

SUR
LE WEBCOMBIEN POUR
CE TURING ?

Avis aux amateurs : le manuscrit dans lequel Alan Turing jette les bases de l'informatique sera mis aux enchères le 13 avril à New York. <http://bit.ly/1uphJOI>



TCHOURI, MA CHÉRIE...

Le 14 février, jour de la Saint-Valentin, la sonde Rosetta va se rapprocher à 6 km de la comète Tchouri. Entre eux, « c'est une histoire d'amour », a souri le patron de l'ESA. <http://bit.ly/1CJ9PDU>

sciences

La complexité des enjeux climatiques

LA
CHRONIQUE
d' Hervé Le Treut

La conférence sur le climat que la France organise à Paris en décembre 2015 (COP21) sera confrontée, comme celle de Lima récemment, à une demande croissante d'aide pour s'adapter aux dommages climatiques, émanant des pays qui y sont le plus exposés. Répondre au sentiment d'injustice légitime de ces pays sera certainement l'une des conditions importantes d'un succès des négociations à Paris. Mais cela pose aussi une série de problèmes scientifiques dont l'importance est parfois sous-estimée. Depuis une à deux décennies, les premiers signes d'un réchauffement climatique lié aux gaz à effet de serre sont perceptibles un peu partout sur le globe et plus fortement dans les régions arctiques. Toutefois, l'amplitude des évolutions climatiques liées aux activités humaines n'a pas encore dépassé celle des manifestations de la variabilité naturelle. Les variations d'El Niño, des moussons, de l'anticyclone des Açores, les tempêtes violentes, les sécheresses prolongées, portent toutes la marque de dynamiques avant tout naturelles, où le hasard joue aussi un rôle important, et que le réchauffement climatique lié aux gaz à effet de serre vient dérégler. Cette combinaison complexe de facteurs naturels et anthropiques renforce les risques climatiques à l'échelle locale, mais elle empêche aussi de déterminer de manière précise où ils se produiront.

Surtout, elle pose de manière complexe la question de la responsabilité face à des situations très précises. Il n'est jamais possible de désigner les activités humaines comme seules responsables d'un événement climatique donné : de longs calculs statistiques sont nécessaires pour estimer leur part. Une recherche scientifique très active fournit des critères pour distribuer risques et responsabilités : certains pays sont plus pollueurs, d'autres plus vulnérables, du fait de leur localisation géographique comme de leur structure socio-économique. Mais il est indispensable d'aborder ces enjeux collectivement, et pas de manière événementielle. En ce sens, l'action « commune et différenciée » qui sera recherchée lors des négociations répond bien aux complexités du diagnostic scientifique.

Hervé Le Treut, climatologue, est directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace, professeur à l'UPMC et à l'IX, membre de l'Académie des sciences.

LA PUBLICATION

Quand les rayons X révèlent les secrets d'antiques papyrus

Il y a 1.936 ans (en 79 après J.-C.), une éruption du Vésuve engloutit sous la lave la cité de Pompéi et ses environs. Il y a 260 ans, dans la localité voisine d'Herculanium, des fouilles dégagent une bibliothèque ayant appartenu à Pison, beau-père de Jules César et grand érudit, remplie de précieux rouleaux de papyrus carbonisés et fossilisés. Et, il y a six jours, le CNRS annonce qu'une nouvelle technique d'imagerie ultra-sophistiquée, la tomographie X en contraste de phase (XPCT), permet enfin de réaliser le rêve de générations successives d'archéologues et de philologues : dévoiler le contenu de ces rouleaux refermés sur eux-mêmes et ayant jusqu'à présent résisté à toutes les tentatives faites pour les sonder aux rayons X. L'encre utilisée dans l'Antiquité était en effet fabriquée à partir de carbone issu des résidus de fumée, ce qui signifie qu'elle a une densité quasi identique à celle de la feuille de papyrus brûlée. D'où la difficulté de la faire apparaître avec les méthodes classiques. Mais la XPCT, en utilisant la différence d'indice de réfraction entre l'encre et son support, permet de mieux les distinguer. Grâce à cette percée technologique, les inestimables papyrus de la villa d'Herculanium n'ont désormais plus d'autre choix que de livrer leurs secrets. — Y. V.

