Dévier les séismes avec des trous et du béton

Des structures qui détournent les ondes sismiques d'édifices sensibles et les atténuent : l'idée, émise il y a cinq ans, a déjà fait l'objet de tests en grandeur nature.

PAR **Hubert d'Erceville,**
journaliste.

Napa, États-Unis, août 2014. Emilie-Romagne, Italie, mai 2012. Ile de Honshu, Japon, mars 2011. Port-au-Prince, Haïti, janvier 2010. On pourrait continuer longtemps à énumérer la liste des séismes destructeurs et meurtriers qui se produisent régulièrement sur la planète. Leur survenue reste, jusqu'à présent, imprévisible. Toutefois, les géologues connaissent bien les zones à risques. Ce qui permet, pour peu que les États en aient la volonté et les moyens, de prévenir les conséquences les plus désastreuses, en construisant en conséquence.

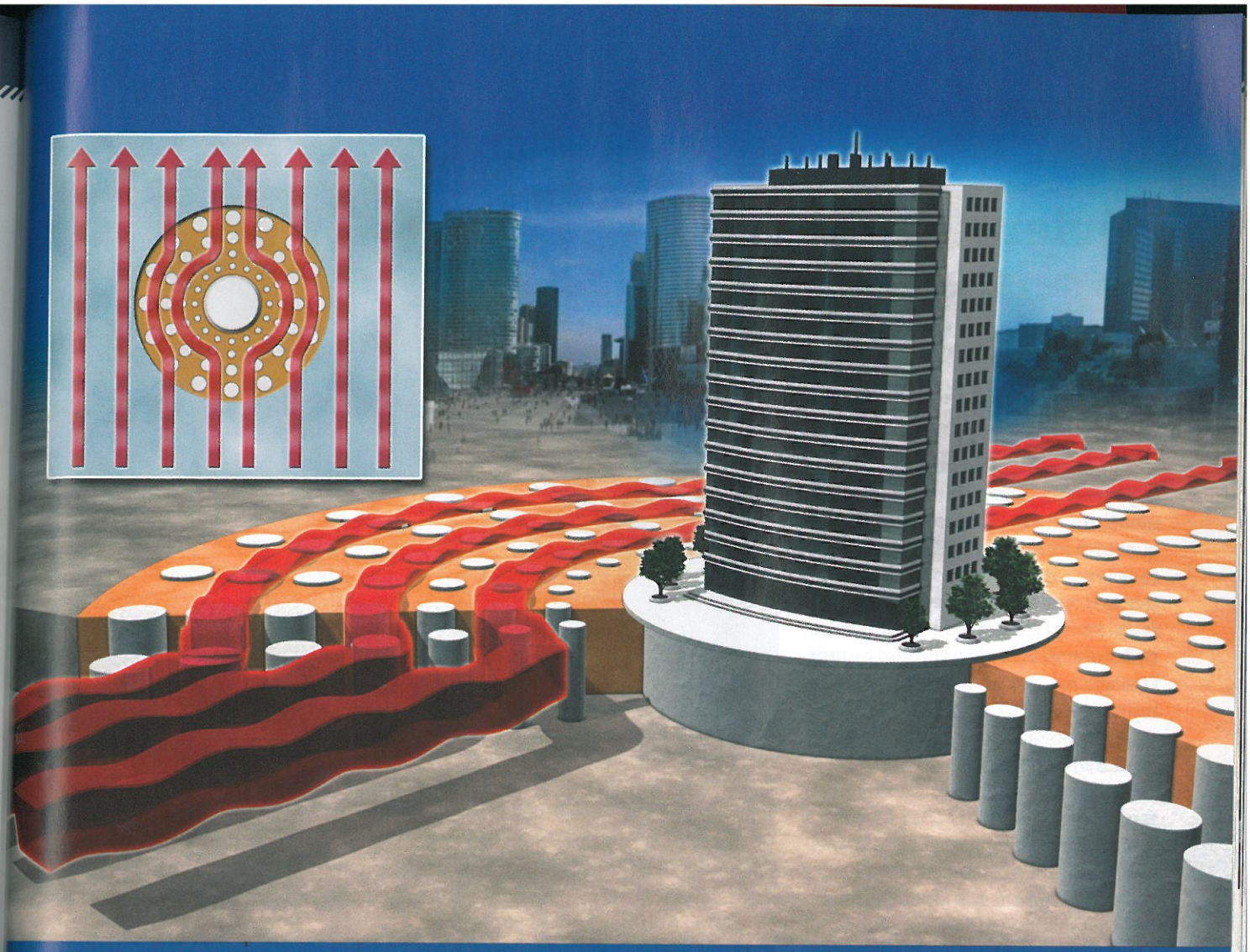
Jusqu'à présent, pour prémunir bâtiments et infrastructures contre les tremblements de terre, les ingénieurs recourent à deux stratégies, celle du chêne et celle du roseau de la fable de La Fontaine. Celle du chêne consiste à renforcer les fondations et les structures. Celle du roseau est une préférence pour l'amortissement des oscillations transmises au bâtiment par le sol.

