

plasmides le gène d'un antigène associé au gène d'une molécule co-stimulatrice normalement synthétisée par une cellule présentatrice d'antigènes, les cellules inoculées présenteraient alors à la fois l'antigène et le second signal essentiel.

La programmation des vaccins

Lorsque l'efficacité des vaccins génétiques sera établie, les médecins ajouteront probablement des plasmides vaccinaux à des vaccins classiques, afin d'améliorer les effets de ces derniers. Par exemple, si l'on connaît une protéine qui provoque seulement l'apparition d'une réaction humorale efficace et un plasmide qui induit une réaction cellulaire, on mélangera les deux composants, afin d'obtenir une meilleure efficacité. Puis, quand on connaîtra plus finement les activations des diverses cellules immunitaires, on ne construira plus que des vaccins génétiques.

Naturellement, bien des questions subsistent, et la tâche des immunologistes est titanesque. L'ADN délivré en tant que médicament induit-il une réaction immunitaire contre le propre ADN de l'organisme? Avec la plupart des vaccins à ADN, la synthèse de protéines antigéniques cesse au bout d'un mois environ : en augmentant la durée de vie du plasmide, renforce-t-on l'immunité ou, au contraire, provoque-t-on une attaque des tissus sains, non vaccinés? Quelle est la durée de l'immunité chez les êtres humains? Pourquoi les réactions immunitaires varient-elles chez les divers individus? Quels sont les doses et les systèmes d'administration les plus efficaces? Comment peut-on mieux cibler certaines cellules, par exemple les cellules présentatrices d'an-

tigènes, et augmenter la capture cellulaire des plasmides? Quels gènes des agents pathogènes sont-ils les plus efficaces et les plus sûrs?

Les essais cliniques qui évaluent l'efficacité de la première génération des vaccins à ADN seront terminés dans plus de dix ans. Que ces premiers vaccins soient ou non commercialisés, ils éclaireront les mécanismes fondamentaux de l'immunité et serviront à la conception de vaccins de deuxième génération, plus efficaces.

Aujourd'hui, les immunologistes ignorent quels sont les meilleurs composants immunitaires contre les divers agents pathogènes et comment activer ces composants. Toutefois, des plans d'expériences bien faits et de nombreux vaccins génétiques testés sur de petits animaux devraient rapidement donner les informations nécessaires à la conception de vaccins efficaces.

En préparation de ces études, des biologistes créent des «banques de gènes d'agents pathogènes», composées de nombreux plasmides portant chacun un gène. On prévoit d'administrer à des animaux de laboratoire des groupes de tels plasmides, avant d'infecter les animaux vaccinés par les agents pathogènes vivants. On identifiera le lot le plus efficace, puis on le subdivisera, et l'on répétera les tests jusqu'à l'obtention du mélange d'antigènes le plus efficace.

Lorsque les mécanismes immunitaires de l'organisme face aux divers agents pathogènes seront ainsi élucidés, les immunologistes concevront des vaccins qui provoqueront des réactions précises. La rationalisation de la mise au point des vaccins génétiques autorisera probablement de nouvelles thérapies immunitaires contre le cancer et contre de nombreuses infections aujourd'hui incurables.

David WEINER est professeur de pathologie à l'Université de Pennsylvanie. Ronald KENNEDY est professeur d'immunologie et de microbiologie à l'Université de l'Oklahoma.

J.B. ULMER et al., *Heterologous Protection against Influenza by Injection of DNA Encoding a Viral Protein*, in *Science*, vol. 259, pp. 1745-1749, 19 mars 1993.

M.A. BARRY, W.C. LAI et S.A. JOHNSTON, *Protection against Mycoplasma Infection Using Expression-Library Immunization*, in *Nature*, vol. 377, pp. 632-635, 19 octobre 1995.

Mark ROMAN et al., *Immunostimulatory DNA Sequences Function as T Helper-I Promoting Adjuvants*, in *Nature Medicine*, vol. 3, n° 8, pp. 849-854, août 1997.

Adam D. COHEN, Jean D. BOYER et David B. WEINER, *Modulating the Immune Response to Genetic Immunization*, in *FASEB Journal*, vol. 12, n° 15, pp. 1611-1626, décembre 1998.

Harriet L. ROBINSON et al., *Neutralizing Antibody-Independent Containment of Immunodeficiency Virus Challenges by DNA Priming and Recombinant Pox Virus Booster Immunizations*, in *Nature Medicine*, vol. 5, n° 5, pp. 526-534, mai 1999.

La détection des neutrinos massifs

EDWARD KEARNS • TAKAAKI KAJITA • YOJI TOTSUKA

Sous le mont Ikenoyama, au Japon, un détecteur géant a montré que les neutrinos se métamorphosent lors de leur propagation. Cette découverte conduit à penser que la masse des neutrinos n'est pas nulle.



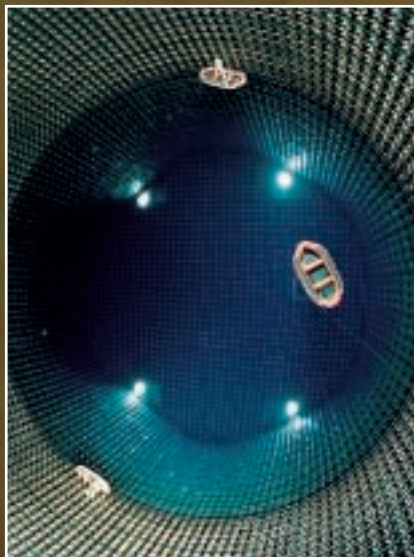
Le malheur des uns fait parfois le bonheur des autres. Le dicton vient de s'appliquer en physique. Le malheur, c'était un «bruit de fond», c'est-à-dire une réaction indésirable. Le bonheur, c'était une information importante sur le fonctionnement de l'Univers. L'histoire a commencé il y a environ 20 ans, quand plusieurs groupes de physiciens ont entrepris de distinguer la désintégration radioactive du proton, un signal excessivement rare (si tant est qu'il existe), du bruit de fond des réactions déclenchées par des particules insaisissables nommées neutrinos.

Le proton, l'un des principaux constituants des atomes, semble éternel, mais la théorie actuelle prévoit qu'il se désintégrerait en 10^{32} ans. L'observation de sa désintégration corroborerait les théories de grande unification, dont de nombreux physiciens estiment qu'elles généralisent le très fécond Modèle standard de la physique des particules. Afin d'observer cette désintégration, les physiciens ont installé de gigantesques détecteurs dans les profondeurs de la Terre, dans des mines ou dans des tunnels, où ils échappent à la pluie permanente des rayons cosmiques, des particules qui perturbent

les mesures. Toutefois, quelle que soit la profondeur à laquelle on les installait, ces détecteurs restaient exposés aux neutrinos produits dans les interactions des rayons cosmiques.

