N° 461 • 6,20€ FÉVRIER 2012

LA Recherche

L'actualité des sciences

LA RECHERCHE

MENSUEL DOM 6,70 € BEL 7,20 € LUX 7,20 € D 7,90 € ESP 7,20 € GR 7,20 € ITA 7,20 € PORT.CONT 7,20 € CAN 9,75 $ CAN CH 12,40 FS MAR 60 DH TUN 6,10 TND MAYOTTE 8,70 € TOM SURFACE 920 XPF TOM AVION 1600 XPS - ISSN 0029567 11

LA PHYSIQUE DE L'INVISIBLE

Comment les physiciens font disparaître l'espace et le temps

SIDA Les premières minutes de l'infection

Débat **Faut-il dépénaliser les drogues ?**

M 01108 - 461 - F: 6,20 €

2 • SÉBASTIEN GUENNEAU : « Déformer les ondes pour mieux les contrôler »

Entretien Dans le sillage de la quête de l'invisibilité et de la maîtrise de la propagation de la lumière, un vaste domaine de recherche s'est ouvert : celui du contrôle des ondes, quelle que soit leur nature.

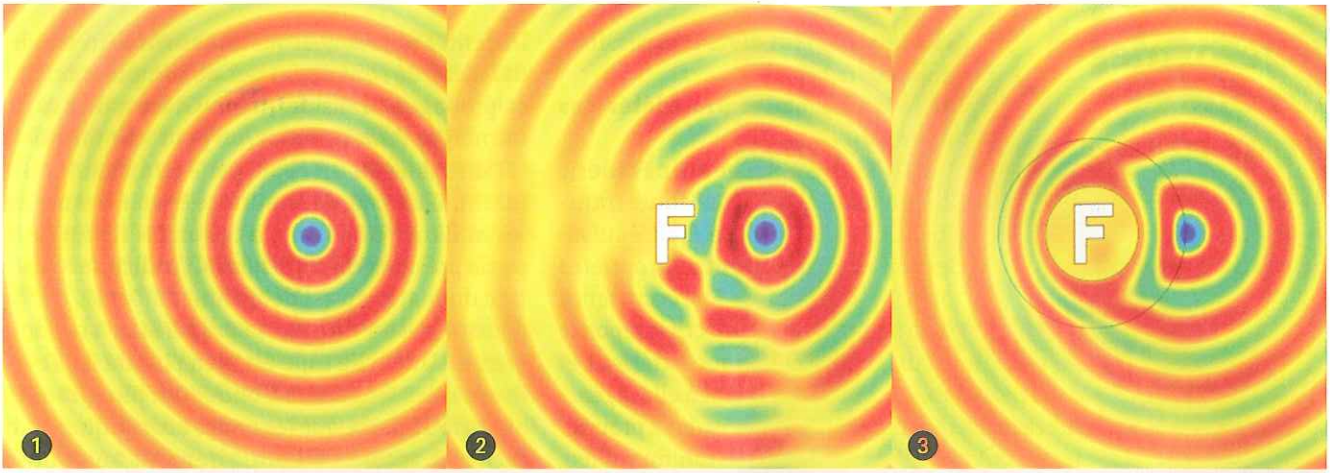
LA RECHERCHE : En 2006, on annonçait la création d'une vraie cape d'invisibilité dans les cinq ans. En 2012, malgré de nombreuses avancées, la fameuse cape n'existe toujours pas ?

SÉBASTIEN GUENNEAU : Il faut distinguer deux concepts : la cape et le tapis d'invisibilité. La première est encore du registre de la science-fiction, et l'autre vient d'être réalisé. Puisqu'en 2011, John Pendry, l'un des pionniers du domaine, et ses collaborateurs de l'Imperial College à Londres avec une équipe de l'université de Birmingham sont parvenus à cacher un objet macroscopique pour des longueurs d'ondes dans le domaine visible. Et ce, grâce à un matériau naturel, la calcite, aux propriétés optiques un peu particulières. De manière générale, les avancées les plus spectaculaires de ces dernières années dans la conception des matériaux synthétiques concernent le concept de tapis (lire « Les dessous de la cape d'invisibilité », p. 40).

