

(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.

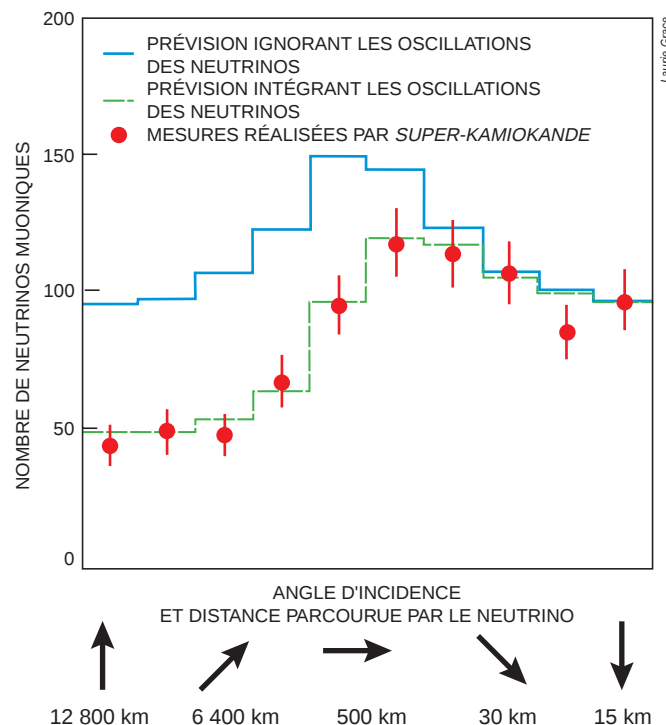
Si les seuls neutrinos possibles sont les trois actuellement connus, les données que nous avons recueillies montrent que les neutrinos muoniques se transforment en neutrinos tauïques. Selon

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 bascule, 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.

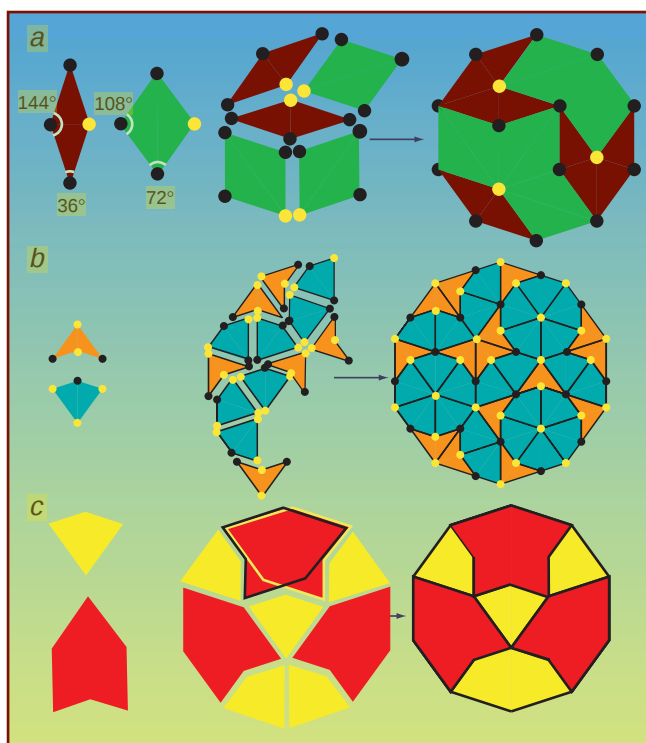
*C'est de la folie, mais il y a une méthode.
Hamlet, acte 2, scène 2.*

