraux où la source se trouve à gauche de A ou à droite de B. Dans le premier cas (c), la corrélation est centrée sur un instant compris entre 0 et T_0 , car le signal, une fois parvenu en A, n'est pas encore arrivé en B, point qu'il atteindra en un temps inférieur à T_0 . À l'inverse, dans le second cas (d), le signal atteint B avant d'avoir atteint A, donc pour un τ négatif supérieur à $-T_0$.

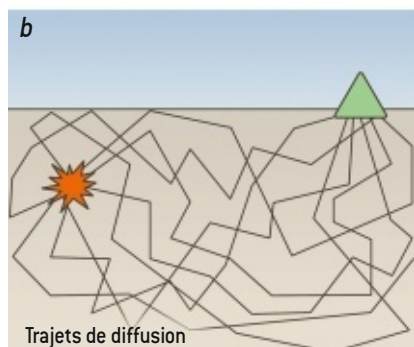
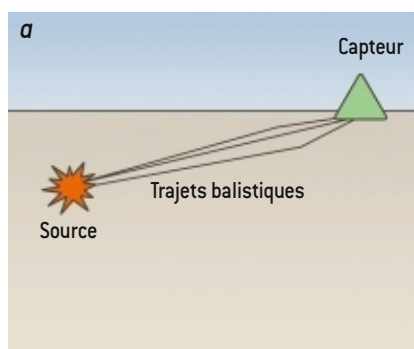
À partir de ces cas particuliers, on peut comprendre que si l'on a une infinité de sources distribuées de façon uniforme (e), chacune va



contribuer à la fonction de corrélation selon les schémas indiqués, ce qui, au total, construit une fonction qui présente un plateau entre les valeurs $-T_0$ et T_0 de τ . En dérivant cette fonction de corrélation, on obtient alors une fonction qui a deux pics : l'un en $-T_0$, l'autre en T_0 . Cela détermine T_0 et, connaissant la distance AB, on en déduit aisément la vitesse de propagation entre A et B, qui est bien la grandeur que l'on veut mesurer dans une expérience de sismique active.



C'est le sismologue grenoblois Philippe Roux qui a montré que dans ce cas simple (répartition uniforme des sources, vitesse constante), la fonction de corrélation donne exactement le résultat que l'on mesurerait en B si une source ponctuelle se trouvait en A. Pour sa part, Yves Colin de Verdière a généralisé à des milieux complexes quelconques ce résultat simple. Son théorème explique pourquoi la méthode de corrélation de bruit livre une très bonne approximation du signal d'expériences de sismique active (séisme en A, mesuré en B), que l'on réalisera virtuellement en autant de points A et B que l'on voudra, placés aux endroits souhaités.



3. LE PARCOURS DES ONDES SISMQUES est très variable. La plus grande partie de l'énergie d'un séisme se propage par la trajectoire balistique (la plus courte) de la source jusqu'à une station de mesure (a). Mais une fraction du signal est diffusée de très nombreuses fois par les interfaces et autres discontinuités de la densité à l'intérieur de la Terre (b). En pratique, chaque centre de diffusion joue le même rôle qu'une source secondaire émettant de l'énergie, faiblement et de façon aléatoire, directement vers la station sismique.

nomme la coda), ma collègue Anne Paul et moi avons pour la première fois reconstitué par corrélation le signal d'une expérience de sismique active entre deux stations.

Pour récapituler, la méthode de corrélation permet d'extraire du bruit sismique, avec une bonne approximation, les sismogrammes qui seraient mesurés en des points choisis si l'on déclenchait à volonté des séismes en une série d'autres points.