En quoi diffèrent ces deux concepts ?

S.G. La cape implique la transparence complète : lorsqu'elle couvre un objet situé entre deux observateurs, celui-ci disparaît à leurs yeux. Elle doit forcer un faisceau lumineux incident à contourner la zone qu'elle protège, ce qui signifie que la vitesse de la lumière dans l'épaisseur de cette cape tende vers l'infini ! Le tapis, lui, consiste à cacher un objet situé devant une surface plane : grâce à ce tapis, la réflexion de la lumière sur cette surface n'est pas modifiée par la présence de l'objet. Normalement, une surface qui n'est pas plate renvoie la lumière dans plusieurs directions. Le principe cette fois

© TANJA PUVIRAJESINGHE - REMERCIEMENTS À PIERRE VASARELY POUR L'AUTORISATION DE PUBLICATION DE « VP HOST »



Cette simulation numérique décrit la propagation d'ondes électromagnétiques produites au point bleu (1). En présence d'un objet conducteur (F), ces ondes sont diffractées : l'objet est « vu » par les ondes (2). Grâce à la cape d'invisibilité, la zone située entre les deux cercles noirs, les ondes évitent la région centrale jaune et ne sont pas déformées à la sortie de la cape (3). © SÉBASTIEN GUENNEAU

est donc de faire varier la vitesse de la lumière pour qu'à la sortie, le front d'onde de réflexion soit le plus planaire possible, au lieu d'être distordu par la présence de l'objet. Dans ce cas de figure, on fait ralentir la lumière, donc il n'y a plus le paradoxe du dépassement de la vitesse de la lumière.

Comment connaît-on les propriétés que doivent posséder les matériaux qui constituent ces tapis ?

S.G. C'est là où l'histoire des recherches sur l'invisibilité est très intéressante. Car elle illustre comment des travaux très fondamentaux sur la propagation des ondes, appliqués à des problèmes concrets que se posent des industriels, ont fait naître tout un domaine de recherche, une nouvelle façon de concevoir des dispositifs optiques que l'on appelle aujourd'hui l'optique transformationnelle. À la fin des années 1990, nous travaillions à l'institut Fresnel sur la théorie de la propagation dans des guides d'ondes. Des industriels des télécommunications nous ont soumis un problème. Ils voulaient utiliser une nouvelle génération de fibres optiques – des guides d'ondes –, dites microstructurées, pour transmettre des signaux lumineux et s'interrogeaient sur la distance à prévoir entre les répétiteurs nécessaires pour amplifier le signal qui s'atténue régulièrement. À 100 000 euros le répétiteur, la question a un intérêt économique évident. Pour y répondre, il fallait réussir à calculer la décroissance de l'onde dans l'axe du guide mais aussi dans le plan transverse dans lequel elle perd également de l'énergie. Problème difficile, car la lumière se propage dans un espace infini !

Comment s'en sort-on ?

S.G. C'est André Nicolet qui a apporté une solution en développant une nouvelle approche numérique, s'inspirant d'outils mathématiques jusque-là peu employés en optique, qu'il avait mis au point quand il était encore à l'université de Liège, en Belgique. Cette approche consiste à réaliser une transformation géométrique de l'espace, qui ramène sur un disque tout ce qui se propage à l'infini : on peut alors faire des calculs. Ces nouveaux outils ont été fondamentaux dans la cape d'invisibilité proposée par John Pendry en 2006. Il cherchait, lui, à convertir un disque en un disque évidé dont la partie évidée deviendrait invisible aux ondes. Toute l'idée de l'invisibilité est là : si l'on déforme une région de l'espace on déforme aussi le trajet des rayons de lumière qui la traversent. Ce faisant, si on s'arrange pour que ces rayons évitent une zone, tout ce qui se trouve dans cette zone >>>

Sébastien Guenneau
est chargé de recherche au CNRS, à l'institut Fresnel de Aix-Marseille-Université.

L'essentiel

> **UNE NOUVELLE FAÇON** de concevoir des dispositifs optiques, née de travaux très fondamentaux, a ouvert la voie aux recherches sur l'invisibilité.