PHYSIQUE // A l'Institut Fresnel de Marseille, les travaux sur l'invisibilité initiés dans les années 2000 par l'Anglais John Pendry sont mis à profit pour se protéger des séismes et des tsunamis.

Les métamatériaux, révolution invisible

Yann Verdo
yverdo@lesechos.fr

Le 11 mars 2011, un séisme de force 9 sur l'échelle de Richter, dont l'épicentre se situe à 130 kilomètres au large de la ville portuaire de Sendai, provoque un tsunami qui ravage les côtes japonaises cinquante et une minutes plus tard. Une vague de 15 mètres submerge la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi et court-circuite le système de refroidissement des trois réacteurs, qui entrent en fusion, entraînant un accident de niveau 7 (le plus élevé) sur l'échelle des événements nucléaires, à égalité avec la catastrophe de Tchernobyl.

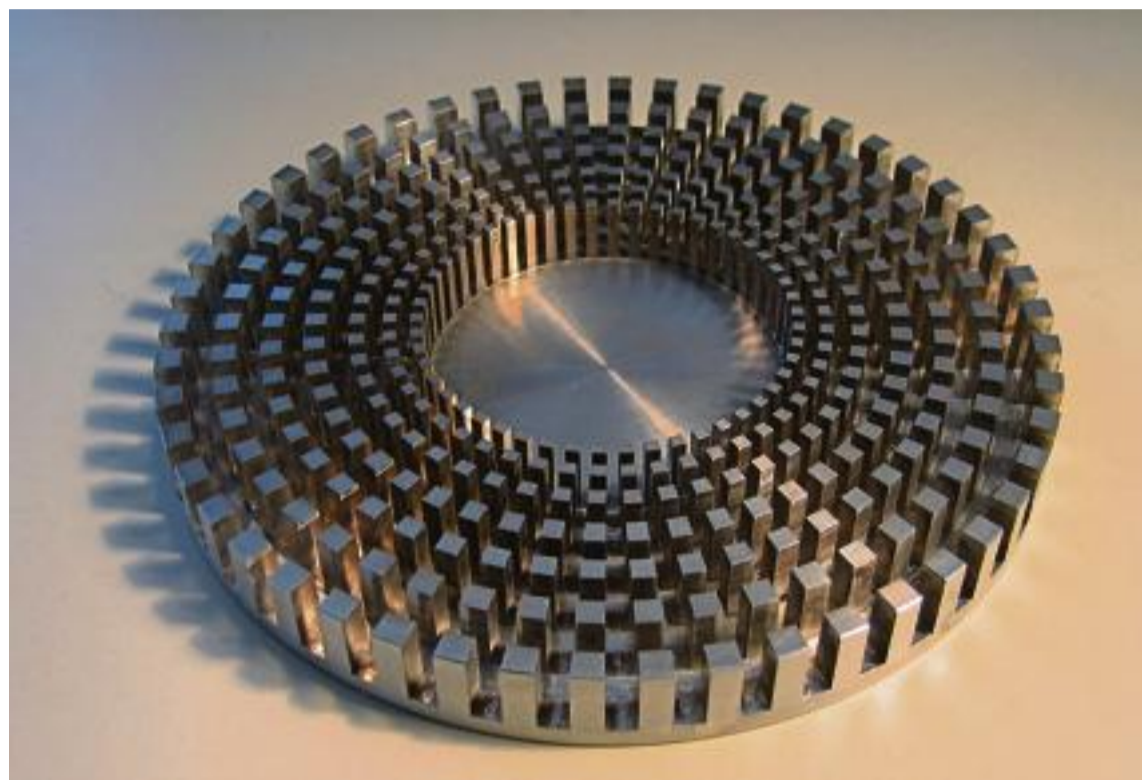
C'est à éviter que se reproduise ce scénario noir que travaillent, à Marseille, une poignée de chercheurs de l'Institut Fresnel. Augustin Fresnel, qui a donné son nom à l'Institut, était au début du XIX^e siècle un pionnier de l'optique, domaine à première vue assez éloigné des séismes et des tsunamis. Et pourtant !

