

Le gobe-mouches, en retard au dîner

Les variations climatiques menacent les oiseaux migrants dont le départ est sonné par le Soleil et non par la température.

Les nombreuses espèces animales et végétales dont la vie est rythmée par le cycle annuel des saisons devront s'adapter à d'éventuels changements de ce cycle, au risque de disparaître. Des amphibiens et des oiseaux ont ainsi réagi à la hausse des températures printanières enregistrée dans les régions tempérées au cours des 20 dernières années en avançant leur période de reproduction. Toutefois, certaines contraintes entravent l'adaptation aux variations climatiques. Marcel Visser et Christaan Both du Laboratoire zoologique de l'Université de Groningen, aux Pays-Bas, ont montré que le gobe-mouches noir, oiseau migrateur pour qui le départ est déclenché par la durée du jour, arrive désormais trop tard sur son lieu d'habitation estival pour disposer d'une nourriture abondante, imposée par la température. Ce manque de nourriture réduit le succès reproducteur : les populations de gobe-mouches noir déclinent en Europe de l'Ouest.

Le gobe-mouches noir passe l'hiver dans la forêt tropicale africaine et remonte au printemps en Europe, où il se reproduit. Les femelles arrivent une semaine après les mâles et choisissent leur partenaire en fonction de la quantité de nourriture qui se trouve sur son territoire. Les premiers oisillons naissent quelques semaines plus tard.

Les oisillons se développent rapidement pendant les premières semaines de leur vie, et réclament une quantité importante de nourriture, composée d'insectes. Or la population d'insectes n'est pas constante au long de l'année : elle évolue en même temps que la propre nourriture des insectes, les feuilles des arbres. La forêt de Hoge Veluwe, où les populations de gobe-mouches ont été étudiées, est constituée de chênes, dont la pousse des feuilles est déclenchée par la température : la population d'insectes est maximale au printemps.

Pour que tous les oisillons d'une couvée se développent au mieux, il faut que les naissances coïncident avec la période où les insectes sont les plus nombreux. De plus, ils doivent s'adapter à d'éventuels changements de la population d'insectes.

Les deux zoologistes ont étudié les données enregistrées depuis 20 ans sur les populations de gobe-mouches noir, notamment leurs dates d'arrivée et de ponte, et ils les ont comparées au relevé des températures printanières. Au cours de cette période, la moyenne des températures printanières a augmenté de deux degrés, au Pays-Bas. On constate que les gobe-mouches avancent le moment de la ponte en même temps que la température augmente, sans doute parce que la pousse des feuilles est plus précoce et que l'abondance des insectes est décalée vers le tout début du printemps.

Toutefois, tous les oiseaux ne pondent pas en même temps, et les plus précoces ont davantage d'oisillons viables que les plus tardifs. Ainsi, le gobe-mouches tente de s'adapter au réchauffement (le début des pontes est décalé vers le début du printemps), mais les oiseaux qui n'y parviennent pas ont un faible succès reproducteur. De surcroît, l'écart se creuse d'année en année entre la période où les insectes abondent et celle de la ponte des gobe-mouches.

Le gobe-mouches s'adapte difficilement à l'augmentation des températures en raison de l'immuabilité de la date du départ de l'Afrique : la date d'arrivée ne change pas, tandis que celle de l'éclosion doit être avancée. Le choix du partenaire, la modification de la physiologie des femelles pour la ponte et l'incubation des œufs doivent être de plus en plus rapides : les gobe-mouches arrivent trop tard pour profiter au mieux des ressources de leur environnement estival.

Aujourd'hui, le déclin de la population de gobe-mouches noirs aux Pays-Bas s'est amorcé et le phénomène est également enregistré en Allemagne pour d'autres oiseaux migrants.



Jacana/ Manfred Danegger

La clef de listeria

On a élucidé les mécanismes par lesquels la bactérie Listeria monocytogenes franchit la barrière intestinale.

