

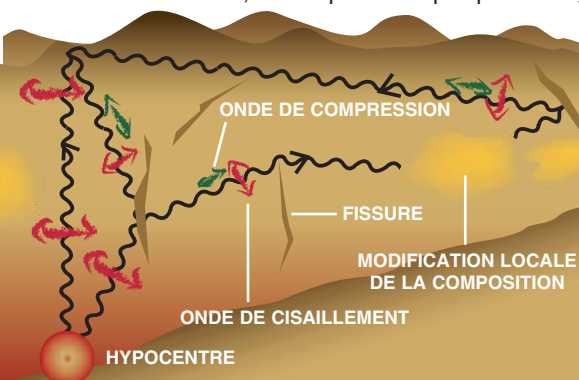
La brume sismique

À la fin d'un séisme, les dernières secousses résultent d'ondes sismiques diffusées plusieurs fois.

La croûte terrestre est l'«atmosphère» des ondes sismiques. Si, en pleine journée, le Soleil ne nous apparaît pas comme une tache lumineuse suspendue à la voûte céleste obscure, c'est parce que l'atmosphère diffuse les rayons du Soleil et les réémet dans toutes les directions. Un phénomène similaire a lieu pour les ondes sismiques à l'intérieur de la croûte terrestre, où des fissures et des couches géologiques de composition variée diffusent ces ondes. On vient de découvrir que les ondes tardives sont dues à des échos lointains ou à de multiples réverbérations. Une équipe internationale, à laquelle appartient Michel Campillo de l'Université Joseph Fourier, à Grenoble, a montré que, dans la région de Mexico, le nombre de diffusions est important ; autrement dit, la croûte ressemble plus à une brume épaisse qu'à un ciel dégagé.

Les secousses engendrées par les ondes diffusées dans la croûte terrestre se distinguent des «répliques», tremblements de terre de faible magnitude qui suivent un séisme important. Les diffusions sont des «échos» des ondes sismiques produites à l'hypocentre. Par analogie avec la coda, le dernier mouvement d'une œuvre musicale, on nomme l'ensemble des ondes diffusées plusieurs fois, la «coda des sismogrammes».

La région de Mexico est propice à l'étude des tremblements de terre : il s'y déroule autant de séismes, de magnitude donnée, en l'espace de quelques mois,



LORS D'UN SÉISME, les ondes produites à l'hypocentre sont diffusées par des «accidents de terrain», tels des fissures ou des zones de composition chimique variée. Ces diffusions multiples sont des «échos» de l'onde originelle et renseignent les géophysiciens sur la magnitude du séisme.

qu'en plusieurs dizaines d'années dans les Alpes. Comme on ne dispose pas de moyen direct de dénombrer les diffusions, on utilise une méthode indirecte, fondée sur le principe de l'équipartition de l'énergie, selon lequel, au fil des diffusions, les ondes perdent les caractéristiques de l'onde originelle, de sorte que l'énergie totale se répartit également entre tous les types d'ondes existants.

Les ondes sismiques sont de trois types : les ondes de compression qui traversent la Terre en déclenchant des mouvements de la roche parallèles à la direction de propagation, les ondes de cisaillement qui provoquent des mouvements perpendiculaires à cette direction et les ondes de surface qui se déplacent dans la croûte parallèlement à la surface terrestre. Au sol, rien ne distingue les ondes de surface des deux autres types d'ondes, de sorte que l'on déduit des déplacements du sol mesurés par les sismographes seulement des énergies globales de compression et de cisaillement.

Au début des séismes, les ondes de compression prédominent, puis cèdent la place aux ondes de cisaillement. Après quelques dizaines de secondes, le rapport entre les énergies de compression et de cisaillement se stabilise et reste constant jusqu'à la fin du séisme, alors que, dans le même temps, ces énergies diminuent d'un facteur 10 000. Au cours du séisme, l'énergie totale se répartit à parts égales entre les ondes de cisaillement et les ondes de compression. C'est la signature d'un mécanisme de diffusion multiple : le nombre de diffusions est si important que les secousses ne portent plus la marque des ondes originelles.