La première génération de ces détecteurs, exploitée entre 1980 et 1995, n'enregistra aucun indice de désintégration de protons. En revanche, les physiciens découvrirent que le bruit de fond des neutrinos, prétendument banal, n'était pas si facile à comprendre. L'une de ces expériences, nommée *Kamiokande*, fut installée dans le petit village minier de Kamioka, au Japon, à 250 kilomètres de Tokyo. Tout comme

1. LE DÉTECTEUR SUPER-KAMIOKANDE est installé dans une mine de zinc en activité, sous le mont Ikenoyama, au Japon. Sa cuve en acier inoxydable contient 50 000 tonnes d'une eau ultra-pure, si transparente que la lumière parcourt 70 mètres avant de perdre la moitié de son intensité (dans une piscine ordinaire, cette distance se réduit à quelques mètres). Cette eau est surveillée par 11 000 photomultiplicateurs qui tapissent les parois de la cuve. Chaque photomultiplicateur est une ampoule de verre de 50 centimètres de diamètre, soufflée à la main, couverte à l'intérieur d'une mince pellicule de métal alcalin, et au sein de laquelle on a fait le vide. Ces ampoules enregistrent les éclairs de lumière Tcherenkov, qui signalent les rares collisions d'un neutrino de haute énergie avec un noyau atomique de l'eau. Le cartouche ci-contre montre des techniciens, à bord de canots pneumatiques, en train de nettoyer les ampoules lors d'une opération de remplissage de la cuve.



Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), University of Tokyo

l'expérience IMB, située dans une mine de sel près de Cleveland, des détecteurs sensibles placés dans de l'eau ultra-pure guettaient l'éclair révélateur d'une désintégration de proton.

Comme une aiguille dans une botte de foin, un tel éclair aurait été dissimulé parmi des milliers d'éclairs semblables, engendrés par les interactions des neutrinos et des noyaux atomiques de l'eau. L'analyse ne trouva aucune désintégration de proton, mais elle livra un trésor : une preuve de l'instabilité des neutrinos, de leur transformation au cours de leur propagation.

Les neutrinos sont des particules étonnantes. Chaque seconde, 60 milliards d'entre eux, provenant pour la plupart du Soleil, traversent chaque centimètre carré de n'importe quel corps à la surface de la Terre. Cependant, comme ils interagissent rarement avec les autres particules, la quasi-totalité de ces 60 milliards de neutrinos

passent sans même effleurer un seul atome. Si l'on envoyait un tel faisceau de neutrinos sur un bloc de plomb d'une année-lumière d'épaisseur, les particules ressortiraient presque toutes sans avoir interagi au cours de la traversée. Un détecteur aussi grand que celui de *Kamiokande* ne capte qu'une infime fraction des neutrinos qui le traversent chaque année.

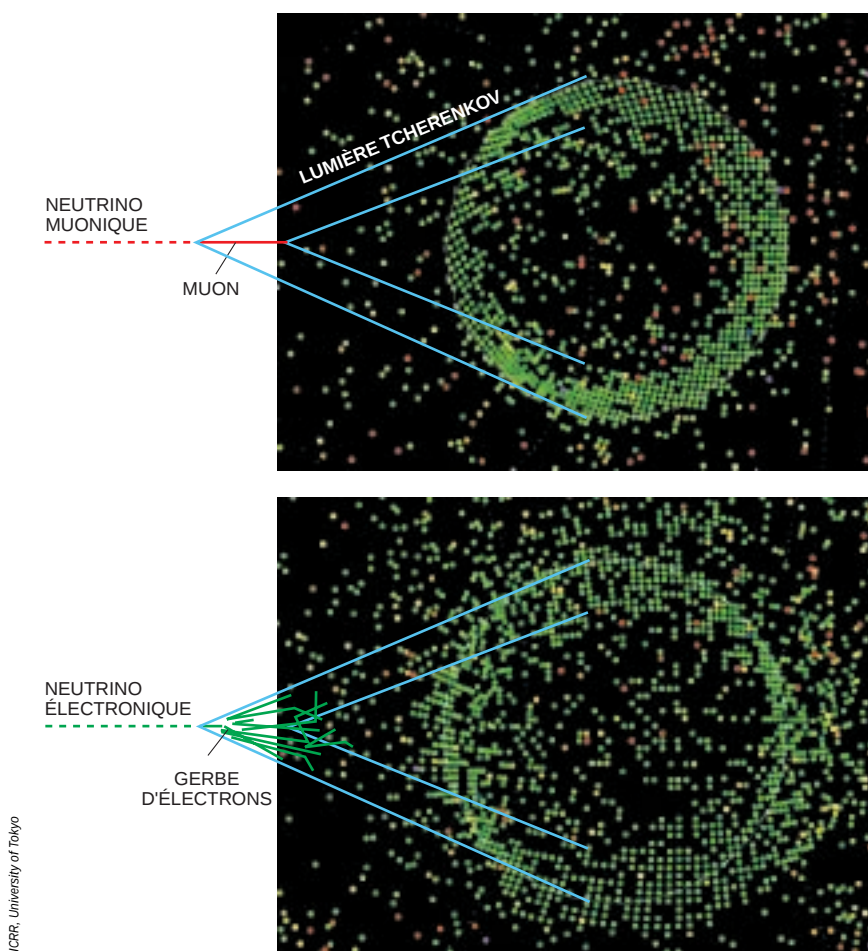
Il existe trois types, ou « saveurs », de neutrinos, qui correspondent à leurs trois partenaires chargés du Modèle standard : l'électron et ses cousins plus lourds, le muon et la particule tau. Un neutrino électronique interagissant avec un noyau atomique produit un électron ; dans les mêmes interactions, un neutrino muonique engendre un muon, et un neutrino tauique un tau. Depuis leur découverte, voici plus de 60 ans, ces particules semblaient dépourvues de masse. Toutefois, si elles changent de saveur au cours du temps, la théorie quantique

indique qu'elles possèdent très probablement une masse. Dans cette hypothèse, les neutrinos de l'Univers auraient, à eux tous, une masse supérieure à celle de toutes les étoiles de l'Univers.