Pour comprendre pourquoi un laboratoire spécialisé en optique s'intéresse aussi aux tremblements de terre et aux raz-de-marée, il faut remonter à 2006. Cette année-là, sir John Pendry, professeur de physique à l'Imperial College London, se fait connaître du grand public en apportant son crédit de scientifique renommé à un objet semblant tout droit sorti de l'univers d'Harry Potter : la cape d'invisibilité. Nulle magie sous la plume de sir John, mais l'utilisation d'un métamatériau, c'est-à-dire d'un matériau composite artificiel, ayant une propriété bien particulière : les ondes lumineuses incidentes, loin d'être réfléchies par lui, le contournent pour se reformer ensuite inchangées, comme si de rien n'était. Une coque faite dans un tel métamatériau serait donc parfaitement transparente, invisible, de même que tout objet placé en son sein !

Depuis l'article fondateur de John Pendry, les expérimentateurs du monde entier rivalisent d'ingéniosité pour traduire son idée en dispositifs concrets. Malgré les progrès des nanotechnologies qui permettent de fabriquer des métamatériaux se rapprochant toujours plus de celui, idéal, décrit par le physicien londonien, le chemin semble encore long avant d'aboutir à une vraie cape d'invisibilité (lire ci-contre). Mais, comme souvent en sciences, cette nouvelle piste de recherche suivie depuis une dizaine d'années en a ouvert d'autres.

Optique transformationnelle
Aujourd'hui directeur de recherche au CNRS et membre de l'équipe de l'Institut Fresnel, Sébastien Guenneau a collaboré outre-Manche avec le père de la cape d'invisibilité. Et vite compris que les calculs de sir John pouvaient s'appliquer à d'autres types d'ondes que les ondes électromagnétiques telles que la lumière. Notamment aux ondes sismiques et aux ondes hydrodynamiques, c'est-à-dire aux vagues. « La structure des équations qui régissent la propagation de toutes ces ondes est la même », explique-t-il. L'optique transformationnelle, théorie mathématique ayant rendu possibles les travaux de John Pendry sur les ondes électromagnétiques, peut donc aussi servir à modéliser et à simuler le comportement des ondes mécaniques impliquées dans les séismes ou les tsunamis.

Cette transposition offre un gros avantage : elle raccourcit considérablement le délai entre la théorie et l'expérimentation en laboratoire, voire le procédé industriel. Autant les métamatériaux entrant dans la composition d'une cape d'invisibilité optique sont extrêmement difficiles à fabriquer, autant cette étape est simple s'agissant des ondes mécaniques. Là encore, le principe est le même : un métamatériau est un matériau tirant ses propriétés non pas tant de sa nature chimique que de la géométrie de sa structure. C'est la disposition d'infimes inclusions dans un matériau donné qui le transforme en métamatériau. Pour pouvoir jouer avec les ondes électromagnétiques, et



Prototype d'une « cape d'invisibilité » contre les vagues, ou bouclier anti-tsunami. Ce type de structure pourrait constituer une nouvelle voie pour protéger les zones côtières ou les plates-formes pétrolières.

Un monde d'ondes

Le propre des ondes est de transporter de l'énergie sans transporter de la matière. Elles peuvent être regroupées en deux familles :

● **ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES**
Les ondes électromagnétiques couvrent une large gamme de phénomènes ne différant entre eux que par la longueur de l'onde. Par ordre croissant : rayons gamma, rayons X, ultraviolet, lumière visible, infrarouge, micro-ondes, ondes radio.

● **MÉCANIQUES**
- **Son.** Une onde acoustique est une onde de compression qui se propage dans un fluide (un gaz ou un liquide).
- **Ondes sismiques.** Un séisme produit différents types d'ondes élastiques, certaines se propageant à l'intérieur du globe (ondes de compression, de cisaillement), d'autres à sa surface (ondes de Rayleigh). Seules ces dernières sont détournées par les « capes d'invisibilité ».
- **Vagues.** Il s'agit de déformation de la surface d'une masse d'eau. Comme toutes les ondes, les vagues peuvent se réfléchir, se diffracter et se réfracter.

notamment avec la lumière visible, dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 780 nanomètres, ces inclusions doivent avoir elles-mêmes une taille nanométrique, d'où le recours aux spécialistes des nanotechnologies pour les produire. Les métamatériaux utilisés pour détourner les ondes mécaniques tirent eux aussi leurs propriétés de l'agencement de leurs inclusions, mais à une toute autre échelle : celle du mètre, voire du décimètre. « Des poteaux s'enfonçant dans l'océan, des trous cylindriques creusés dans le sol, suffisent, s'ils sont judicieusement disposés, à transformer la zone en un gigantesque métamatériau », explique Stefan Enoch, directeur de l'Institut Fresnel.