Toutefois, les constructeurs disposeront peut-être bientôt d'un troisième type de solution : le contournement et l'amortissement. En s'inspirant de travaux menés en optique, des physiciens étudient en effet des méthodes pour non seulement détourner les ondes sismiques des constructions, mais aussi dissiper leur énergie. Plusieurs dispositifs théoriques ont été conçus et des expériences préliminaires ont été réalisées. D'autres sont en préparation afin de tester le concept dans un environnement réel.

© STÉPHANE BRÛLÉ/ MENARD

Un réseau de trous, de 2 mètres de diamètre et 5 de mètres de profondeur, creusés dans le sol, a dévié les vibrations produites par la chute d'une masse de 17 tonnes, suspendue à 50 mètres de haut sur une grue.

Ondes de surface. Lors d'un séisme, quel que soit sa profondeur, les vibrations des particules qui constituent la croûte terrestre se répandent de proche en proche dans toutes les directions. Elles forment les ondes sismiques.



LES ONDES DE SURFACE produites lors d'un tremblement de terre (en rouge) seraient conduites à contourner un bâtiment au moyen d'une chape circulaire construite autour de celui-ci. La chape serait formée d'anneaux concentriques dont la compressibilité varierait grâce à l'agencement de piliers en béton, plus nombreux et plus rapprochés au centre qu'à la périphérie © INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

Celles-ci sont de deux types : les ondes de volume, qui traversent la sphère terrestre, et les ondes de surface, qui se propagent dans la couche superficielle du sol, comme leur nom l'indique (lire « Ondes de surface et bassins sédimentaires », p. 50). Celles-ci et celles-là se succèdent ou se superposent en surface, créant des vibrations horizontales.

Pour protéger les ouvrages humains de ces mouvements, capables de les détruire, deux grandes méthodes sont généralement utilisées. La première consiste à composer avec la géométrie du bâtiment afin d'absorber l'énergie des ondes du séisme. On agit sur la masse du bâti avec d'importants renforts de béton, des fondations plus ou moins étendues et profondes, et on utilise la capacité des éléments constitutifs et des armatures à se déformer plastiquement sans se rompre.

La seconde méthode est l'installation de dispositifs additionnels à la structure pour l'aider à se soumettre et à se stabiliser : isolateurs sismiques ou amortisseurs en matériaux plastiques sur les poteaux ou pieux porteurs ; traitement des sols pour améliorer leur élasticité ; suspension de lourdes sphères antisismiques en haut du bâtiment, qui, en se déplaçant à contresens des oscillations les atténuent. Ces deux méthodes peuvent être combinées, mais, dans tous les cas, il s'agit d'une approche passive vis-à-vis des vibrations sismiques.

Pourrait-on fabriquer des dispositifs actifs, qui agissent sur les ondes elles-mêmes ? De façon inattendue, l'idée est venue de spécialistes de l'optique, en particulier de Sébastien Guenneau, de l'institut Fresnel, à Marseille. Celui-ci rappelle en effet que la lumière et les ondes de surface sont deux types d'ondes classiques, dont les comportements sont régis par des équations analogues.