> **TOUTE L'APPROCHE** repose sur une idée centrale : quand on déforme une région de l'espace, on déforme aussi le trajet des rayons de lumière qui la traversent.

> **LA CAPE D'INVISIBILITÉ** peut être déclinée pour d'autres types d'ondes que la lumière, en particulier certaines ondes mécaniques.

« Déformer les ondes pour mieux les contrôler »

Entretien avec Sébastien Guenneau

*UNE VAGUE SCÉLÉRATE est une vague anormalement démesurée, d'une amplitude inattendue et responsable de nombreux accidents en mer.

>>> leur devient alors inaccessible, donc invisible.

Et le lien avec les propriétés des matériaux ?

S.G. André Nicolet avec Fréderic Zolla a montré aussi que toute transformation de l'espace était équivalente à un changement de propriétés physiques du milieu. En l'occurrence de la permittivité, qui décrit la réponse du matériau à un champ électrique extérieur et de la perméabilité, qui décrit quant à elle la réaction à un champ magnétique. Or ces deux propriétés définissent l'indice de réfraction du milieu. Et c'était tout le problème de la cape décrite par John Pendry en 2006, dont l'indice de réfraction n'existe pas dans les matériaux naturels. La balle est alors passée dans le camp des spécialistes de nanotechnologie qui ont cherché à réaliser un matériau composite, un métamatériau, approchant au plus près ce matériau théorique.

Jusqu'ici la quête de ce métamatériau n'a rien donné pour les longueurs d'onde du visible. Pensez-vous qu'on y parvienne ?

S.G. Non, c'est pour cela que je parlais de science-fiction concernant la cape. C'est quasi impossible car, à ces longueurs d'onde de quelques centaines de nanomètres, les métamatériaux sont très absorbants. L'amplitude du champ électromagnétique passant à travers la cape est fortement réduite. Au lieu d'être vraiment transparente, la cape est donc opaque, et l'observateur voit une zone d'ombre.

Le concept de cape peut-il être décliné à d'autres types d'ondes ?

S.G. Oui, et c'est un domaine très actif actuellement. Les ondes acoustiques sont un candidat idéal. Ce sont des ondes de compression qui se propagent dans un fluide. Grâce à une cape, immergée dans ce fluide, on peut leur faire éviter une zone ou un objet, par exemple un sous-marin. Si un bateau en surface envoie des ondes sonar dans l'eau, l'écho à ces ondes ne révélera pas la présence du sous-marin. L'indice de réfraction du matériau est déterminé cette fois par sa densité, c'est-à-dire par sa propension à se compresser. Une telle cape est bien plus facile à réaliser car les longueurs d'onde sont plus grandes et, surtout, parce que les ondes acoustiques sont faciles à accélérer. Contrairement aux ondes optiques qui ne peuvent dépasser la vitesse de la lumière dans le vide.

Étant donné les enjeux, on imagine que ces recherches intéressent les militaires ?

S.G. L'équipe de l'Imperial College, groupe phare en la matière, fait partie d'un consortium de la Darpa, organisme de recherche du Pentagone, avec le MIT à Boston, l'université de Berkeley et l'université de Californie à Los Angeles. Et aux États-Unis des brevets ont déjà été déposés. En France, la recherche est axée sur des problèmes plus académiques et sur des questions liées à des applications civiles. Nous travaillons par exemple avec Stefan Enoch, à l'institut Fresnel, sur des projets de cape antitsunami et de cape antisismique qui sont financés à hauteur de 1,3 million d'euros par l'Union européenne.

De quoi s'agit-il ?