On pense que la diffusion multiple des ondes sismiques n'est pas limitée à la région de Mexico, mais qu'elle concerne toute la croûte terrestre hormis, peut-être, quelques zones de faible activité sismique. Aujourd'hui, la force d'un séisme se mesure à l'amplitude des secousses initiales, mais ces secousses ne sont pas nécessairement représentatives des ondes produites à l'hypocentre : ces dernières rencontrent sur leur trajet des obstacles différents d'un séisme à l'autre. À l'inverse, la coda est la superposition d'une multitude d'ondes, qui se propagent dans toutes les directions et rencontrent tous les obstacles présents dans la croûte terrestre de façon aléatoire lors de différents séismes. On utilise les signaux qui lui sont propres pour définir un coefficient moyen de diffusion indépendant des particularités de chaque diffusion. On détermine ainsi de manière plus fiable la magnitude d'un séisme en étudiant la coda plutôt que les secousses initiales.

Insonorisation mentale

Malgré des mécanismes mentaux d'atténuation des sons parasites, nous ne sommes capables de distinguer que quatre flux sonores simultanés.

Vous êtes assis dans une cathédrale, où l'organiste joue une fugue à six voix de Bach... Votre voisin tousse ; des badauds visitent l'édifice pendant le concert : à vos tympans arrive une onde sonore complexe, formée de la superposition des variations de pression de l'air engendrées par l'orgue, la toux de votre voisin, les bruits de pas et les conversations parasites. Ces ondes sonores sont composées d'une multitude de fréquences que les cellules réceptrices de la cochlée traitent sans en spécifier l'origine. Pourtant, le système auditif les regroupe en «flux» et nous venons de démontrer que nous ne pouvons distinguer plus de quatre flux différents en même temps, et que notre attention focalisée sur un flux nous permet d'atténuer considérablement les autres.

Pendant le concert, deux fréquences similaires sont analysées par les mêmes cellules de la cochlée, alors que deux fréquences différentes sont traitées par des cellules éloignées, quelle que soit leur source. Si la toux de votre voisin contient des fréquences identiques à celles de l'orgue, elles sont analysées par les mêmes «canaux de traitement» périphériques. Le système auditif doit alors, avant toute chose, regrouper les fréquences qui appartiennent à une même source, et les séparer de celles qui appartiennent à des sources différentes. Cette étape précoce de traitement des sons conduit à la formation de représentations mentales cohérentes, nommées les «flux auditifs». Le thème de la fugue joué dans l'aigu, l'accompagnement joué au pédalier ou les pas dans l'allée forment trois flux distincts. Une fois cette étape réalisée, l'auditeur accède à l'évaluation des qualités des sons (le timbre ou la hauteur, par exemple) et des séquences (le rythme ou encore la mélodie).

Comment l'auditeur parvient-il à sélectionner une seule des six lignes mélodiques dans l'enchevêtrement des sons simultanés ? Lorsqu'un organiste joue une fugue à l'orgue, il ne lui est pas possible de jouer plus ou moins fort pour accentuer telle ou telle partie. Le cerveau humain le fait à sa place : il sélectionne et extrait une ligne mélodique de



l'ensemble musical dense. En effet, la focalisation de l'attention sur un flux donné conduit à une diminution de l'intensité perçue des flux non sélectionnés. Nous avons réalisé une expérience où nous avons mesuré cette atténuation subjective due à l'attention : les sujets écoutent différents flux sonores dont les intensités physiques sont identiques et fixées à 70 décibels. Nous avons mesuré que l'auditeur est capable, grâce à ce mécanisme mental d'atténuation, de diminuer l'intensité relative des flux qu'il souhaite ignorer d'au moins 15 décibels. Nous mettons en place ce même mécanisme mental quand nous

cherchons à suivre une conversation particulière dans une pièce bondée, ou quand nous parvenons à «oublier» les pas dans les allées pendant le concert.