Les cas de listériose et les aliments qui en sont la cause défraient régulièrement la chronique. Cette maladie commence souvent par une gastro-entérite et se complique de méningites. La mortalité de la listériose est d'environ 30 pour cent des personnes atteintes. La bactérie, *Listeria monocytogenes*, est ingérée avec les aliments. Après être passée dans l'estomac, elle infecte les cellules intestinales, le tissu intestinal sous-jacent, puis rejoint le sang et atteint le système nerveux central et, chez les femmes

enceintes, le placenta. Ainsi, elle est capable de franchir trois barrières de l'organisme, réputées infranchissables : la barrière intestinale, la barrière hémato-encéphalique qui protège le cerveau et la barrière placentaire, qui préserve le fœtus. L'équipe de Pascale Cossart, de l'Institut Pasteur a mis au jour les mécanismes moléculaires par lesquels la bactérie traverse la première de ces barrières, celle constituée des cellules intestinales, les entérocytes.

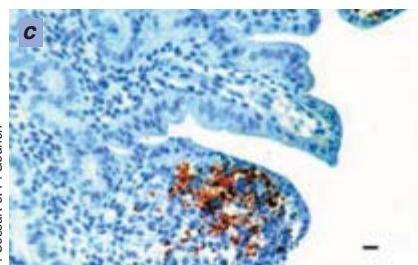
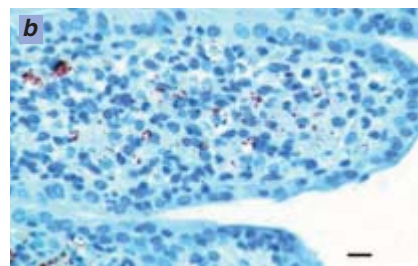
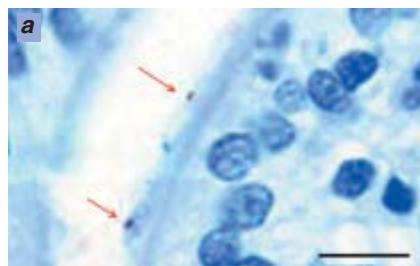
La bactérie porte, à sa surface, une protéine, nommée internaline, qui se lie avec une protéine présente à la surface des cellules intestinales, la E-cadhérine. Cette protéine assure l'adhésion des cellules entre elles et le maintien de l'étanchéité de la barrière intestinale. Lorsque le contact est établi entre la bactérie et la cellule, la membrane de cette dernière s'invagine, c'est-à-dire se creuse, et entoure

la bactérie qui pénètre ainsi dans la cellule enveloppée d'un fragment de membrane, la vacuole. Puis, grâce à des enzymes, notamment la listériolysine O, elle détruit cette vacuole. Dans une seconde étape, la bactérie se déplace de cellule à cellule en polymérisant l'actine, une protéine de la cellule qui lui confère sa forme. Elle atteint enfin la circulation sanguine.

Toutefois, toutes les E-cadhérines animales ne sont pas reconnues par l'internaline de *Listeria monocytogenes*. Par exemple, ces bactéries ne pénètrent pas dans les cellules intestinales de souris ni de rats. Quelle différence existe-t-il entre les E-cadhérines de ces organismes et celles, par exemple, des êtres humains ? La E-cadhérine humaine est identique à plus de 85 pour cent à celle du rat ou de la souris, cependant, elle diffère d'un acide aminé (le seizième), crucial

pour l'interaction avec l'internaline. Ainsi, l'interaction a lieu quand le seizième acide aminé est une proline, comme chez l'être humain, mais elle n'a pas lieu quand cet acide aminé est un acide glutamique (c'est le cas chez le rat ou chez la souris). Pour leur étude, les biologistes de l'Institut Pasteur ont utilisé, d'une part, des cobayes dont la E-cadhérine a aussi une proline en position 16, et, d'autre part, des souris qu'ils ont mises au point par transgénèse afin que leurs cellules intestinales produisent de la E-cadhérine humaine.

Ils ont ainsi montré que *Listeria monocytogenes*, ingérée oralement, franchit la barrière intestinale seulement chez les animaux dont la E-cadhérine a une proline en position 16. Toutefois, la E-cadhérine est enfouie entre les cellules intestinales. Comment la bactérie *Listeria monocytogenes* l'atteint-elle? Les cellules intestinales ont une durée de vie de trois jours, puis sont remplacées par de nouvelles cellules. Les bactéries profi-



P. Cossart et P. Gounon

tent peut-être du constant renouvellement de ces cellules pour se glisser entre elles au moment où l'une d'elles se détache. Ou bien utilisent-elles un autre facteur d'invasion, la protéine InlB, dont on a montré, sur des cellules en culture, qu'elles déstabilisent les jonctions intercellulaires et rendent ainsi les E-cadhérines accessibles à la bactérie *Listeria monocytogenes*.