S.G. Ces projets peuvent paraître un peu fous. Mais pour se protéger des vagues d'un tsunami créées par un déplacement du sol sous la mer au large des côtes on peut imaginer une chape,

Principe d'équivalence

À la fin des années 1990, Frédéric Zolla et ses collègues de l'institut Fresnel travaillent sur des guides d'ondes, des fibres optiques microstructurées. On les fabrique en enroulant un assemblage de microfibres : ce processus génère une microtorsion du matériau un peu comme dans un brin torsadé dont le motif de torsion se répète régulièrement : comment prendre en compte cette torsion du matériau dans la propagation de la lumière ? L'équipe marseillaise applique alors la méthode numérique développée par André Nicolet. Et elle montre qu'en adoptant un repère géométrique tournant, qui suit la torsion, tout se passe comme si le matériau n'était pas torsadé. Grâce à ce cas d'école, ces chercheurs viennent de montrer une équivalence entre une transformation géométrique et un changement de matériau. Ainsi, jouer sur la transformation géométrique revient à changer les caractéristiques optiques du matériau. C'est cette idée qui sous-tend ce que l'on appelle aujourd'hui l'« optique transformationnelle ».

Microfibres initiales

Fibre optique microstructurée

© DR

de 200 mètres de diamètre, constituée d'anneaux concentriques qui guide ces ondes autour d'une zone à protéger. Celles-ci pourraient ainsi être détournées des fondations d'un gratte-ciel, d'un hôpital, d'un aéroport, voire d'une centrale nucléaire en bord de mer. On peut aussi envisager de détourner les vagues scélérates* autour des plates-formes pétrolières offshore.

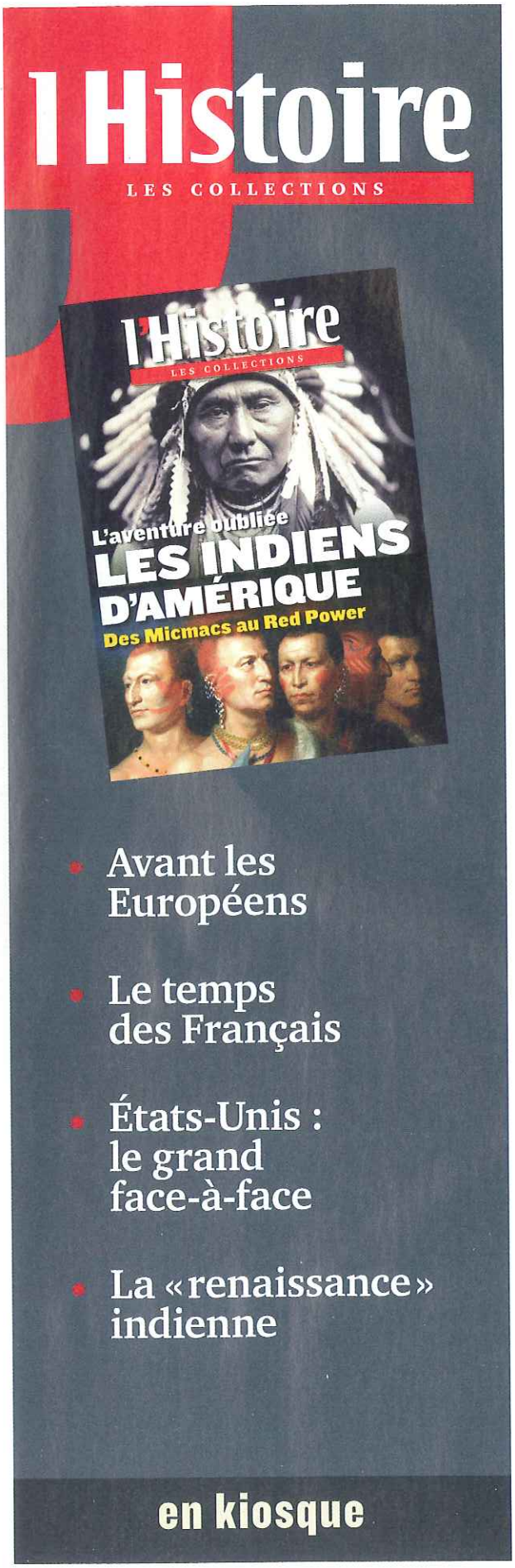
Et la cape antisismique ?