La construction d'un piège géant

Souvent, la physique des particules progresse en construisant des machines de plus en plus grosses. Ce fut ici le cas : on a construit le détecteur *Super-Kamiokande* sur les mêmes plans que *Kamiokande*, mais en décuplant les dimensions (voir la figure 1) : un ensemble de photomultiplicateurs est pointé vers 50 000 tonnes d'eau, dont les protons peuvent se désintégrer ou être heurtés par des neutrinos. Dans chacun de ces cas, la réaction crée des particules qu'on détecte par un éclair bleuté de lumière Tcherenkov. Cette lumière doit son nom à Pavel Tcherenkov, qui a compris en 1934 qu'elle était l'analogue optique du bang supersonique. De même qu'un avion supersonique engendre une onde de choc sonore, une particule électriquement chargée (par exemple, un électron ou un muon) émet un rayonnement Tcherenkov lorsque sa vitesse est supérieure à celle de la lumière dans le milieu traversé. La théorie de la relativité n'est pas violée : la vitesse maximale c qu'elle impose à tout mouvement est celle de la vitesse de la lumière dans le vide. Or, dans l'eau, la vitesse de la lumière n'est égale qu'au trois-quarts de c ; des particules très énergétiques peuvent donc aller plus vite que la lumière. Dans un tel cas, un cône de lumière centré sur la trajectoire des particules est émis.

Dans le détecteur *Super-Kamiokande*, les particules chargées de l'énergie qui nous intéresse ne parcourent généralement que quelques mètres, et le cône Tcherenkov projette un anneau de lumière sur la paroi tapissée de photomultiplicateurs (voir la figure 2). La taille, la forme et l'intensité de cet anneau lumineux révèlent les propriétés de la particule chargée. Puis l'analyse de cette particule renseigne sur le type de neutrino qui l'a engendrée. Par exemple, on distingue les motifs Tcherenkov qui proviennent des électrons de ceux issus des muons : les électrons engendrent une gerbe de particules, dessinant un anneau flou, différent du cercle plus net engendré par les muons. L'analyse de cette



2. LORSQU'UN NEUTRINO DE HAUTE ÉNERGIE percute un noyau atomique et crée une particule chargée, celle-ci émet un cône de lumière Tcherenkov. Un neutrino muonique (*en haut*) crée un muon qui parcourt environ un mètre en projetant sur les détecteurs un anneau lumineux bien défini. Un électron créé par un neutrino électronique (*en bas*) engendre une petite gerbe d'électrons et de positons qui créent chacun leur propre cône de lumière Tcherenkov : l'anneau lumineux résultant est plus flou. Les points verts indiquent des éclairs détectés dans un même infime intervalle de temps.

lumière indique également l'énergie et la direction de l'électron ou du muon incident, qui sont relativement proches de celles du neutrino initial.

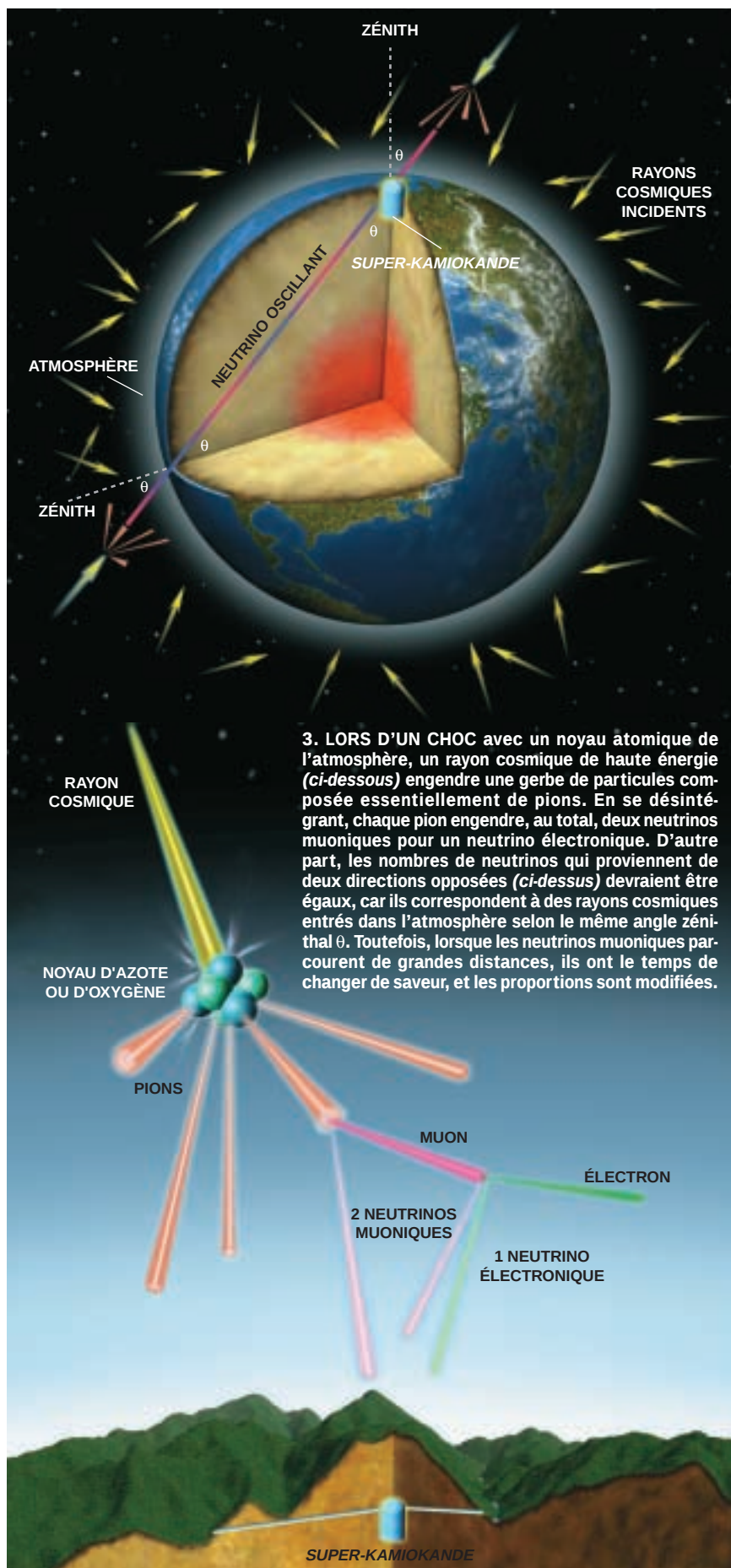
En revanche, l'expérience identifie moins facilement le troisième type de neutrino : le neutrino tauique. Un tel neutrino n'interagit avec un noyau et ne produit une particule tau que s'il a suffisamment d'énergie : le tau est environ 3 500 fois plus lourd qu'un électron (le muon, lui, est seulement 200 fois plus massif qu'un électron). Si les neutrinos produits dans l'atmosphère ont suffisamment d'énergie pour engendrer une particule de la masse du muon, seule une infime partie d'entre eux peut créer des tau. La plupart des neutrinos tauiques créés dans l'atmosphère traversent le détecteur *Super-Kamiokande* sans être détectés.