Détourner les ondes

Séismes et tsunamis, vagues de terre et vagues de mer : dans le laboratoire marseillais – le premier au monde à s'être intéressé à cette thématique de recherche, pour laquelle il a bénéficié d'un financement européen de 1,3 million d'euros sur cinq ans –, les deux voies sont poursuivies de front. Pour les ondes sismiques, l'Institut Fresnel s'est rapproché de la société Ménard, filiale de Vinci spécialisée dans les fondations et le traitement des sols. Avec l'aide des géophysiciens et des ingénieurs de cette entreprise, les chercheurs ont foré et coulé dans le sol, sur une surface de 5.000 mètres carrés, une série de colonnes en béton armé disposées en anneaux concentriques autour de la zone test. Puis ils ont provoqué un micro-séisme en lâchant une masse de 35 tonnes depuis une trentaine de mètres au-dessus du sol. Résultat indiqué par les capteurs : le métamatériau géant

(constitué par l'ensemble des colonnes souterraines) a agi, conformément à ce qui était prévu par les calculs, comme une chape antisismique, une « cape d'invisibilité » contre les séismes. « Les ondes sismiques ne sont pas absorbées, mais détournées de part et d'autre de la zone à protéger », précise toutefois Sébastien Guenneau.

Même chose avec les vagues des océans. Récemment, les chercheurs de l'Institut Fresnel ont conduit une expérience dans un canal à houle de 17 mètres de long. A l'extrémité du canal, un mur biseauté devant lequel se dressaient dix-huit poteaux verticaux de section trapézoïdale, placés les uns par rapport aux autres selon une géométrie bien précise. Là encore, l'expérience a prouvé la justesse des calculs et l'efficacité de cet agencement, puisque les vagues incidentes (parcourant le canal en direction du mur biseauté) ont été réfléchies comme si ce mur était droit ; en d'autres termes, le métamatériau placé devant lui a rendu le biseau invisible aux vagues. Ce résultat devrait être présenté en détail dans la « Physical Review E » dans les prochains jours.

Au vu de cette expérience et d'autres du même genre, il sera bientôt possible de protéger des installations portuaires, des centrales nucléaires édifiées en bordure des côtes (comme Fukushima-Daiichi) ou même des plates-formes pétrolières offshore, contre les effets dévastateurs des tsunamis ou des « vagues scélérates ». Une série de pieux plantés dans l'océan suffira à faire une « cape d'invisibilité » anti-vagues. En France, l'Ifremer s'est déjà déclaré intéressé pour en doter des fermes piscicoles. Et son équivalent outre-Manche pour protéger les belles falaises d'Albion. ■

A la recherche de la « cape d'invisibilité »

Dès 2006, année où John Pendry, de l'Imperial College London, décrit le fonctionnement de sa « cape d'invisibilité », un premier prototype est réalisé aux Etats-Unis. Avec succès, mais sans qu'il s'agisse d'« invisibilité » au sens où nous l'entendons communément : les ondes électromagnétiques déviées par la cape n'appartiennent pas au domaine de la lumière visible, dont la longueur d'onde est très courte (entre 380 et 780 nanomètres), mais à celui, plus facile à manipuler, des micro-ondes (quelques dizaines de centimètres de longueur d'onde). Deux ans plus tard, John Pendry donne la description d'un « tapis d'invisibilité », version bidimensionnelle de la cape permettant d'occulter un objet placé devant un plan (un mur, par exemple). Diverses versions en voient le jour dans les laboratoires, mais les techniques de nanofabrication ne permettent toujours pas d'accéder au domaine clef de la lumière visible. Cependant, un pas important est franchi en 2011, quand deux équipes montrent qu'il est possible d'utiliser des cristaux naturels de calcite comme métamatériau. Grâce à cette amélioration, non seulement le tapis d'invisibilité fonctionne avec la lumière visible, mais la portion d'espace qu'il est possible d'occulter augmente de volume. C'est ainsi qu'un trombone de bureau, par exemple, a été rendu invisible. — Y. V.