

(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.

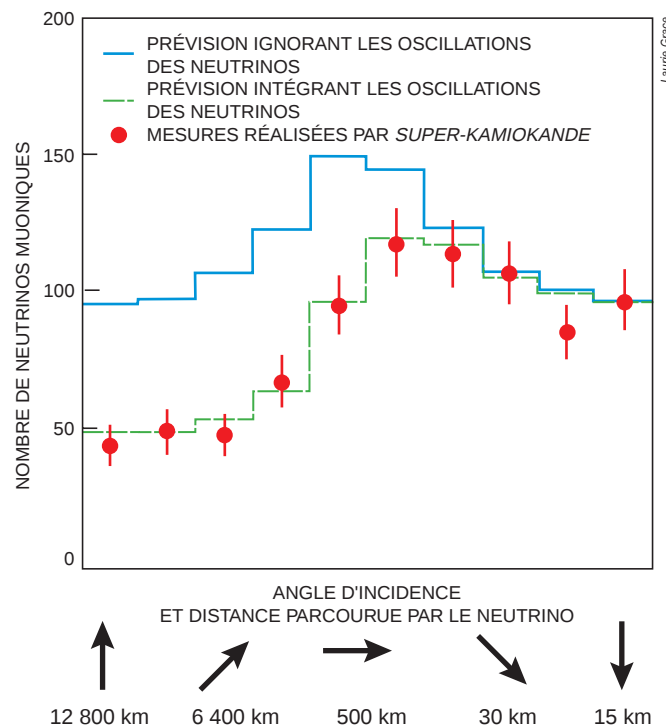
Si les seuls neutrinos possibles sont les trois actuellement connus, les données que nous avons recueillies montrent que les neutrinos muoniques se transforment en neutrinos tauiques. Selon

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.

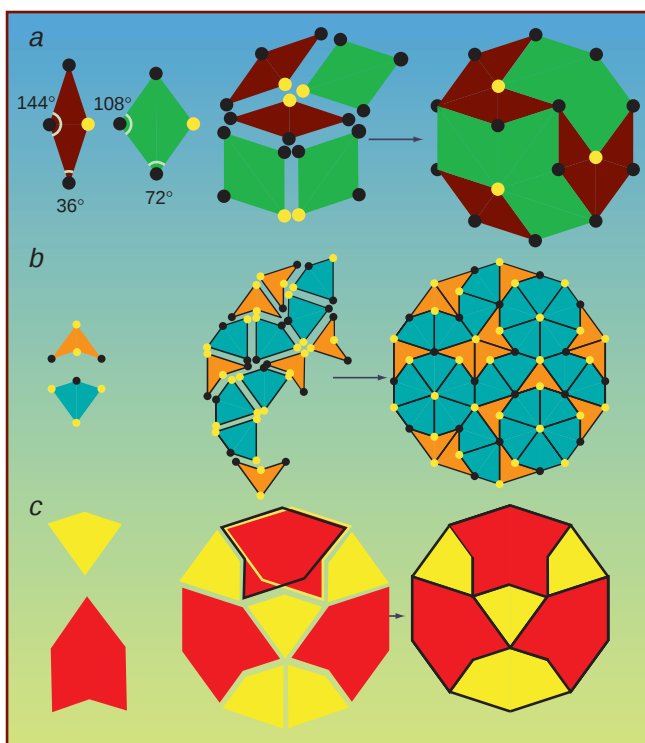
*C'est de la folie, mais il y a une méthode.
Hamlet, acte 2, scène 2.*