Après avoir construit notre nouveau détecteur, nous avons compté combien nous voyions de chaque neutrino. Puis nous avons comparé ces nombres aux nombres attendus théoriquement.

L'expérience *Super-Kamiokande* surveille les neutrinos atmosphériques qui se forment dans la pluie de particules déclenchée lorsqu'un rayon cosmique heurte le sommet de notre atmosphère. Ces rayons cosmiques «primaires» sont essentiellement des protons et quelques noyaux plus lourds tels celui d'hélium ou celui de fer. Chaque collision engendre une cascade de particules secondaires, principalement des pions et des muons, qui se désintègrent presque immédiatement en émettant des neutrinos (voir la figure 3). Comme on sait à peu près combien de rayons cosmiques heurtent l'atmosphère chaque seconde et combien de pions et de muons apparaissent lors de chaque collision, on a estimé le nombre de neutrinos attendus.

Jouer avec les quotients

Comme cette estimation n'est qu'à 25 pour cent près, nous utilisons une astuce classique en science : nous utilisons plutôt le quotient de deux grandeurs, plus précisément connu que les deux grandeurs prises individuellement. Dans nos études, la réaction clé est la désintégration d'un pion en un muon et en un neutrino muonique, suivie de la désintégration du muon en un électron, en un neutrino électronique et en un autre neutrino muonique. Quel que soit le nombre de rayons cosmiques qui pénètrent dans



1930



AIP Emilio Segrè Visual Archives

Wolfgang Pauli sauve le principe de conservation de l'énergie en postulant l'existence d'une particule nouvelle, emportant avec elle l'énergie manquante dans certaines désintégrations radioactives.

1933

Enrico Fermi formule la théorie de la désintégration bêta en incorporant sa nouvelle particule, qu'il nomme "neutrino", de l'italien "petit neutre".

1956



AIP Emilio Segrè Visual Archives

Frederick Reines (au centre) et Clyde Cowen détectent le neutrino en utilisant le réacteur nucléaire de Savannah River.

1962

À Brookhaven, le premier faisceau de neutrinos produit par accélérateur montre l'existence d'une différence entre les neutrinos électroniques et les neutrinos muoniques.

1969



Courtesy of the Institute for Advanced Study, Princeton

Utilisant 600 tonnes d'un solvant organique, enfoui dans une mine à Homestake (Dakota du Sud), Raymond Davis détecte des neutrinos émis par le Soleil.

l'atmosphère terrestre ou le nombre de pions qu'ils produisent, deux neutrinos muoniques sont émis pour un neutrino électronique. Le calcul fait intervenir des simulations numériques de pluies de rayons cosmiques, mais

la proportion des neutrinos muoniques par rapport aux neutrinos électroniques est estimée à cinq pour cent près.

Après avoir enregistré les réactions durant presque deux ans, nous avons constaté que la proportion des neutri-

nos muoniques par rapport aux neutrinos électroniques n'était pas égale à 2, comme prévu, mais à 1,3. Même en modifiant les hypothèses sur les flux de neutrinos, sur leurs interactions avec les noyaux et sur les réactions de nos détecteurs, nous ne pouvions expliquer un quotient aussi faible... à moins de supposer que les neutrinos se transforment.

Pour vérifier cette étonnante conclusion, nous avons examiné d'autres quotients : nous avons comparé le nombre de neutrinos provenant de différentes directions du ciel. Les rayons cosmiques primaires qui frappent l'atmosphère terrestre proviennent quasi uniformément de toutes les directions du ciel. Deux effets seulement perturbent cette uniformité. D'une part, le champ magnétique terrestre dévie certains rayons cosmiques (les moins énergiques) et dépeuple certaines directions d'incidence. D'autre part, les rayons cosmiques qui effleurent tangentiellement la Terre créent des gerbes de particules qui pénètrent peu dans l'atmosphère ; ces gerbes de particules se développent différemment de celles qui sont engendrées par les rayons cosmiques arrivant à la verticale.

Ainsi, si nous «regardons» le ciel dans une certaine direction par rapport à la verticale, puis dans la direction opposée, nous devrions «voir» arriver le même nombre de neutrinos de ces deux directions. Ces deux ensembles de neutrinos sont en effet créés par des rayons cosmiques heurtant l'atmosphère sous un même angle (voir la figure 3). En pratique, on sélectionne des neutrinos suffisamment énergiques (dont les rayons cosmiques parents n'ont donc pas été déviés par le champ magnétique terrestre), puis on divise le nombre de neutrinos ascendants par le nombre de neutrinos descendants. Si aucun neutrino n'a changé

Autres mystères, autres possibilités

Les physiciens disposent de divers indices sur les oscillations de neutrinos et ils ont encore plusieurs mystères à élucider. Durant plus de 30 ans, des expériences ont détecté quelques-uns des neutrinos électroniques engendrés lors des réactions de fusion nucléaire qui se déroulent à l'intérieur du Soleil. Ces expériences ont toujours recensé moins de neutrinos que ne le prévoyaient les meilleurs théories (voir *Où sont les neutrinos solaires ?*, par John Bahcall, in *Pour la Science*, juillet 1990). L'expérience *Super-Kamiokande*, qui a également compté ces neutrinos solaires, n'en a trouvé que la moitié. Nous étudions actuellement ces données, en espérant y trouver une signature claire des oscillations de neutrinos. En mai 1998, l'Observatoire à neutrinos de Sudbury, dans l'Ontario, a décelé ses premiers neutrinos. Son détecteur renferme 1 000 tonnes d'eau lourde, ce qui renforce considérablement sa capacité à repérer les neutrinos solaires. D'autres détecteurs seront bientôt opérationnels.

Une expérience effectuée au Laboratoire américain de Los Alamos fournit d'autres indices en faveur de l'oscillation des neutrinos : elle détecte les neutrinos électroniques émis par une source censée produire uniquement des neutrinos muoniques. Le signal est difficile à extraire du bruit de fond. Le résultat, non encore confirmé de manière indépendante, est en cours de vérification par plusieurs expériences. Très récemment, l'expérience européenne KARMEN a infirmé ce résultat.