Quand on aura totalement élucidé les mécanismes d'entrée de la bactérie dans l'organisme, on pourra peut-être les utiliser pour introduire, dans les cellules intestinales ou dans des cellules plus profondes, des médicaments, voire même des gènes thérapeutiques.

La bactérie *Listeria monocytogenes* (les flèches) franchit la barrière intestinale, ici d'un cobaye, grâce à une molécule qui se lie à une protéine de la membrane des cellules intestinales. Après 72 heures (b), les bactéries infectent les villosités de l'intestin, et, trois jours plus tard (c), y forment des foyers infectieux. Chaque trait noir représente 10 micromètres.

Mort subite

Il y a plus de 2 000 ans, à Pompéi, les cendres brûlantes du Vésuve ont figé les organes des victimes de l'éruption, en vaporisant instantanément l'eau qu'ils contenaient.

Le 24 août 79, le Vésuve est entré en éruption, ravageant Pompéi et Herculaneum. Quelque 300 habitants d'Herculaneum se sont réfugiés sur la plage et dans les 12 hangars à bateaux qui s'y trouvaient. Les fouilles des années 1980 et 1990 avaient mis au jour la plage et six de ces hangars. Les archéologues avaient enlevé les squelettes, bijoux et autres objets, mais n'avaient pas étudié *in situ* l'effet produit par les matières volcaniques sur les corps. Depuis 1997, dans deux des six hangars, Pier Paolo Petrone, Giuseppe Mastrorosso et leurs collègues de l'Université Frédéric II de Naples ont découvert 80 squelettes enterrés sous les cendres volcaniques. Pour la première fois, on a étudié la biologie de ces vestiges : ils indiquent que les victimes n'ont pas été asphyxiées, mais tuées instantanément par la chaleur, lorsqu'une vague de poussières et de gaz brûlants s'est abattue sur eux.

Moins connue que Pompéi, la ville d'Herculaneum a subi la même catastrophe. Dans l'Antiquité, elle se trouvait sur la route littorale qui rejoint Naples et Pompéi, à une dizaine de kilomètres de Naples. Accrochée aux dernières pentes du Vésuve, elle était installée sur une falaise d'environ 20 mètres de hauteur surplombant la mer. Les fouilles y ont été plus difficiles qu'à Pompéi, où les cendres, transportées par le vent, ont formé des couches peu épaisses (cinq à six mètres), sans consistance et perméables à l'eau. À Herculaneum, des débris volcaniques,



Pier Paolo Petrone

Les squelettes mis au jour dans les hangars à bateaux d'Herculaneum ont été figés dans la position des victimes au moment de la mort, par une sorte de sarcophage de cendres. L'étude bioarchéologique *in situ* n'a révélé aucun geste d'agonie, confirmant que la mort a été instantanée.

de la lave et des pierres ponce se sont ajoutées aux cendres. Les pluies accompagnant l'éruption ont transformé l'ensemble en un torrent de boue qui s'est solidifié sur 12 à 25 mètres de hauteur, de sorte que la couche de cendre initiale et son contenu sont restés intacts.

Pliny le jeune raconte en détail la chronologie des événements. Les habitants avaient eu le temps de fuir ou de se mettre à l'abri, quand, 12 heures après le début de l'éruption, une première vague de cendres volcaniques et de gaz brûlants a traversé la ville, sans laisser de dépôt et sans faire de dégâts sur les objets résistants à la chaleur. Puis, quand cette vague de cendres a atteint la falaise, les éléments les plus denses ont pénétré en trombe à l'intérieur des hangars où une partie de la population s'était réfugiée.

La plupart des victimes étaient assises ou couchées sur le sol (renversées par la vague de cendres). Les crânes et les os présentent des fractures noircies par la chaleur et l'émail des dents était fissuré, comme après une incinération. D'après ces indices, associés à l'analyse des tuiles retrouvées sur place, les archéologues ont estimé que la température qui régnait au moment de l'impact de la vague de poussières et de chaleur sur les hangars avait atteint 500 °C.