Nous avons aussi montré que le cerveau ne semble pas être capable de créer autant de flux simultanés qu'il y a de sources potentielles dans l'environnement. Nos recherches, menées en collaboration avec Carolyn Drake de l'Université Paris 5, indiquent que le nombre de flux perceptifs serait limité à quatre (trois flux intelligibles, plus un fond inorganisé). Dans notre expérience, le sujet écoute, dans un casque, des séquences sonores composées de la superposition de sous-séquences rythmiques simples et régulières. Il doit détecter un léger changement de rythme dans une de ces sous-séquences ; il ne peut le faire que s'il perçoit la sous-séquence comme un flux régulier, indépendamment de l'irrégularité générale de l'ensemble. Le sujet ne semble pas capable d'écouter plus de quatre flux simultanément. Emmanuel Bigand et Cécilia Garnier, du Laboratoire d'étude de l'apprentissage et du développement de l'Université de Bourgogne, ont fait des expériences similaires avec des sons de la vie quotidienne, tels les aboiements de chiens ou des bruits de voiture ; ils ont confirmé nos résultats, en montrant que les auditeurs ne peuvent pas dénombrer plus de quatre flux indépendants au sein de scènes sonores composées de plusieurs sources différentes.

Pourquoi Bach a-t-il alors composé des fugues comportant jusqu'à six voix, puisqu'il est impossible d'en écouter plus de quatre simultanément, même pour un auditeur expert? D'après l'analyse de ses partitions, quel que soit le nombre total de lignes mélodiques, Bach a composé de telle sorte qu'il n'y en ait que trois ou quatre jouées à la fois. Bach connaissait les limites du système auditif de son public...

Renaud BROCHARD, Laboratoire d'étude de l'apprentissage et du développement, Université de Bourgogne

Cristallisation acoustique

On a cristallisé de l'hélium liquide avec des ondes sonores intenses.

Dans l'imagination du dessinateur Hergé, la voix de la Castafiore avait une puissance telle qu'elle brisait les verres à distance. Plus sérieusement, dans les hôpitaux, les médecins parviennent à casser des calculs rénaux à l'aide d'ultrasons. À l'École normale supérieure de Paris, avec Xavier Chavanne et Frédéric Caupin, nous utilisons aussi des ondes sonores... pour cristalliser un liquide.

Inutile de vous égosiller pour tenter de transformer de l'eau en glace, vous n'arriverez jamais aux puissances nécessaires. Pour atteindre 200 décibels, 100 000 fois le bruit d'un moteur d'avion à réaction, nous avons placé un émetteur piézo-électrique directement dans un liquide. Afin d'augmenter l'intensité sonore, l'émetteur est hémisphérique, ce qui focalise les ondes dans une région qui est d'autant plus petite que la longueur d'onde est courte (ou encore la fréquence élevée). Nous utilisons par conséquent des ultrasons de haute fréquence, à un mégahertz, environ six octaves au-dessus de la limite audible par l'homme.

Pour explorer les effets des ultrasons dans la matière, nous avons commencé par l'hélium liquide à 65 millikelvins (environ -273°C) et à 25 fois la pression atmosphérique normale (25×10^5 pascals), tout près de la pression d'équilibre entre le liquide et le solide. Nous avons mesuré l'intensité de

nos ultrasons en étudiant la réflexion d'un faisceau laser sur une plaque de verre propre, insérée dans l'hélium liquide, au point focal acoustique. L'intensité laser réfléchie varie en fonction de la densité de l'hélium, et nous en avons déduit la pression locale. Lorsque la pression au point focal atteint $4,7 \times 10^5$ pascals de plus que les 25×10^5 pascals ambiants, de petits cristaux apparaissent au point focal de l'onde sonore.

Ces cristaux croissent jusqu'à 15 micromètres (15 millièmes de mètres) en 150 nanosecondes (150 milliardièmes de seconde) pendant la phase de compression de l'onde, donc à la très grande vitesse de 100 mètres par seconde. Un quart de période plus tard, l'onde acoustique passe en phase de décompression, les cristaux fondent aussi vite, et ainsi de suite, tant que l'onde sonore est entretenue. Nous avons observé ce phénomène relativement facilement parce que les cristaux d'hélium croissent ou fondent extrêmement



Cristal d'hélium obtenu par compression lente à partir d'un germe.