Si les oscillations entre les neutrinos muoniques et les neutrinos tauiques sem-

blent être l'explication la plus naturelle aux données recueillies par le détecteur *Super-Kamiokande*, d'autres interprétations sont possibles. Le scénario d'oscillation le plus général inclut un mélange des trois saveurs de neutrinos. Les données du détecteur *Super-Kamiokande* sont compatibles avec quelques oscillations entre les neutrinos électroniques et muoniques aux énergies couvertes par ce détecteur. Toutefois, les résultats d'une expérience réalisée à la centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes, limitent grandement le nombre d'oscillations des neutrinos électroniques pouvant survenir dans le détecteur *Super-Kamiokande*.

On peut également imaginer que les oscillations des neutrinos muoniques incluent une saveur de neutrino encore non découverte. Toutefois, les études réalisées au CERN sur le boson Z montrent clairement qu'il n'existe que trois saveurs de neutrinos «actives» (par actives, on entend des saveurs qui participent à l'interaction nucléaire faible). Si elle existait, la quatrième saveur devrait donc être «stérile» et constituer un type de neutrinos ne participant qu'aux interactions gravitationnelles. Certains physiciens apprécient cette idée, car trois faits distincts (les neutrinos solaires, les neutrinos atmosphériques et les données de Los Alamos) n'admettent aucune explication convaincante si l'on se cantonne à attribuer des masses aux seuls neutrinos électroniques, muoniques et tauiques.

D'autres mécanismes d'oscillation, reposant sur des effets plus ésotériques que la masse des neutrinos, ont également été proposés.

1975-1977

Découverte du quark "bas" et du lepton tau, révélant une troisième génération de quarks et de leptons.

1983

Découverte, au CERN, des bosons W et Z : ce sont les vecteurs de l'interaction faible, responsable des réactions entre neutrinos.

1987

L'astronomie des neutrinos : les expériences IMB et Kamiokande, qui exploraient la désintégration du proton, détectent 19 neutrinos émis il y a 150 000 ans par la supernova 1987A du Grand Nuage de Magellan



David Malin, Anglo-Australien Observatory

1989

La détermination précise, au CERN et au SLAC (Californie), du taux de désintégration du boson Z^0 montre qu'il n'existe que trois familles de neutrinos.

1998

Grâce à l'analyse des neutrinos atmosphériques, le détecteur *Super-Kamiokande* recueille des données qui indiquent l'oscillation des neutrinos.



ICRR

de saveur en cours de route, ce rapport doit être exactement égal à un.

Comme prévu, nous avons mesuré des nombres presque égaux de neutrinos électroniques descendants et ascendants. En revanche, le nombre de neutrinos muoniques ascendants était deux fois inférieur au nombre de neutrinos muoniques descendants. Ce second argument en faveur d'un changement d'identité des neutrinos fournit un indice sur la nature de cette métamorphose. Les neutrinos muoniques ascendants ne peuvent se transformer en neutrinos électroniques, car on ne constate aucun excès de neutri-

nos électroniques ascendants. Reste le neutrino tauique. Une partie des neutrinos muoniques se seraient donc transformés en neutrinos tauiques qui ont traversé *Super-Kamiokande* sans être détectés.

Une saveur volage

Pourquoi les neutrinos changeraient-ils de saveur? Selon la théorie quantique, une particule se déplaçant dans l'espace se comporte à la fois comme une particule et comme une onde : outre ses propriétés, telles que la masse et la charge, elle possède une longueur

d'onde, peut être diffractée, etc. De surcroît, elle peut être la superposition de deux ondes.

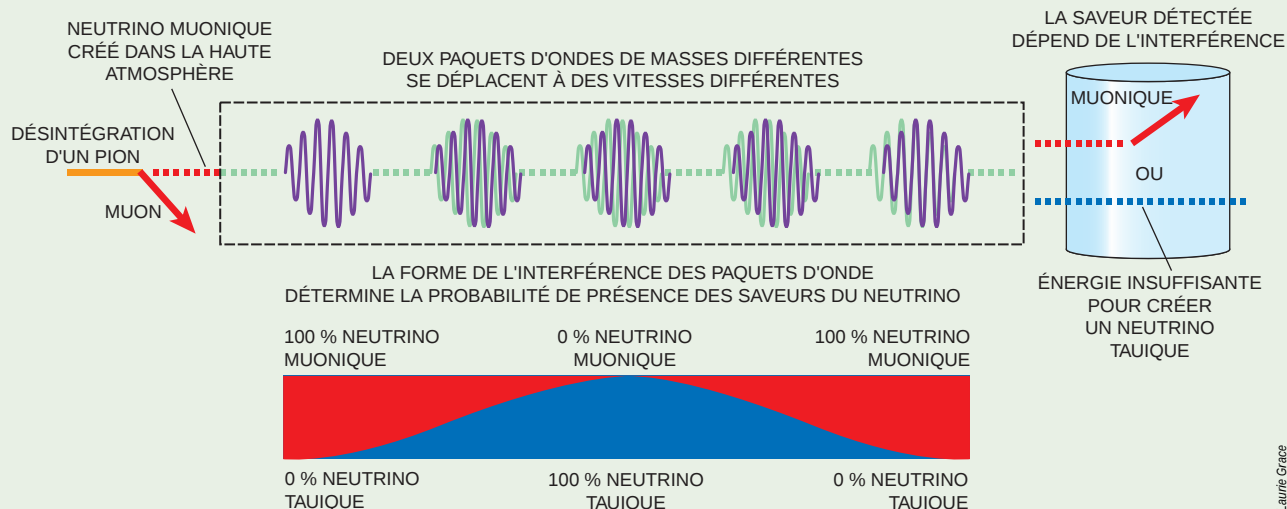
Supposons que ces deux ondes correspondent à des masses légèrement différentes. À mesure qu'elles se propagent, l'onde «plus légère» distance l'onde «plus massive», de sorte que toutes deux interfèrent avec un motif qui varie le long de la trajectoire (voir l'encadré ci-dessous). Cette interférence a un analogue musical : les battements sonores que l'on entend lorsque l'on joue deux notes presque identiques.