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,

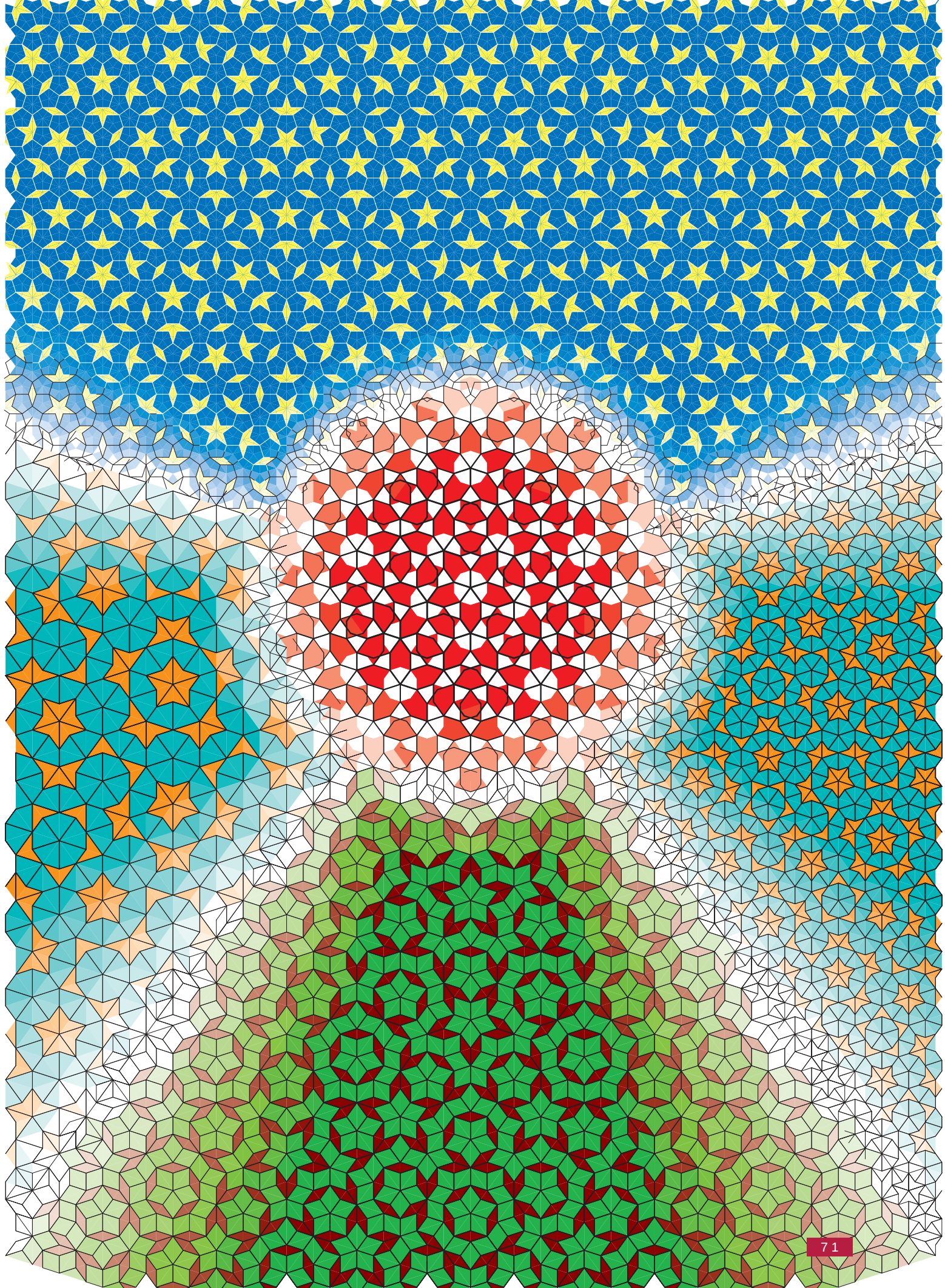
et un autre exemple tout aussi spectaculaire concerne la découverte des quasi-cristaux en 1984.

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.



Le problème est compliqué par le fait que, si l'on connaît tous les pavages périodiques du plan, on ne connaît pas bien, il s'en faut de beaucoup, les structures périodiques qui pavent l'espace.

Le physicien Peter Kramer, de l'Université de Tübingen, a découvert un remplissage non périodique de l'espace avec des rhomboèdres, des cubes déformés par cisaillement dans les trois directions spatiales (les faces sont des losanges). Ce remplissage présente une symétrie d'ordre 5 (plus précisément, une symétrie icosaédrique).

Néanmoins, comme il est plus facile de visualiser, et donc de comprendre, deux dimensions que trois, la plupart des activités de recherche sur les pavages possédant une symétrie d'ordre cinq ont porté sur des structures à deux dimensions, et non pas à trois, avec des losanges, et non des rhomboèdres.

Les résultats les plus connus de ces activités sont les pavages du mathématicien Roger Penrose, pavages qui comportent deux motifs élémentaires en forme de losanges l'un large, l'autre étroit. Lorsqu'on juxtapose les losanges d'une seule espèce, on obtient un motif

périodique ; quand on combine les deux formes selon des règles précises (voir la figure 1), on obtient des pavages non périodiques.