Or, dans certains milieux artificiels, la lumière peut suivre une trajectoire courbe. Dès 2006, John Pendry de >>>

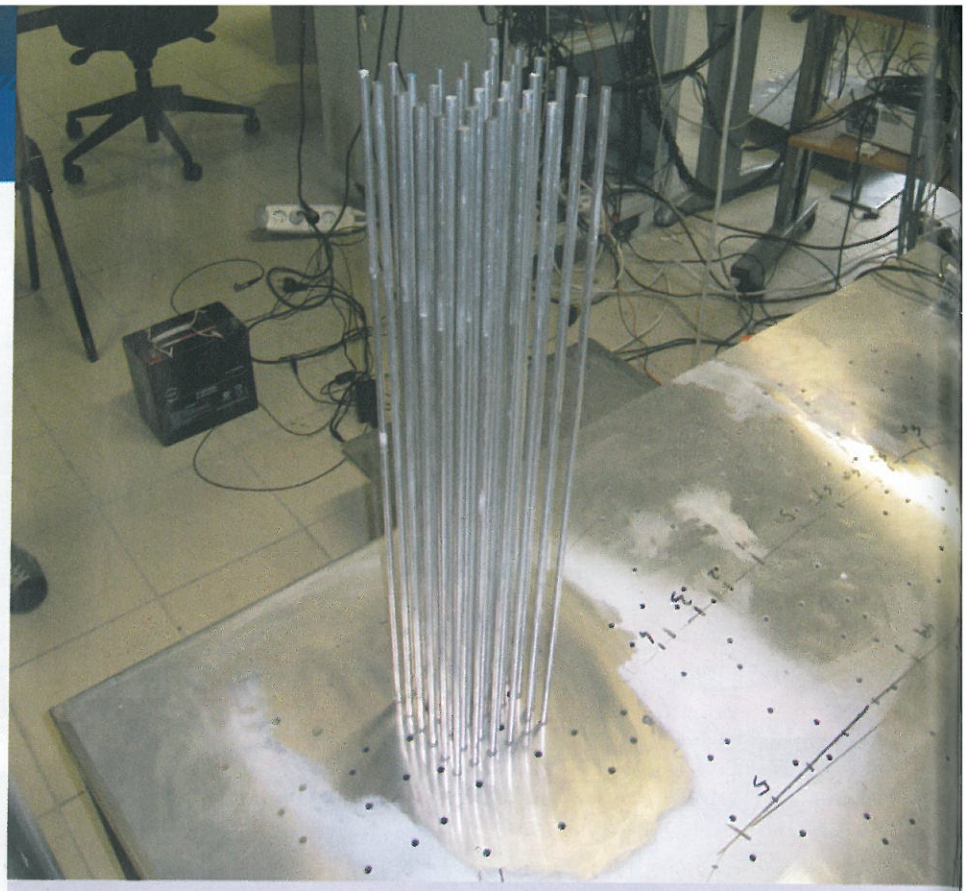
L'essentiel

> **DES SPÉCIALISTES DE L'OPTIQUE ont découvert que les ondes lumineuses pouvaient contourner un objet.**

> **ILS ONT ÉTENDU leurs travaux aux ondes mécaniques, régies par des équations analogues.**

> **LES DISPOSITIFS, actuellement en test, pourraient protéger des bâtiments des ondes sismiques.**

Dévier les séismes avec des trous et du béton



Les 25 tiges d'une soixantaine de centimètres de haut, plantées sur un carré de 10 centimètres de côté dans cette plaque d'aluminium, annulent localement les vibrations verticales, d'une longueur d'onde de 20 centimètres environ, produites expérimentalement dans la plaque.

>>> l'Imperial College de Londres, au Royaume-Uni, a démontré à l'aide d'un modèle mathématique, comment fabriquer un écran composé de lentilles spéciales en matériaux composites permettant de courber une onde lumineuse de façon à ce qu'elle évite une zone précise. De la même façon que, dans un torrent, l'eau glisse le long d'un rocher avant de reprendre un flux rectiligne. Si l'on plaçait un objet dans cette zone, il deviendrait invisible.

Un tel dispositif a été fabriqué très rapidement, du moins pour les micro-ondes, à une longueur d'onde d'environ 33 centimètres. Les physiciens ont pour cela utilisé des « métamatériaux » : des composites artificiels, mélangeant verre, résine et métal dans des géométries particulières. Depuis, l'expérimentation est devenue courante en optique de laboratoire : en passant à travers une plaque de verre ou de Plexiglas percée de trous, des ondes lumineuses de différentes longueurs d'onde passent l'obstacle en se courbant, avant de se reconcentrer à l'arrière du dispositif [1].