En musique, cet effet se perçoit à une oscillation du volume sonore ; en

Le mécanisme d'oscillation des neutrinos

Lorsqu'un pion se désintègre, il engendre toujours un neutrino. Comme toute particule quantique, un neutrino est décrit par une onde. Cette onde est une superposition de paquets d'ondes de différentes masses (*en violet et en vert, au centre*), qui se propagent à des vitesses différentes : le moins massif est plus rapide que le plus massif. Au cours de cette propagation, les ondes interfèrent : ces interférences expliquent que l'on observe un neutrino muonique (*en rouge*) ou un neutrino tauique (*en bleu*), selon les points de la trajectoire (*en bas*). Comme tout effet quantique, le phénomène est aléatoire, avec une probabilité supérieure de détection

d'un neutrino muonique près de son point de production. Les probabilités oscillent : elles sont en faveur de la détection d'un neutrino tauique à une certaine distance de la source, puis en faveur de la détection d'un neutrino muonique un peu plus loin. Finalement, lorsque le neutrino interagit dans le détecteur (*à droite*), les dés quantiques sont lancés. Si c'est un neutrino muonique qui interagit avec l'eau, un muon est produit. Si les probabilités sont en faveur du neutrino tauique, qui n'a pas suffisamment d'énergie pour créer une particule tau, 12 fois plus massive que le muon, le détecteur *Super-Kamiokande* ne détecte rien.



physique quantique, c'est la probabilité de détecter l'un ou l'autre des types de neutrino qui oscille. Au début, la probabilité que le neutrino soit muonique est égale à 100 pour cent. Après une certaine distance, la probabilité que le neutrino soit tauique est égale à 100 pour cent. Entre les deux positions, quand les probabilités sont inférieures, on verra, au hasard, un neutrino tauique ou un neutrino muonique.

Cette oscillation ne doit pas surprendre : les photons, ou grains de lumière, ont le même comportement. La lumière peut avoir divers états de polarisation, par exemple verticale, horizontale, circulaire droite ou circulaire gauche. Ces états ne correspondent pas à des masses différentes (tous les photons ont une masse nulle), mais, dans certains matériaux « optiquement actifs », la lumière de polarisation circulaire gauche se déplace plus vite que la lumière de polarisation circulaire droite. Or, un photon de polarisation verticale est une superposition de ces deux polarisations circulaires. Lorsqu'il traverse un matériau optiquement actif, sa polarisation tourne (autrement dit, oscille) de la verticale à l'horizontale à mesure que les phases de ses deux composantes circulaires alternent.

Dans *Super-Kamiokande*, l'observation des oscillations de neutrinos ne nécessite aucun matériau spécifique : si les deux composantes du neutrino ont des masses suffisamment différentes, elles engendrent des oscillations de saveur, que le neutrino se déplace dans l'air, dans une roche ou dans le vide. Lorsqu'un neutrino descend dans la cuve de l'expérience, le nombre d'oscillations qu'il a effectuées dépend de son énergie et de la distance qu'il a parcourue depuis sa création. Comme les neutrinos muoniques descendants ont parcouru quelques dizaines de kilomètres au plus, seule une fraction de

cycle s'est déroulée : on détecte presque toujours la saveur muonique originelle (voir la figure 3). En revanche, les neutrinos muoniques ascendants, créés à des milliers de kilomètres du détecteur, ont oscillé tant de fois qu'en moyenne seule la moitié d'entre eux est détectée sous la forme de neutrinos muoniques. L'autre moitié traverse le détecteur sous la forme de neutrinos tauiques, indétectables.

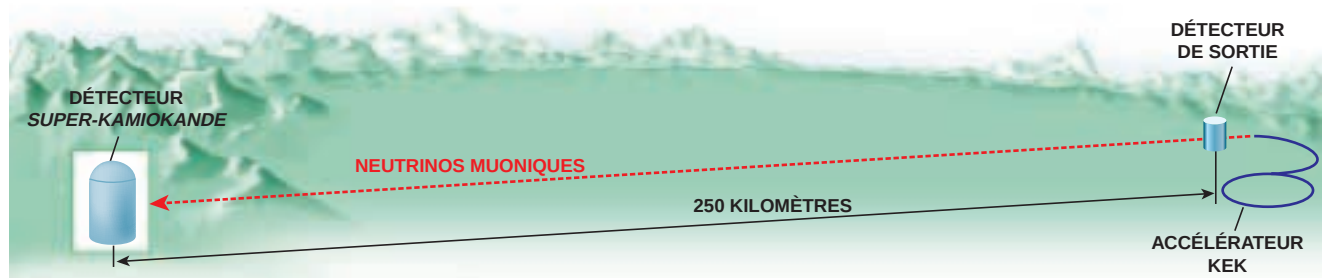
Un témoignage convaincant

Ces arguments sur le quotient des saveurs et les quantités d'événements ascendants par rapport aux événements descendants sont si convaincants que la majorité des physiciens ont admis cette oscillation des neutrinos. Pour compléter notre étude, nous avons précisé la dépendance du nombre de neutrinos muoniques en fonction de leur énergie et de leur angle d'incidence, puis nous avons comparé les nombres mesurés avec les prévisions obtenues à partir de plusieurs scénarios d'oscillations (y compris aucune oscillation). Les données décrivent très bien des oscillations pour certaines valeurs des différences de masses et pour certains autres paramètres physiques (voir la figure 5).

Ayant observé quelque 5 000 événements durant les deux premières années de notre expérience, nous savons que les anomalies observées ne s'expliquent pas par des fluctuations statistiques. Cependant, nous voulons maintenant confirmer notre découverte en observant l'oscillation des neutrinos muoniques à l'aide d'autres techniques ou dans le cadre d'autres expériences. Plusieurs détecteurs, au Minnesota et en Italie, ont déjà fourni une telle confirmation, mais avec trop peu d'événements pour donner une statistique satisfaisante.

Les oscillations de neutrinos ont été corroborées par des études d'un autre type d'interactions des neutrinos atmosphériques : leurs collisions avec les noyaux atomiques de la roche qui entoure notre détecteur. Lorsqu'ils interagissent dans la montagne, les neutrinos électroniques créent des électrons et des gerbes de particules, mais celles-ci sont absorbées dans la roche et n'atteignent jamais la grotte où est installé le détecteur. En revanche, les neutrinos muoniques de grande énergie créent des muons énergiques, qui peuvent traverser plusieurs centaines de mètres de roche et pénétrer dans la cuve du détecteur. Les muons captés proviennent alors des neutrinos ascendants, car les muons descendants sont masqués par le bruit de fond des muons engendrés par les rayons cosmiques qui pénètrent dans le mont Ikenoyama par en haut.