Les pavages de Penrose peuvent être réalisés avec différentes formes. Il existe ainsi des pavages équivalents réalisés avec deux sortes de triangles, avec des pentagones, des étoiles à cinq branches, des losanges étroits ou des «bateaux», ou encore avec les célèbres «cerfs-volants» et «flèches».

Et la chimie dans tout cela ?

Les physico-chimistes ont cherché la structure de leurs quasi-cristaux auprès des mathématiciens, et un choix possible consistait à assimiler les formes de base à des atomes de natures différentes. Ainsi l'une des formes aurait été un atome d'aluminium, l'autre un atome de manganèse et les règles d'assemblage auraient exprimé les forces qui s'exercent entre les atomes ; l'endroit où une règle d'assemblage interdit la pose d'un pavé symbolisant le manganèse correspond dans le quasi-cristal réel à un site énergétiquement défavorable à la mise en place d'un tel atome.

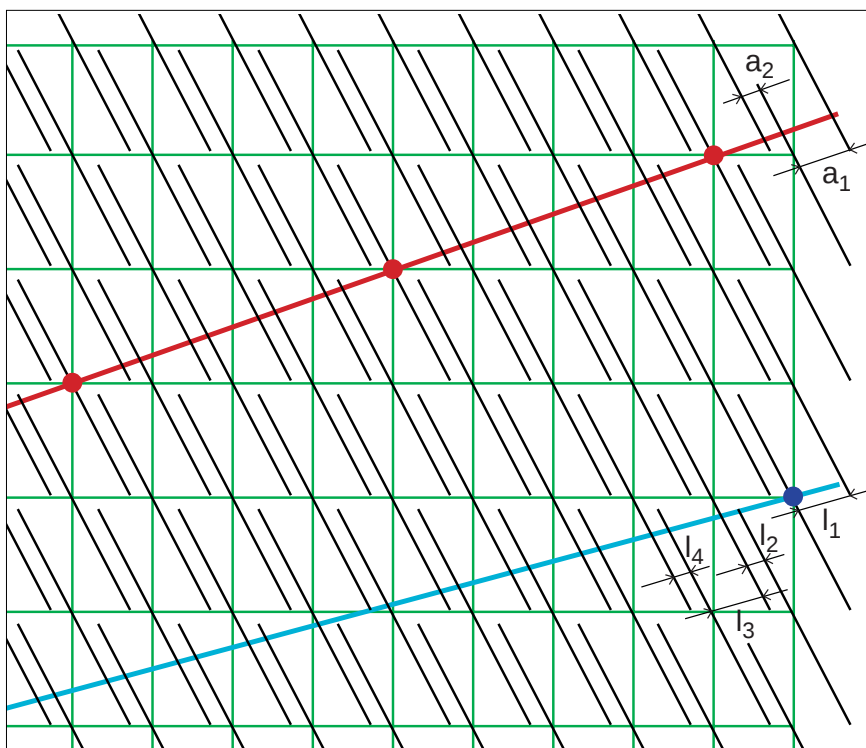
Hélas pour le réalisme, les atomes ne sont pas des losanges ou des rhomboèdres, et une forme de Penrose correspondrait plutôt à un agrégat de plusieurs atomes. Il faudrait «décorer» avec des atomes un losange (à deux dimensions) ou un rhomboèdre (à trois dimensions) de façon que le résultat global soit en concordance avec le spectre de rayons X ou avec les autres résultats de mesures. On a déjà obtenu quelques modestes résultats avec cette méthode. Toutefois, il est difficile d'imaginer pourquoi les atomes adopteraient un tel agencement en cellules rhomboédriques plutôt qu'un autre.

Le succès d'une décoration repose aussi sur la réponse qu'elle apporte à une question : comment un quasi-cristal se forme-t-il ? Si l'on essaie de construire un pavage de Penrose par ajouts successifs d'éléments en respectant les règles d'assemblage, on aboutit généralement à une impasse : en certains endroits, on ne peut plus rien ajouter du tout. Les règles d'assemblage ne sont pas suffisantes, même lorsqu'on les renforce en prescrivant comment il faut disposer les losanges autour d'un sommet (c'est ce que l'on dénomme les configurations *Vertex*).

Même si ces règles étaient suffisamment précises, il faudrait qu'un quasi-cristal croisse exactement de cette façon : sur un germe cristallin, les atomes s'ajoutent les uns après les autres, guidés par les forces qui déterminent leur position momentanée dans un voisinage changeant. Lorsque ces informations locales ne fournissent plus les indications suffisamment précises, les atomes ne trouvent pas leur place, et le quasi-cristal ne dépasse pas la taille d'un nanomètre.