S.G. L'objectif est aussi de détourner les ondes sismiques les plus destructrices de la zone où se trouvent les fondations d'un immeuble ou de toute installation que l'on voudrait protéger. En 2012, nous allons réaliser un premier test grandeur nature d'idées que nous avons déjà publiées. L'expérience menée par la société Ménard, une filiale de Vinci, consistera à créer un microséisme en lâchant une cloche de 35 tonnes en chute libre d'une hauteur de 30 mètres. En percutant le sol, elle provoquera une déflagration, dite onde de Rayleigh, qui se propage sur plusieurs dizaines de mètres. Normalement, les ondes de surface se propagent dans toutes les directions. Mais on peut essayer de contrôler la direction de l'onde sismique en la refocalisant un peu plus loin. Pour ce faire, la société Ménard construit une structure – un métamatériau – de 5 000 mètres carrés en agençant des colonnes de béton armé de manière judicieuse dans le sol. Si ce test fonctionne, alors on pourra imaginer de vraies chapes de terrassement antisismique.

Le trait commun à tous ces projets est donc d'agir sur la propagation des ondes, quel que soit leur type ?

S.G. Oui, nous pouvons utiliser la boîte à outils mathématiques de l'optique transformationnelle parce la structure des équations qui régissent la propagation des ondes électromagnétiques, hydrodynamiques ou mécaniques est identique. Et que cette structure est préservée par transformation géométrique. En particulier pour les ondes de surface, qui font beaucoup de dégâts, que ce soit en bord de mer ou dans les terres. C'est toute la puissance de ce formalisme. Nous proposons même, avec l'École centrale de Paris, sur le même principe, une cape de protection contre la chaleur... D'autres, comme Martin MacCall, à l'Imperial College, vont encore plus loin : ils cherchent à comprimer la quatrième dimension, c'est-à-dire le temps, de manière à masquer non plus un objet mais un événement (lire « Des trous dans l'espace-temps », p. 52) ! Une toute nouvelle expérience avec une fibre optique vient d'ailleurs de montrer que c'est du domaine du possible !

■ **Propos recueillis par Hélène Le Meur**

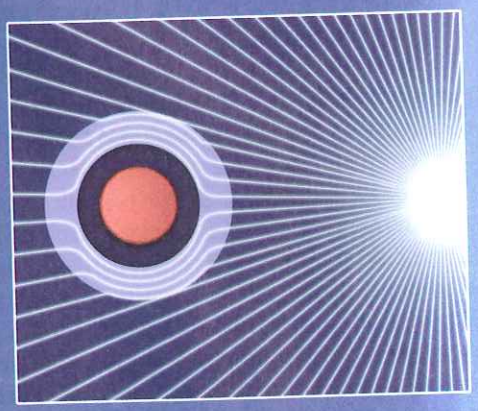


3 • Quatre façons de ren

Les principes mis au point pour l'invisibilité optique sont applicables aux ondes mécaniques. Des ingénieurs réfléchissent déjà à des systèmes pour protéger des bâtiments des vagues, du bruit ou des séismes.