Les muons ascendants que nous parvenons à compter arrivent selon des directions comprises entre la verticale et presque l'horizontale. Ces directions correspondent à des distances de propagation des neutrinos



4. LE JAPON, LES ÉTATS-UNIS ET L'EUROPE projettent des expériences où des faisceaux de neutrinos émis par des accélérateurs seront détectés après avoir parcouru plusieurs centaines de kilo-

mètres. Ces expériences devraient confirmer l'existence de l'oscillation des neutrinos. Elles permettront la mesure précise des constantes naturelles qui la gouvernent.

(de leur production dans l'atmosphère à la création d'un muon près du détecteur) comprises entre 500 kilomètres (distance de la limite atmosphérique lorsqu'on regarde selon la verticale, vers le bas) et 13 000 kilomètres (le diamètre de la Terre, lorsqu'on regarde directement l'opposé du zénith). Nous trouvons alors que les neutrinos muoniques de faible énergie qui parcourent une grande distance sont plus rares que les neutrinos de haute énergie qui parcourent une faible distance. Ce comportement, conforme à la théorie des oscillations, est caractérisé par des paramètres voisins de ceux qui avaient été déduits de notre première étude.

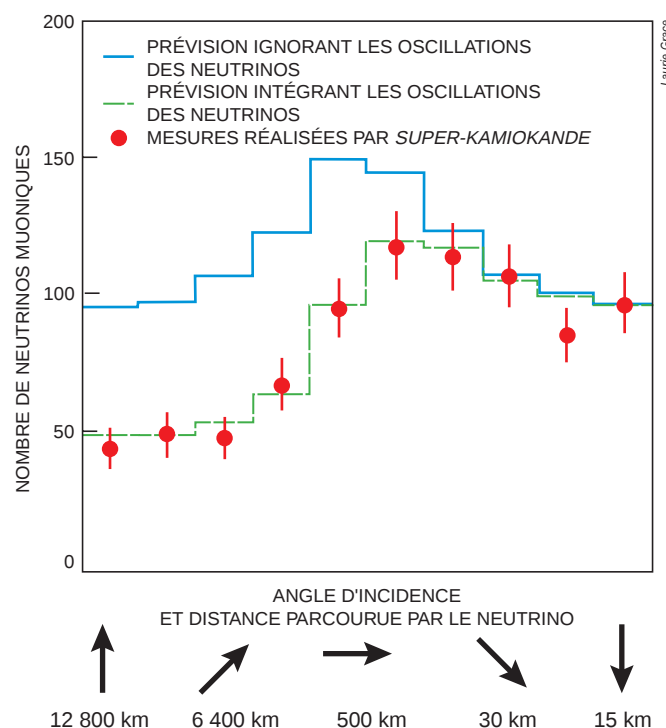
Si les seuls neutrinos possibles sont les trois actuellement connus, les données que nous avons recueillies montrent que les neutrinos muoniques se transforment en neutrinos tauïques. Selon

la théorie quantique, les oscillations sont dues à la masse des neutrinos (l'encadré de la page 66 indique d'autres possibilités).

Malheureusement, la théorie quantique limite également nos expériences : elle permet uniquement de mesurer les différences entre les carrés des masses des deux saveurs de neutrinos, car cette différence détermine la longueur d'onde des oscillations. Les données recueillies par notre expérience situent cette différence des carrés des masses entre 0,001 et 0,01 électronvolt au carré. À l'examen des masses des particules connues, on pense qu'un des deux neutrinos est bien plus léger que l'autre, ce qui situerait la masse du neutrino lourd entre 0,03 électronvolt et 0,1 électronvolt (à titre de comparaison, la masse de l'électron est égale à 511 000 électronvolts).

Quelles conséquences peut-on maintenant tirer de ce résultat ?

Premièrement, l'existence de neutrinos massifs n'infirme pas le Modèle standard de la physique des particules. Toutefois, on doit alors introduire dans le Modèle des paramètres «de mélange» qui compliquent les interactions. Un mélange similaire existe aussi entre les différents types de quarks, mais nos données indiquent



5. LES NOMBRES DE NEUTRINOS MUONNIQUES DE HAUTE ÉNERGIE qui arrivent sur le détecteur *Super-Kamiokande* selon diverses trajectoires concordent avec les théories qui envisagent des oscillations des neutrinos (en vert), et sont en désaccord avec les théories qui les ignorent (en bleu). Les neutrinos ascendants (partie gauche du graphe) ont parcouru une distance suffisante pour que la moitié d'entre eux aient changé de saveur et échappé ainsi à la détection.

que les neutrinos ont besoin de beaucoup plus de mélange.

Deuxièmement, une masse de 0,05 électronvolt resterait bien inférieure à celle des autres particules de matière. Cela explique que l'on ait longtemps pensé que les neutrinos avaient une masse nulle. Cette observation intéresse beaucoup les théoriciens qui cherchent une théorie unifiée afin de décrire toutes les forces, sauf la gravitation, par un même formalisme. Ils utilisent souvent une procédure mathématique nommée *bascul*, qui attribue naturellement à un neutrino une masse petite, mais non nulle.

Les cosmologistes sont également intéressés parce qu'ils doivent désormais tenir compte de la masse des neutrinos dans le décompte de la masse de l'Univers. Depuis des années, les astrophysiciens cherchent à connaître cette masse. Ils ont d'abord recensé la masse présente dans la matière lumineuse – par exemple, dans les étoiles et les galaxies – et dans la matière ordinaire – par exemple, dans les naines brunes ou dans les gaz diffus. Puis ils ont également estimé cette masse de manière indirecte, à partir du mouvement orbital des galaxies et de la vitesse d'expansion de l'Univers. Or, le recen-

sement direct donne un résultat 20 fois inférieur au décompte indirect : l'Univers est plus massif qu'il ne le paraît. Bien que la masse des neutrinos soit très faible, l'ensemble des neutrinos créés lors du Big Bang, et omniprésents dans l'espace, aurait une masse presque égale à la masse totale des étoiles.

Enfin, nos données sont importantes en physique des particules. Des physiciens ont décidé d'étudier les oscillations des neutrinos en utilisant des neutrinos émis par l'accélérateur du *Fermilab*, situé dans la banlieue de Chicago plutôt que les neutrinos incontrôlables de l'atmosphère ; la détection sera assurée par un appareil en construction dans une mine, à Soudan (Minnesota).