Une méthode puissante et répétable

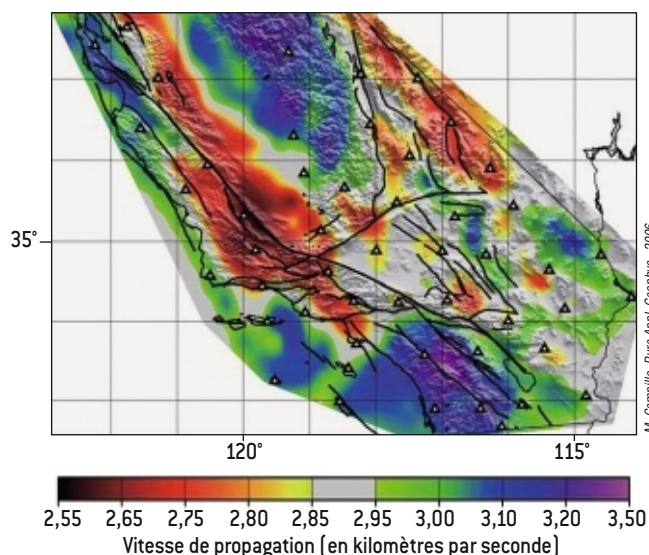
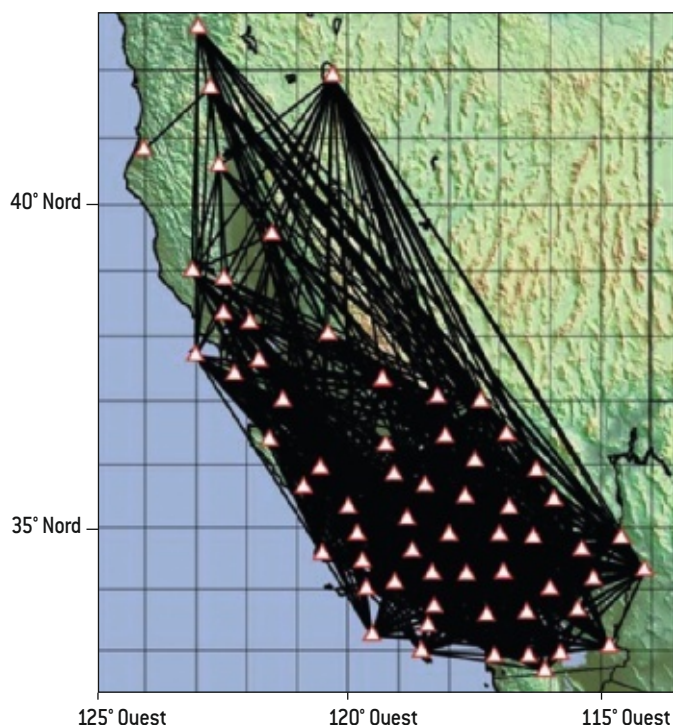
Chose remarquable, on voit qu'en imagerie sismique passive, la géométrie du dispositif (l'emplacement des sources fictives et des stations de mesure) est maîtrisable à volonté. L'exploitation du bruit sismique offre donc la possibilité de mener des expériences sismiques directes entre des paires de points choisis comme on le souhaite, ce qui rend possible l'étude de régions où les séismes sont très rares. Pour appliquer la méthode, on exploite les signaux recueillis par des stations sismologiques sur une durée assez longue pour accumuler les effets des tempêtes et autres effets de houle sur tout le globe, soit typiquement pendant plusieurs mois.

Cela finit par représenter d'énormes masses de données. Le développement de l'imagerie sismique passive doit donc beaucoup aux nouvelles possibilités

de stockage de données et de calculs apparues au cours des années 1990. Lorsque nous avons voulu appliquer la méthode de corrélation pour la première fois, les masses de données que nous avons demandées à nos collègues américains du centre de données IRIS étaient si énormes qu'ils en furent surpris. Le résultat obtenu les rassura sur l'utilité de leurs efforts...

Une fois obtenus à partir des corrélations du bruit sismique, les signaux associés à des paires de points peuvent être exploités par les méthodes habituelles de façon à produire la carte des vitesses de propagation, dont on déduit la carte géologique. Dans la plupart des cas, ce sont les ondes de Rayleigh (voir la figure 2) que l'on exploite. Ces ondes se propagent en surface et sont évanescentes en profondeur, c'est-à-dire que leur intensité décroît exponentiellement à partir de la surface. Toutefois, à chaque longueur d'onde correspond une profondeur caractéristique de pénétration (typiquement le tiers de la longueur d'onde) où l'intensité de l'onde est divisée par deux. Par exemple, les ondes de Rayleigh d'une vitesse de l'ordre de trois kilomètres par seconde et ayant une période de 20 secondes pénètrent sur une vingtaine de kilomètres. Elles portent donc l'information sur les propriétés des couches jusqu'à cette profondeur.

En accumulant les résultats pour toute une série de périodes, on explore ainsi les



4. CETTE CARTE GÉOLOGIQUE DE LA CALIFORNIE a été obtenue en exploitant le bruit sismique. À gauche, les 1891 trajets balistiques reliant les 62 stations sismiques californiennes utilisées. À droite, la carte des vitesses de propagation dans la région. Établie deux fois à un mois d'intervalle, cette carte a révélé à quel rythme les tensions provoquées (en rouge) par un grand séisme se dissipent.

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).