La vitesse de déplacement des cendres brûlantes et leur volume n'ont pas laissé aux occupants le temps de fuir. On a calculé que dans un des hangars où 30 personnes ont été ensevelies, huit mètres cubes de matière en fusion ont instantanément vaporisé l'eau contenue dans les cellules des tissus. La cendre s'est déposée sur les articulations des os et sur les résidus de tissus organiques, formant une enveloppe rigide qui a figé la position des victimes. La position des membres a révélé l'absence de gestes de protection ou de signes d'agonie.

Les légères flexions des pieds et des mains que l'on observe sur les squelettes sont dues à des contractions qui se sont produites en une seconde au contact de la chaleur, avant que la cendre ne devienne trop compacte. L'attitude pugilistique caractéristique des victimes de feux, qui résulte du raccourcissement des tendons et des muscles après la mort, n'est apparente que sur quelques squelettes, ce qui prouve qu'ils ont été immobilisés en quelques secondes. Ainsi, les victimes sont mortes sous l'effet du choc thermique et non d'asphyxie, comme on le supposait jusqu'à présent.

Atomes exotiques

Des effets quantiques autorisent certains atomes à réagir à des températures très basses, alors que les lois de la chimie devraient le leur interdire.

Depuis les années 1930, on sait qu'il existe dans l'Univers de très faibles quantités d'antimatière, constituée de particules semblables aux particules ordinaires, mais dont les propriétés sont inversées. Au proton (unique constituant du noyau de l'atome d'hydrogène) de charge électrique positive, correspond l'antiproton de même masse, mais de charge électrique négative. La rencontre d'une particule et de son antiparticule provoque leur annihilation mutuelle et la libération d'un rayonnement. Ainsi, une antiparticule pénétrant dans un matériau ordinaire n'y survit, au mieux, que quelques millièmes de milliardièmes de seconde. Pourtant, environ trois pour cent des antiprotons arrêtés par une cible d'hélium pur survivent plusieurs microsecondes. Cette stabilité inhabituelle a été mise en évidence au CERN, en 1993, par l'équipe de Toshimitsu Yamazaki : elle est due à la participation de l'antiproton à la constitution d'un objet exotique, nommé atomcule. Les réactions chimiques des atomcules relèvent d'effets quantiques et pourraient ressembler à celles des gaz froids des milieux interstellaires.

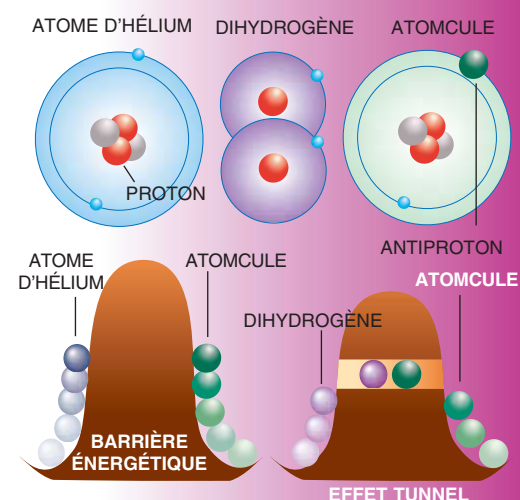
Un atomcule est constitué d'un atome d'hélium qui a perdu un électron par ionisation et d'un antiproton. Il s'apparente à un atome exotique, où l'antiproton jouerait le rôle d'une sorte d'«électron lourd». Toutefois, l'antiproton étant environ 2 000 fois plus massif qu'un électron, cet assemblage s'apparente aussi à une molécule diatomique inhabituelle : l'un des noyaux est chargé positivement, mais l'autre négativement!

Ces atomcules ont un comportement chimique étonnant. Dans l'hélium pur, ils résistent à des millions de collisions. Cependant, un contaminant moléculaire comme le dihydrogène, H₂, détruit l'atomcule dès la première collision, même à très basse température. Récemment, on a étudié de façon détaillée cette réaction de destruction à des températures de 30 kelvins.

Pour comprendre les différents comportements des atomcules vis-à-vis des atomes d'hélium ou des molécules de dihydrogène, nous avons appliqué les méthodes de chimie phy-

sique à l'étude de ces mécanismes exotiques. Nous avons essayé d'établir le chemin réactionnel, c'est-à-dire les étapes par lesquelles passent les deux espèces chimiques – l'atomcule et l'atome d'hélium dans un cas, l'atomcule et la molécule de dihydrogène dans l'autre – au cours de leur rapprochement et de leur réaction.