Comme un bon détecteur de neutrinos atmosphériques est également un bon détecteur de neutrinos émis par un accélérateur, nous allons utiliser notre

détecteur *Super-Kamiokande* pour étudier un faisceau de neutrinos émis par l'accélérateur du KEK, situé à 250 kilomètres, près de Tokyo. On règle ce faisceau à volonté (direction, énergie, intensité). Un détecteur semblable à *Super-Kamiokande*, placé près de l'origine du faisceau, caractérisera les neutrinos muoniques avant qu'ils n'oscillent. Pour éliminer toute incertitude, nous utilisons (une nouvelle fois) le rapport des comptages à la source par des comptages loin de la source. En ce moment même, les neutrinos du premier faisceau de neutrinos artificiel passent sous les montages du Japon. Les 50 000 tonnes d'eau ultrapure de *Super-Kamiokande* devraient en détecter quelques-uns, mais combien exactement ?

Edward KEARNS, Takaaki KAJITA et Yoji TOTSUKA sont membres de la collaboration *Super-Kamiokande*.

J.M. LOSECCO, Frederick REINES et Daniel SINCLAIR, *Les protons sont-ils stables ?*, in *Pour la Science*, août 1985.

Nickolas SOLOMEY, *The Elusive Neutrino : A Subatomic Detective Story*, Scientific American Library, W.H. Freeman and Company, 1997.

Nouvelles visions des quasi-cristaux

CHRISTOPH PÖPPE

La structure des quasi-cristaux est réalisable avec une infinité de motifs «supérieurs» soumis à certaines règles de superposition. Le choix du motif réaliste prend en compte la nature chimique des constituants du quasi-cristal.

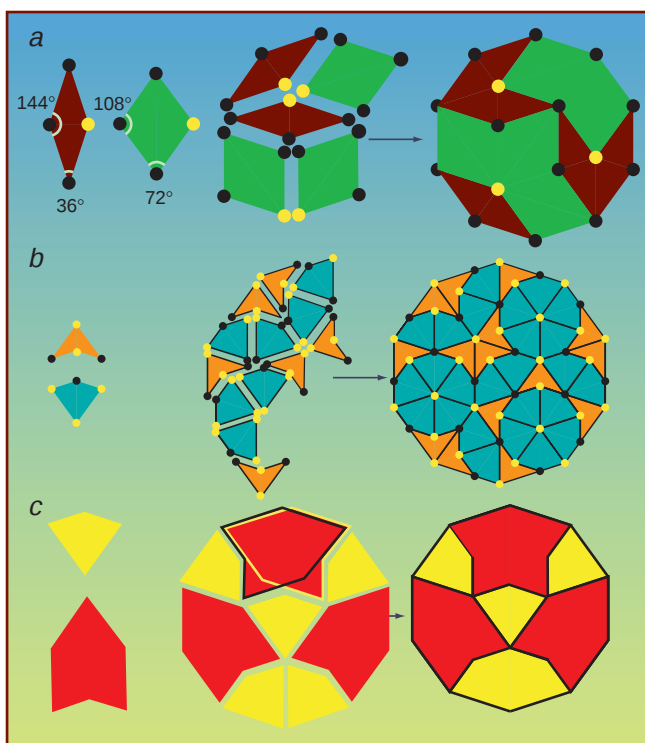
*C'est de la folie, mais il y a une méthode.
Hamlet, acte 2, scène 2.*

Les physiciens découvrent un phénomène et, comme par magie, les mathématiciens ont une théorie toute prête qui permet de l'analyser. Le miracle est d'autant plus remarquable qu'il est fréquent, comme si les mathématiciens avaient une sorte de prescience de ce que peut être la nature. Ainsi la géométrie des tenseurs était déjà là toute prête quand Einstein en eut besoin pour la relativité générale,

et un autre exemple tout aussi spectaculaire concerne la découverte des quasi-cristaux en 1984.

Dans un cristal ordinaire, les atomes s'assemblent selon une structure, la maille élémentaire, qui se répète périodiquement dans les trois directions de l'espace. Cette maille pave l'espace comme les éléments de carrelage pavent le plan ; on peut paver le plan avec des triangles, des carrés et des hexagones (symétrie d'ordre 3, 4 et 6), mais pas avec des pentagones réguliers (symétrie d'ordre 5). Cette symétrie semblait

interdite par les lois de la minéralogie : les deux impératifs, périodicité et symétrie d'ordre 5, s'excluaient mutuellement. À la surprise générale on a découvert, en 1984, des quasi-cristaux, formés d'atomes d'aluminium et de manganèse par exemple, qui ont une symétrie d'ordre 5. Nul ne croyait alors que les atomes d'un solide pouvaient remplir un volume selon un agencement déterminé par une loi, sans que cet agencement soit périodique. Pourtant l'évidence était là. Depuis, on tente d'élucider la structure de ces cristaux.



1. LES MOTIFS «SUPÉRIEURS» du pavage de Penrose, ici des décagones (roues de charrette), sont construits avec différents motifs de base. Le physicien pourra choisir, parmi ces motifs, ceux qui correspondent aux arrangements atomiques mesurés. Pour assembler ces motifs, on marque, par exemple, les sommets des losanges par des points, et la règle d'assemblage impose que les points de même couleur se superposent (a). La même règle s'applique aux cerfs-volants et aux flèches (b). Dans la décoration élaborée par Petra Gummelt, la symétrie de rotation d'ordre 10 du décagone est brisée par la coloration de deux «fusées» et leur chevauchement (c). Sur la figure de la page de droite, on a pavé le plan en superposant ces motifs supérieurs : on a ainsi pavé le plan avec des décagones c de Gummelt (au centre), avec des structures a (en bas), avec des structures b (à gauche et à droite). Examinons les passages d'une structure à l'autre. Les cerfs-volants et les flèches du motif de Penrose (à gauche) sont coupés selon leur axe de symétrie en deux triangles isocèles : les flèches sont divisées en triangles larges et les cerfs-volants en triangles étroits (illustré dans l'espace entre le motif de gauche et celui du bas). Si l'on découpe chaque triangle étroit en deux triangles plus petits, un large et un étroit, deux triangles larges contigus forment un losange large et deux triangles étroits forment un losange étroit. On obtient alors le motif de Penrose en losanges (en bas). En divisant chaque triangle large en un triangle étroit et un triangle large plus petit, on obtient les éléments du motif miniaturisé en cerfs-volants et flèches (à droite). On peut réitérer à volonté ce «processus de déflation» et produire des motifs avec des éléments toujours plus petits. Les petits triangles forment des «roues de charrette» décagonales (au milieu) ; chaque roue de charrette correspond à une flèche du motif du niveau de déflation juste supérieur (représenté à gauche). La voûte étoilée (en haut) est une décoration du motif en losanges.