Dès 2009, les chercheurs de l'institut Fresnel ont montré expérimentalement que le phénomène était transposable aux ondes mécaniques. Pour cela, ils ont observé la propagation d'une vague dans une cuve remplie d'eau, au milieu de laquelle ils avaient disposé un réseau de piliers en forme de bouclier dépassant en surface. L'expérience a montré clairement que l'onde mécanique créée en amont est déviée par les piliers, tandis qu'un calme absolu règne au centre (lire « Détourner les tsunamis », p. 51) [2].

Cylindres creux. Pourquoi, se sont alors demandés Sébastien Guenneau et son collègue Stefan Enoch, ne pas essayer, avec un dispositif analogue, de détourner les ondes mécaniques produites lors d'un mouvement de terrain ? De simples cylindres creux forés dans le sol, selon une géométrie et des dimensions étudiées mathématiquement, suffiraient-ils ? Fin 2011, ils s'interrogeaient aussi sur la possibilité de réaliser cette expérience en grandeur nature.

Ces questions les conduisirent à rencontrer Stéphane Brûlé, responsable de l'Agence Rhône-Alpes de l'entreprise Ménard, groupe Solétanche-Freyssinet (Vinci). Cet ingénieur en travaux publics et sismologue est un expert des fondations spéciales. Depuis des années, il cherche à améliorer et à renforcer les sols pour qu'ils assurent un amortissement des ondes sismiques dans les zones susceptibles de connaître des tremblements de terre [3].

Ensemble, ils formalisèrent un projet qui conduisit à deux expérimentations successives en 2012, en août sur un chantier à Grenoble, puis en septembre à Lyon [4]. L'expérience lyonnaise fut la plus imposante. Sur un terrain nu, l'équipe fora une vingtaine de trous verticaux de 2 mètres de diamètre et 5 mètres de profondeur. Il s'agissait de simples trous remplis d'air.

Ondes de surface et bassins sédimentaires

Lors d'un séisme, les ondes qui se propagent à la surface des bassins sédimentaires sont les plus destructrices, car elles peuvent être amplifiées par un phénomène de résonance similaire à ceux observés dans des cavités acoustiques. Les ondes se réverbèrent en effet sur les bords du bassin et repartent dans de nouvelles directions. Le grave séisme de 2009 dans la région de L'Aquila, en Italie, l'a prouvé : l'amplification des ondes en terrain sédimentaire a détruit la plupart des édifices de surface, alors que ceux construits sur un terrain rocheux sont restés intacts.

Puis ils firent chuter de 20 mètres de haut une masse de 17 tonnes suspendue à une grue de chantier, afin de créer des microséismes d'une fréquence de 12 hertz et de magnitude 4 sur l'échelle de Richter. Il se produit environ 6 000 séismes de cette intensité par an sur la planète. Ils ne causent que des dommages très légers : vibration d'objets, bruits d'entrechoquement. L'opération fut répétée une dizaine de fois en différents endroits.

À l'aide de capteurs, Stéphane Brûlé observa le comportement des ondes qui traversaient le sol. Et les résultats de terrain correspondaient aux prédictions du modèle : les ondes étaient déviées par les trous et l'énergie se concentrait plus loin [5]. *« Le réseau de trous se comporte bien comme un bouclier qui détourne l'onde et réduit localement de l'ordre de 30 % les vibrations engendrées par la chute du poids »*, atteste Sébastien Guenneau. Mais *« prétendre avoir un contrôle du trajet des ondes est encore une vision pour le futur »*, modère Stéphane Brûlé.

Après cette expérience, Philippe Roux, de l'institut des sciences de la Terre de Grenoble, a proposé à l'équipe d'aller plus loin. *« Stefan Enoch et Sébastien Guenneau ont montré qu'il était possible de déformer un champ d'onde*, résume-t-il. *Cette recherche, validée par les essais de terrain de Stéphane Brûlé, est née de travaux théoriques en optique. Elle vise à tordre, diffuser, déplacer et diffracter les ondes de surface, non à les amortir réellement. En revanche, si on remplace les trous par des tiges verticales plantées en surface pour agir comme des "résonateurs", on peut espérer d'autres résultats en termes d'amortissement et de réfraction des ondes. »*

Afin de tester son idée, il a réalisé de nouvelles expériences, en laboratoire cette fois. Celles-ci consistaient à faire vibrer sur un côté une plaque d'aluminium carrée de 1,5 mètre de côté et de 2 millimètres d'épaisseur. Il mesurait la fréquence des vibrations qui se propageaient à l'autre bord. En interposant un dispositif hérissé de tiges, Philippe Roux a observé que celui-ci peut amortir les ondes.