Pour cela, nous avons évalué les interactions du nuage électronique entourant le noyau d'hélium, d'un proton et d'un antiproton – et ceci pour des milliers de configurations possibles de ces nuages. Lorsque les deux espèces chimiques se rapprochent, leurs nuages électroniques se repoussent et constituent une barrière d'énergie plus ou moins facile à franchir. Le chemin réactionnel est alors décrit par l'évolution de l'énergie en fonction de la distance qui sépare les deux espèces. La courbe qui décrit cette évolution présente une bosse que les deux espèces doivent franchir pour se rejoindre. Si leurs vitesses d'agitation sont suffisantes, elles escaladent la pente, se rejoignent et réagissent ; sinon, elles s'arrêtent à mi-pente, puis retombent dans leur «vallée», sans se rencontrer.



Le noyau d'un atome d'hélium est constitué de deux protons (en rouge) et de deux neutrons (en gris). Deux électrons (en bleu) assurent l'équilibre électrique. Quand un antiproton, l'antiparticule d'un proton, c'est-à-dire une particule de même masse que le proton, mais de charge opposée, se combine à un atome d'hélium qui a perdu un électron, naît un atomcule, une particule exotique dont l'une des particules négatives en orbite est presque aussi massive que le noyau. Un tel atomcule est relativement stable en présence d'hélium, car la barrière énergétique est trop élevée et interdit la réaction des deux entités chimiques. En revanche, l'atomcule n'est pas stable en présence d'hydrogène : non seulement la barrière à franchir est moins élevée, mais la réaction se fait aussi par effet tunnel : les entités traversent la barrière et réagissent.

Lors de la rencontre d'un atomcule et d'un atome d'hélium, la barrière d'énergie à franchir est très élevée : le plus souvent, les deux espèces se repoussent et l'atomcule survit relativement longtemps dans l'hélium pur. Au contraire, dans le cas de la rencontre d'un atomcule et d'une molécule de dihydrogène, la barrière d'énergie est environ 150 fois plus faible. Ceci, pourtant, n'explique qu'en partie la facilité avec laquelle le dihydrogène réagit avec les atomcules. En effet, la réaction ne devrait pas se produire aux très basses températures, quand l'énergie d'agitation des atomes et des molé-

cules est inférieure à l'énergie qu'il leur faudrait pour franchir la barrière. C'est compter sans la nature quantique du mouvement des noyaux légers (protons et antiprotons) qui leur permet de franchir l'obstacle par effet tunnel : au lieu d'escalader la barrière d'énergie, ces espèces chimiques la traversent. Par ce mécanisme, les deux noyaux se rencontrent et s'annihilent, sans passer par les étapes intermédiaires de haute énergie.

Ces étranges franchissements quantiques entrent en jeu dans la chimie des gaz froids interstellaires, notamment lors des collisions à basse tempé-

rature mettant en jeu des molécules (l'ammoniac NH_3 , par exemple) ou des radicaux (OH^*). Aujourd'hui, les probabilités de réaction d'un atomcule sont connues pour chacun de ses états quantiques. Les réactions de l'atomcule pourraient servir de système de référence pour l'étude des réactions chimiques qui se produisent dans les gaz interstellaires. Si nous apprenons à utiliser les atomcules pour explorer ces phénomènes, ils sortiront de leur statut de curiosité pour devenir un outil pour les chimistes et pour les astrophysiciens.

Sébastien SAUGE et Pierre VALIRON
Observatoire de Grenoble

Un dinosaure géant

L'herbivore découvert en Égypte était plus gros que Diplodocus

Les restes d'un sauropode géant, viennent d'être découverts près de l'oasis de Bahariya, dans le désert égyptien. Déjà fouillé avant la Première Guerre mondiale par le paléontologue allemand Ernst Stromer von Reichenbach (1871-1952), ce site avait livré un grand nombre d'ossements fossiles, qui furent détruits lors d'un bombardement allié à Munich, en 1944. Toutefois, les restes avaient été décrits en détail dans une série de monographies publiées entre les deux guerres sous le titre de *Résultats des voyages d'étude du Professeur E. Stromer dans les déserts d'Égypte*. Stromer avait découvert les restes de nombreux vertébrés, notamment des dipneustes (des «poissons à poumons»), des crocodiles et des serpents primitifs. Parmi les dinosaures figuraient trois très grands carnivores qui dépassaient une douzaine de mètres de hauteur, ainsi que l'herbivore *Aegyptosaurus*, de la famille des titanosauridés (de grands dinosaures herbivores du groupe des sauropodes, dont le corps était généralement recouvert de grosses plaques osseuses).