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,

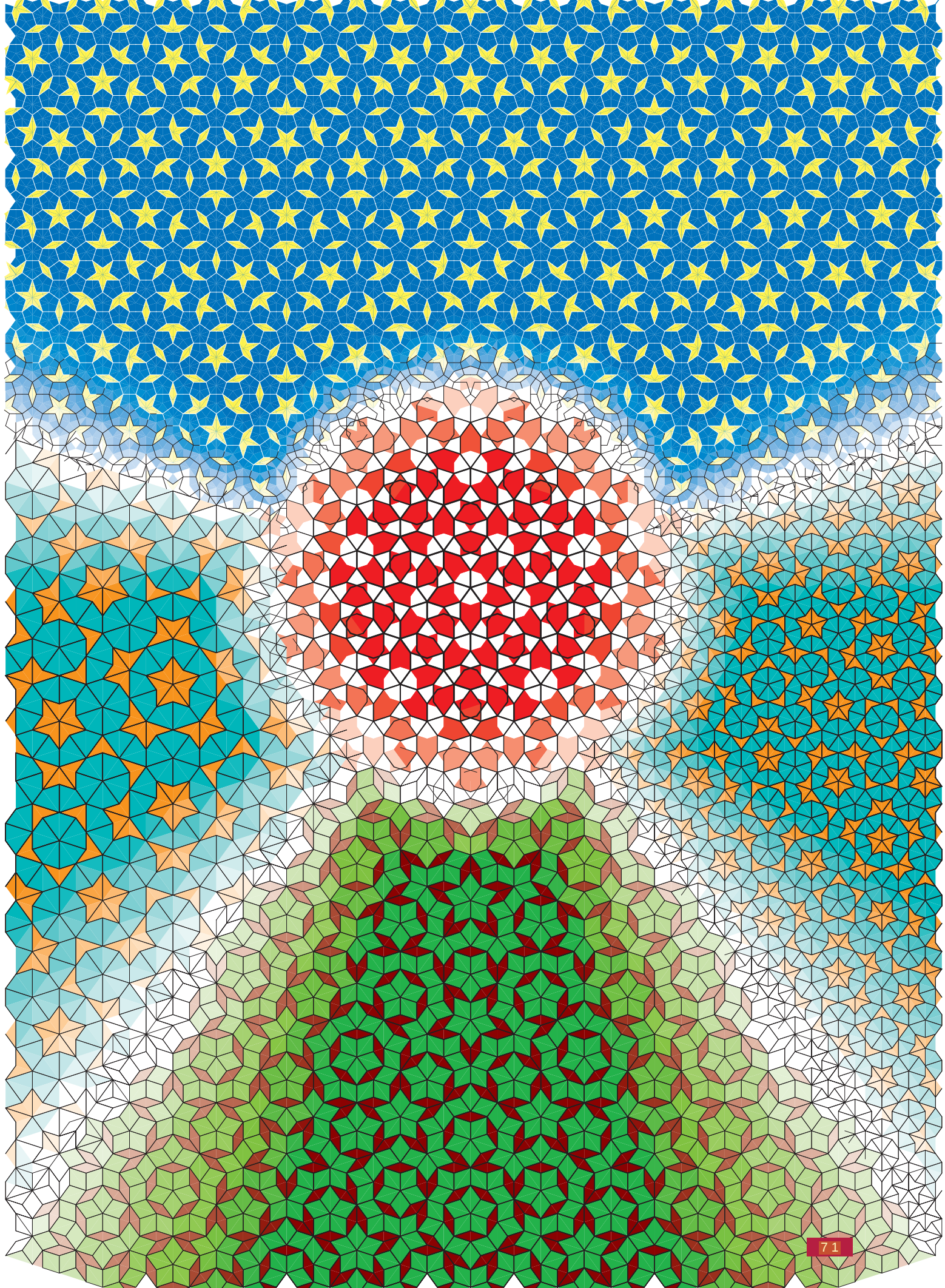
et un autre exemple tout aussi spectaculaire concerne la découverte des quasi-cristaux en 1984.

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.

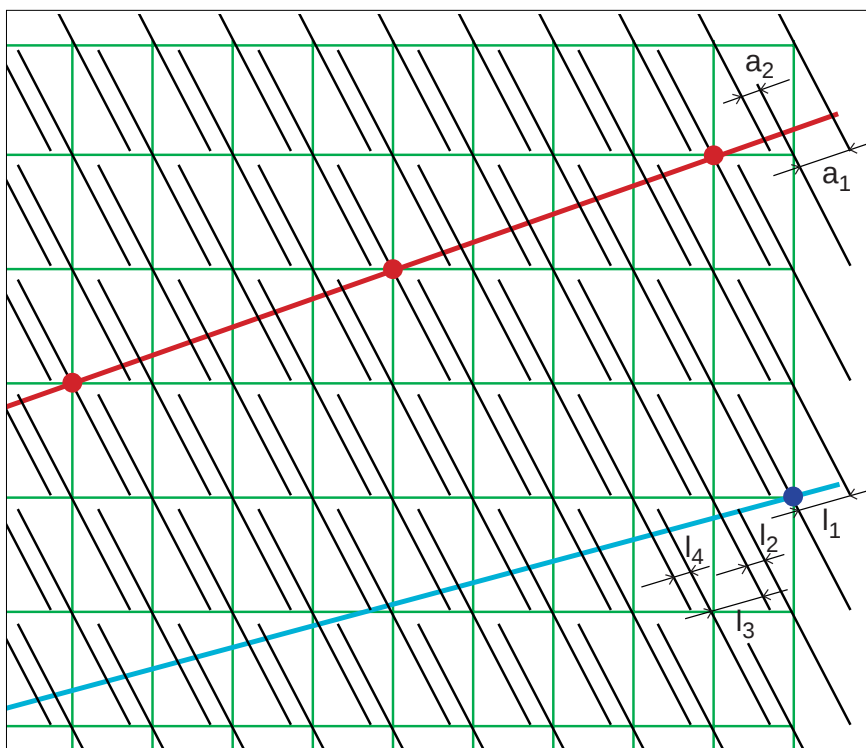
Hélas pour le réalisme, les atomes ne sont pas des losanges ou des rhomboèdres, et une forme de Penrose correspondrait plutôt à un agrégat de plusieurs atomes. Il faudrait «décorer» avec des atomes un losange (à deux dimensions) ou un rhomboèdre (à trois dimensions) de façon que le résultat global soit 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.