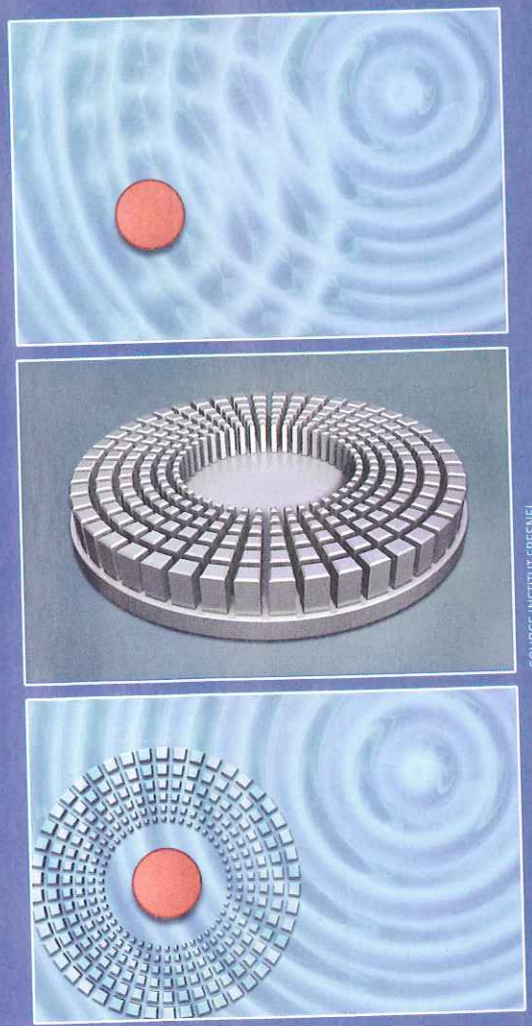
• Cape électromagnétique

Des micro-ondes à l'infrarouge, on sait fabriquer des capes d'invisibilité constituées d'anneaux concentriques. Leurs propriétés contraignent le rayonnement à les contourner et à se reformer ensuite comme si l'obstacle n'existait pas. La zone rouge reste invisible.



• Cape antivagues

Dans le cas des ondes hydrodynamiques, l'objectif est de préserver une zone dans une mer balayée par des vagues. Ce test a été réalisé dans un bassin (en haut) avec une cape antivagues usinée dans un disque d'aluminium de 20 centimètres de diamètre. Elle compte une centaine de secteurs angulaires qui guident des vaguelettes d'une fréquence de 10 hertz (au milieu). Cette cape augmente la vitesse tangentielle des vagues quand elles s'approchent de son centre, un peu comme dans un tourbillon. Elle les force ainsi à contourner la zone centrale et à reprendre leur cours comme si de rien n'était.



SOURCE INSTITUT FRESNEL

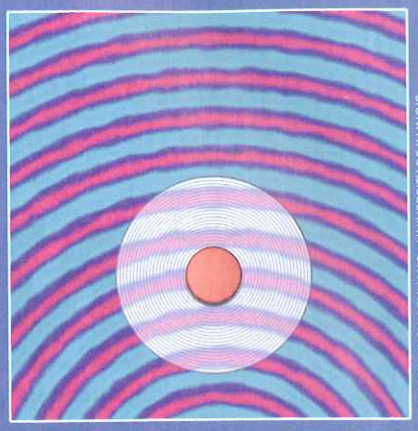
• Cape antisismique

La plus grande des capes d'invisibilité est celle qui vise à protéger des ondes sismiques les fondations d'un bâtiment. Cette fois le métamatériau (en beige) est une chape de protection de 200 mètres de diamètre dressée autour des fondations (cylindre gris). Elle est constituée d'anneaux concentriques dont la compressibilité varie grâce à l'agencement de piliers de béton armé. Ils sont plus nombreux et plus serrés au centre de la structure. Suivant ce principe, quand une onde de surface – un déplacement du sol produit lors d'un séisme – se propage dans cet ensemble, elle contourne les fondations du bâtiment (cartouche). Ce type de dispositif sera testé en grandeur nature en 2012 par la société Ménard.

dre invisible

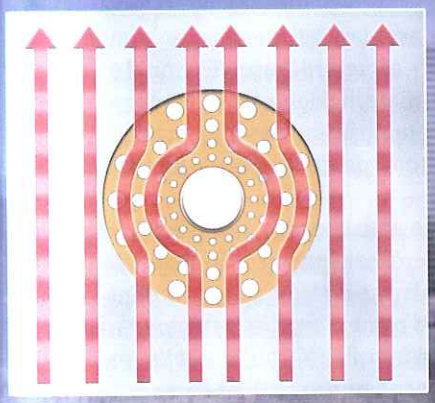
• Cape de silence

Dans ce dispositif, un objet (un jour peut-être un sous-marin) disparaît de l'environnement ultrasonore marin. Un test a été réalisé avec un disque d'aluminium d'environ 10 centimètres de diamètre dans lequel a été creusé un réseau de minuscules canaux. Plongé dans l'eau, le disque intercepte des ultrasons (de 52 à 64 kilohertz) et leur fait contourner l'objet, avant de les renvoyer dans leur direction originelle (à droite).



SOURCE DR SHU ZHUANG - UNIVERSITY OF ILLINOIS

TEXTE HÉLÈNE LE MEUR
© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS



D'APRÈS STÉPHANE BRÛLÉ/MÉNARD