Les mathématiciens sont plus chanceux : il construisent des pavages sans défaut et aussi grands qu'ils le souhaitent en considérant que le quasi-cristal est la projection d'un cristal périodique d'une dimension supérieure (voir la figure 2).

Ainsi le pavage d'une surface par les motifs de Penrose est interprété comme la projection à trois dimensions d'un motif périodique très simple en cinq dimensions. Il est non périodique uniquement parce que le réseau en cinq dimensions est projeté sous un angle oblique (irrationnel). Cette simplicité de construction à partir d'un espace de dimensions cinq fait qu'il existe un grand nombre d'empilements non périodiques.



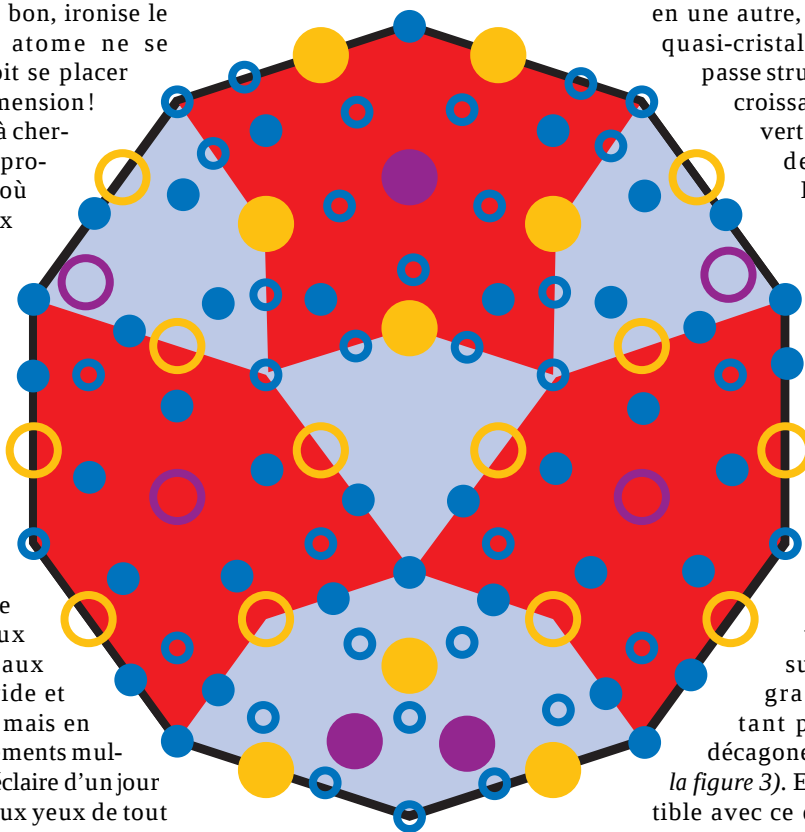
2. LA PROJECTION D'UN ESPACE PÉRIODIQUE à deux dimensions donne un espace périodique à une dimension si la droite (en rouge) représentant l'espace à une dimension a une pente rationnelle (elle passe par une infinité de nœuds du réseau) et un espace quasipériodique si la droite (en bleu) a une pente irrationnelle, c'est-à-dire ne passe que par un nœud du réseau. Sur le réseau à deux dimensions (en vert), on a des structures figurées par des segments inclinés dont les intersections avec les droites donnent les positions des atomes dans l'espace à une dimension. Similairement les structures quasipériodiques à trois dimensions sont les projections des structures périodiques à cinq dimensions, difficilement représentables.

Tout cela est bel et bon, ironise le physicien, mais un atome ne se demande pas où il doit se placer dans la cinquième dimension ! Il faut donc continuer à chercher des solutions au problème dans le monde où vivent les atomes, à deux ou à trois dimensions.

Petra Gummelt, de l'Université de Greifswald, a réussi une telle entreprise (*Geometriae Dedicata*, vol. 62, pp. 1-17, 1996, et *Aperiodische Überdeckungen mit einem Clustertyp*, Shaker, Aix-La-Chapelle, 1999). Elle a généralisé la construction en ne se limitant pas aux pavages, c'est-à-dire aux recouvrements sans vide et sans chevauchement, mais en autorisant des recouvrements multiples. Cette possibilité éclaire d'un jour nouveau ce qui saute aux yeux de tout observateur des pavages de Penrose : le motif comporte de nombreux décagones réguliers. Penrose les a dénommés *cart-wheels* (roues de charrette) : leur fréquence est si élevée que chaque point de la surface est couvert par au moins une telle roue décagonale.