De quand dataient ces fossiles ? Les sites égyptiens constituent la terminaison orientale d'une vaste bande de terres du Crétacé supérieur (plus précisément du Cénomanién, entre -99 et -93 millions d'années) qui affleure dans tout le Maghreb, depuis le Sud marocain jusqu'à l'Ouest, en passant par l'Algérie, le Sud tunisien et la Libye. De nombreux restes de vertébrés continentiels y ont été découverts.

À Bahariya, les paléontologues ont récemment découvert plusieurs osse-

ments d'un titanosauridé, qui serait une forme différente d'*Aegyptosaurus*. Ils l'ont baptisé *Paralititan strombe* : le nom de genre évoque le fait que ce géant a été découvert dans des dépôts géologiques qui se sont formés en milieu paralaque, c'est-à-dire non loin de la mer ; celui de l'espèce fait référence à Ernst Stromer. Les paléontologues ont exhumé quelques très grosses vertèbres caudales, quelques côtes et des os de pattes antérieures, dont un humérus de 1,69 mètre de longueur. On en déduit que *Paralititan* mesurait près de 30 mètres de longueur et pesait entre 60 et 80 tonnes. Ces mensurations le placent dans la catégorie des très gros dinosaures, peu après *Argentinosaurus*, considéré aujourd'hui comme le plus gros dinosaure connu (découvert en Argentine en 1990, il mesurait plus de 30 mètres de longueur, huit mètres de hauteur et pesait 90 tonnes, soit l'équivalent d'une quinzaine d'éléphants). *Paralititan* était le contemporain d'un autre sauropode énorme découvert dans le Sud marocain en 1954. Certaines de ses vertèbres mesurent 1,50 mètre de hauteur, et l'animal atteignait probablement 35 à 40 mètres de longueur.

Avec la découverte du nouvel animal fossile égyptien, les dinosaures herbivores géants du Crétacé supérieur (de -99 à -65 millions d'années environ) détrônent définitivement les géants plus «classiques» de la fin du Jurassique (de -154 à -135 millions d'années environ), tels *Brachiosaurus* et *Diplodocus* ; seul *Seismosaurus*, découvert plus récemment, atteignait probablement 30 mètres de longueur. Pourtant, il n'y a pas si longtemps, certains paléontologues pensaient que les très gros dinosaures avaient décliné, puis disparu à la fin du Jurassique. L'intensification des recherches sur les écosystèmes continentaux de l'ère

secondaire (de -250 à -65 millions d'années) entraîne depuis une vingtaine d'années un flot ininterrompu de découvertes dans le monde entier, qui ont infirmé cette hypothèse, uniquement fondée sur l'absence de fossiles de dinosaures géants postérieurs au Jurassique.

Aujourd'hui, on sait que ces énormes herbivores de plus de 40 tonnes étaient courants non seulement au Jurassique supérieur, mais également plus tard, pendant tout le Crétacé. En revanche, ils ont disparu il y a 65 millions d'années, en même temps que les autres dinosaures. Le plus gros mammifère connu après cette époque ne pesait que 15 tonnes.

Jean LE Lœuff, Musée d'Espéraza



Près de l'Oasis de Bahariya, les paléontologues ont découvert un humérus de 1,69 mètre : le dinosaure entier devait mesurer 30 mètres de longueur et peser 70 tonnes environ (on a représenté un éléphant à la même échelle).

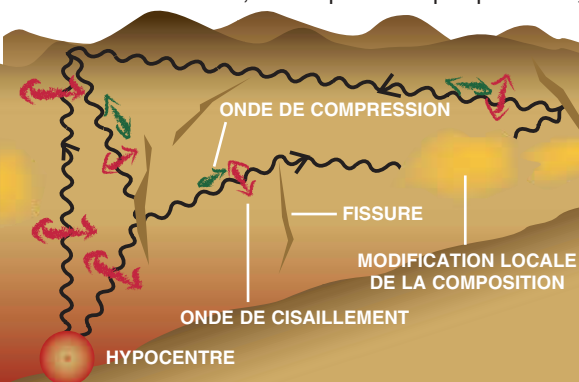
La brume sismique

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