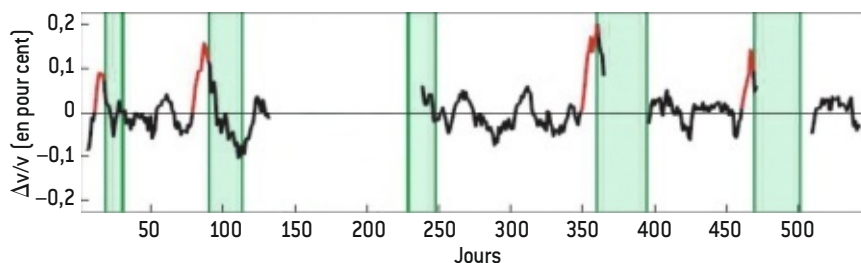
Du bruit sismique enfin rendu utile

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.

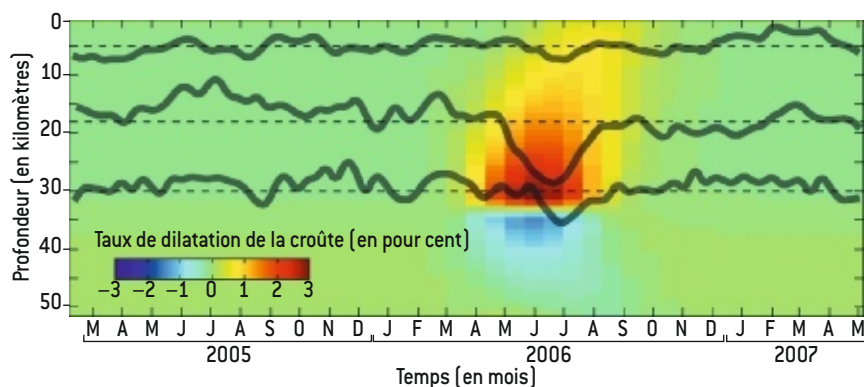
la vitesse des ondes sismiques –souvent la seule grandeur observable directement – est le principal indicateur de l'état des roches. Ainsi, beaucoup de descriptions de l'état physique des roches en profondeur (température, teneur en eau, etc.) sont en fait déduites des cartographies des vitesses sismiques. 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.

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 thermoélasticité, 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. ■

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-

✓ 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.

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Dossier Pour la Science

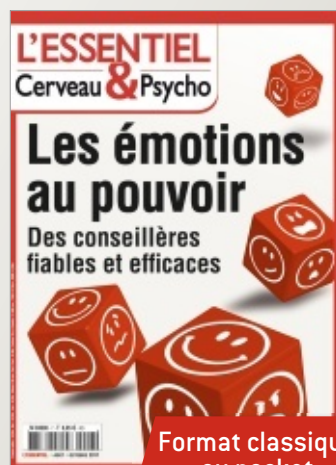
Découvrir la chimie qui régule les écosystèmes ou la vie autour des sources hydrothermales des abysses ; exploiter de façon raisonnée la richesse des fonds marins (microalgues, ressources minérales, méthane...) ; découvrir des médicaments nouveaux ; protéger les mers contre les marées noires ou les déchets 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.

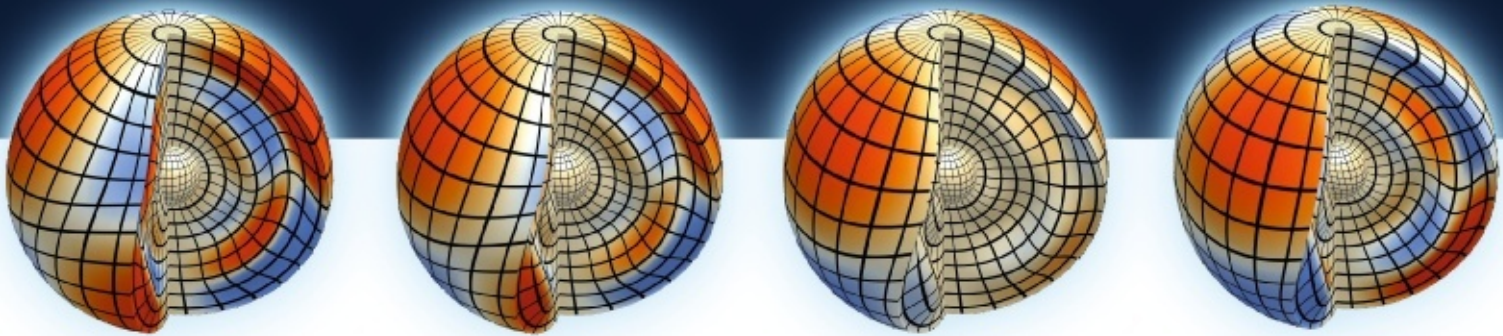
À lire aussi : les liens entre grands-parents et petits-enfants, des gaz dans le cerveau, et bien d'autres sujets.

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-