La théorie du pavage de Penrose fournit encore plus d'informations : deux de ces décagones ne peuvent, quand ils se chevauchent, le faire que d'une manière très particulière. Ces règles peuvent être illustrées de façon convaincante : on colorie certaines parties des décagones en rouge et l'on fixe la règle d'assemblage suivante : les décagones doivent se chevaucher en faisant correspondre les couleurs (rouge sur rouge et blanc sur blanc), et toutes les surfaces rouges doivent être recouvertes au moins deux fois (voir la figure 1).

Le résultat de Petra Gummelt rapproche les physico-chimistes de leur but, qui est d'expliquer comment se forme un quasi-cristal. D'abord, il n'existe plus qu'un seul type d'élément de pavage, dont on coud divers exemplaires comme dans un patchwork. Cette hypothèse est plus plausible que celle selon laquelle les mêmes atomes devraient être prêts à prendre



3. LA « DÉCORATION » DE PAUL STEINHARDT des décagones de Gummelt. Les grands cercles représentent des atomes de nickel (en violet), de cobalt (en jaune), et les petits cercles des atomes d'aluminium (en bleu). En recouvrant la surface de décagones en respectant les règles de superposition, on obtient une couche de l'hypothétique quasi-cristal. Sur une couche, les atomes sont disposés sur les cercles pleins, sur la couche suivante sur les cercles vides, et ainsi de couche en couche.

deux formes différentes et ce en proportion à peu près égales : généralement, un agencement donné est énergétiquement plus favorable et se produit avec une fréquence beaucoup plus élevée que d'autres. Il est donc raisonnable de penser qu'il n'y a qu'un seul type de motif.

D'autre part, la forme du décagone est déjà relativement arrondie. Que des atomes s'assemblent en une telle cellule, ou en ce qui lui correspond en trois dimensions, paraît moins saugrenu que la forme très pointue du losange.

La croissance difficile

Enfin, quand la croissance d'un quasi-cristal, qui se fait par additions successives d'éléments conformément aux règles de chevauchement des décagones, aboutit à une impasse, le grand nombre des configurations possibles fait que les éléments se replacent en une position permettant la poursuite du processus. Certaines pièces de la construction déjà en place pourraient passer d'une configuration autorisée

en une autre, également possible. Le quasi-cristal sortirait ainsi de l'impasse structurelle, poursuivant sa croissance sur le chemin de la vertu, guidé par la recherche de l'énergie minimale. L'organisation idéale est celle qui présente la plus forte densité maximale réalisable en décagones.

Paul Steinhardt, un physicien de l'Université de Princeton, a développé cette idée. Il a trouvé une décoration du décagone par les atomes, qui non seulement respecte les règles de chevauchement, mais qui de surcroît, rapportée à une grande surface, est d'autant plus favorable que les décagones sont plus denses (voir la figure 3). En outre, elle est compatible avec ce que l'on sait des forces

entre les atomes. Seul inconvénient : en général les quasi-cristaux existant réellement ne se préoccupent pas de petites différences

d'énergie entre les divers états. Les quasi-cristaux sont souvent obtenus par refroidissement rapide, et leur état peut être fortement hors d'équilibre.

Jusqu'ici, toutes ces considérations sont faites en deux dimensions, ce qui ne gêne pas leur vérification, car il existe effectivement des quasi-cristaux constitués de telles surfaces empilées périodiquement : ils sont quasi périodiques en deux dimensions et périodiques dans la troisième dimension.

L'objectif à long terme est d'appliquer à l'espace les techniques développées avec succès par Petra Gummelt dans le plan. Des travaux que Peter Kramer a publiés sur l'Internet <http://xxx.lanl.gov/abs/math-ph/9904001> pourraient y contribuer : il propose une structure dans un espace abstrait de dimension élevée, dont les décagones sont les projections à deux dimensions.

Christoph PÖPPE est rédacteur à la revue *Spektrum der Wissenschaft*.

La guerre biologique contre les cultures

PAUL ROGERS • SIMON WHITBY • MALCOLM DANDO

Les armées et les terroristes disposent d'une arme redoutable : les micro-organismes qui dévastent les cultures vivrières.