La plaque utilisée comme modèle est fine, d'épaisseur constante, et homogène. C'est assez différent d'un terrain naturel avec une géomorphologie et un substrat hétérogène (pleine terre ou roche, granulométrie variable, humidité changeante, etc.). Dans un tel milieu, les ondes vont-elles rester en surface ou fuir en profondeur ? Pour le savoir, Philippe Roux conduit d'autres expérimentations, sous forme numérique cette fois, en simulant des terrains proches de la configuration naturelle.

Arbres amortisseurs. Résultat : ces simulations confirment l'effet d'amortissement observé en laboratoire [6]. *« Pour aller plus loin, le verrou actuel est de savoir si les résultats obtenus dans nos expériences effectuées sur une plaque peu épaisse et dans nos calculs sur ordinateur restent valables dans un milieu naturel »*, précise-t-il. Là encore, une nouvelle expérimentation grandeur nature est prévue. Pour des raisons de coûts, elle sera conduite avec des « tiges naturelles », déjà plantées en surface : des arbres.

Un lieu est déjà identifié, dans le Vercors. Il s'agit d'un vaste champ bordé d'une forêt dense de 80 pins sur 400 mètres carrés. Le terrain sera couvert de plus de 1 000 capteurs sismiques à trois composantes afin de mesurer en trois dimensions la complexité du champ d'onde, notamment à l'interface du champ et de la forêt. Le projet vient d'être soumis pour un financement par l'Agence nationale de la recherche, dans le cadre d'un appel d'offres sur les projets risqués. Si les fonds sont accordés, l'expérience débutera fin 2015.

D'ores et déjà, tous ces travaux montrent que les ondes sismiques peuvent être déviées, voire amorties. La mise en place de métamatériaux (cette fois à base de béton, de résines et de plastiques) ou d'éléments naturels (air, bois, eau) disposés dans ou sur le sol selon une géométrie précise ont un impact certain sur la propagation des ondes de surface. À l'avenir, les chercheurs peuvent d'abord imaginer détourner les ondes autour d'un objet construit (bâtiment, centrale nucléaire ou toute autre structure sensible) pour qu'elles se reconstituent derrière en une zone moins risquée. Ensuite, ils pourraient amortir et dissiper leur intensité. Une première voie d'avenir consisterait à combiner ces deux effets en utilisant des résonateurs en surface couplés à des réseaux de pieux ou de trous forés dans le sol. ■

Détourner les tsunamis

En 2009, Stefan Enoch et Sébastien Guenneau, de l'institut Fresnel, à Marseille, ont mené une expérience dans une cuve en laboratoire, afin de prouver que les ondes mécaniques pouvaient être détournées de façon analogue aux ondes optiques. Mais elle suggère aussi que l'on pourrait construire des dispositifs de protection contre les raz de marée. L'installation d'une digue, composée de tubes plantés en forme de bouclier et dépassant de l'eau, pourrait détourner les vagues meurtrières et les orienter vers des zones où elles provoqueraient moins de dégâts. Pour le vérifier à plus grande échelle, l'institut Fresnel projette une seconde expérience, cette fois dans un véritable bassin à vagues, situé à la Seyne-sur-Mer, dans le Var. Le budget de l'opération est évalué à 100 000 euros. Une demande de financement a été réalisée auprès du Conseil européen de la recherche.

[1] W. Cai et V. Shalaev, « Les dessous de la cape d'invisibilité », *La Recherche*, février 2012, p. 40.
[2] G. Dupont *et al.*, Arxiv: 1109.6739, 2011.
[3] S. Brûlé *et al.*, JNGG2010, 7-9 juillet 2010, Grenoble, France, 579, 2010 ; S. Brûlé et E.H. Javelaud, 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japon, 497, 2012.
[4] S. Brûlé *et al.*, Proceedings of the 9th International Conference of the Association for Electrical, Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media, Marseille, France, 2012.
[5] S. Brûlé *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *112*, 133901, 2014.
[6] M. Rupin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *112*, 234301, 2014.

Pour en savoir plus

> « La physique de l'invisible », *La Recherche*, février 2012, p. 38.
> **http://bit.ly/experiences-roux**