Le 25 novembre 1969, le président américain Richard Nixon annonce que les États-Unis renoncent aux techniques de guerre biologique. Le gouvernement américain explique l'abandon de ces armes par leur intérêt militaire limité.

Toutefois, en 1989, Matthew Meselson, biologiste moléculaire à l'Université Harvard et spécialiste d'armement biologique, donne d'autres explications au Sénat américain : les armes biologiques sont une menace aussi importante que les armes nucléaires ; leur mise au point et leur production sont plus simples et moins chères que les armes nucléaires ; enfin, le programme américain d'armement biologique offensif peut être facilement copié. Aussi, ce programme serait une menace pour la sécurité des États-Unis.

Les Romains ont été les premiers à utiliser des armes biologiques : ils empoisonnaient les réserves d'eau des ennemis en y jetant des cadavres d'animaux. Depuis, les armes biologiques évoquent souvent des épidémies mortelles, tels le charbon ou la peste, déclenchées à des fins militaires ou terroristes. Pourtant, les armes biologiques qui détruisent les cultures plutôt que les populations ont également une importante capacité destructrice.

Au début des années 1960, à l'Institut de recherche sur la protection des végétaux de Pretoria, J.E. Van Der Plank observe que l'expression «épidémie explosive» prend tout son sens en temps de guerre : peu d'explosifs sont aussi destructeurs qu'un agent pathogène qui s'accroît au rythme de 40 pour cent par jour pendant plusieurs mois. De nombreux types de spores (des

formes que prennent les plantes ou les micro-organismes pour résister aux conditions défavorables) se propagent aussi facilement que de la fumée lorsqu'elles sont dispersées au bon endroit, au bon moment. Tel le virus de la grippe qui a tué 20 millions de personnes en 1918 en se propageant dans l'air, les spores de nombreux agents pathogènes des cultures passent de plantes en plantes, transportées par le vent ou par la pluie. Par ailleurs, la plupart des pathologies végétales se répandent rapidement pendant la période de croissance de la plante, ont une courte période d'incubation et atteignent visiblement les feuilles.

Le potentiel de la guerre contre les cultures

En 1972, la Convention sur les armes biologiques et les toxines impose aux États signataires d'arrêter leurs recherches sur les armes biologiques et de détruire leurs stocks. Bien qu'elle ait été signée par 141 pays, les craintes de guerre biologique ont considérablement augmenté ces dix dernières années : le terrorisme utilise des armes de plus en plus redoutables, et l'on a appris que l'Irak avait un programme actif d'armes biologiques, avec un armement anti-cultures, avant la guerre du Golfe.

La recherche irakienne sur les armes biologiques a commencé dans les années 1970, et elle s'est intensifiée entre 1985 et 1991 : les biologistes militaires ont étudié des agents pathogènes de l'homme, tel le bacille du charbon, et des toxines, telles la toxine botulique (présente dans certaines conserves avariées) et l'aflatoxine (une toxine de moisissure responsable d'une nécrose du

foie). Contre les cultures, l'Irak étudiait plusieurs espèces de champignons du genre *Tilletia*, qui provoquent le charbon du blé : des masses de spores noires remplacent la partie florale des plants infectés, puis se propagent aux autres plants. Le champignon du charbon du blé produit également de la triméthylamine, un gaz inflammable capable de détruire les moissonneuses qui récoltent des grains contaminés. Les charbons du blé, endémiques en de nombreux endroits du monde, réduisent considérablement les récoltes. La cible probable des essais irakiens était l'Iran, où le blé est la principale culture céréalière.

La guerre biologique est une menace internationale, car les pays dépourvus des compétences techniques pour produire des bombes atomiques peuvent toutefois fabriquer des armes qui déclencheraient des famines dévastatrices ou des crises économiques.

Les principales cultures vivrières ont de nombreuses variétés, dont chacune est adaptée à des conditions particulières de climat et de sol. Ces variétés ont des sensibilités différentes aux maladies. Les agents pathogènes des cultures existent aussi sous différentes formes, qui infectent les cultures et provoquent plus ou moins de dégâts selon les variétés cultivées. Un agresseur pourrait utiliser ces propriétés pour réaliser une arme spécifique : en isolant une souche d'agent pathogène qui n'attaquerait que les ressources principales de l'ennemi, il éviterait que les effets de l'arme ne se retournent contre lui.

Les exemples d'épidémies naturelles montrent que les dégâts seraient terribles. En 1970, l'helminthosporiose,