

bidimensionnel plausible décrit en détail dans un ouvrage, *The Planiverse* (1984), qui met en scène toutes ses idées.

Le planivers de Dewdney est un véritable tour de force. Le chercheur y dépeint un monde complet avec ses propres lois de la physique, de la chimie (dont une classification périodique de 16 éléments) et de la biologie, le tout apparemment sans contradictions. On y trouve aussi les plans et le principe de fonctionnement d'incroyables machines bidimensionnelles allant de la serrure à la machine à vapeur. Dewdney y répondait aussi au cosmologiste britannique Gerald Whitrow, qui avançait un argument empêchant le développement d'une intelligence dans un espace bidimensionnel : à cause d'un problème topologique *a priori* insurmontable, deux neurones ne peuvent se croiser.

Whitrow écrivait qu'«à trois dimensions ou plus, n'importe quel nombre de cellules nerveuses peuvent être reliées par paires sans que leurs connexions se croisent, tandis qu'à deux dimensions cela n'est possible que pour quatre cellules au maximum». Dewdney a réfuté cette hypothèse en proposant un dispositif bidimensionnel d'intersection d'impulsions nerveuses sans interférences. Il a montré qu'un cerveau bidimensionnel aurait une complexité comparable à celle d'un cerveau à trois dimensions, mais que son rythme de fonctionnement serait plus lent à cause des nombreuses interruptions subies par les impulsions nerveuses. Cette possibilité théorique a été mise en pratique avec les automates cellulaires à deux dimensions, comme le jeu de la vie du mathématicien britannique John Conway, disparu en 2020, dont on a démontré qu'il pouvait simuler une machine de Turing universelle (c'est-à-dire capable de réaliser n'importe quel calcul).

Dans toutes les disciplines scientifiques, les chercheurs sont confrontés à des systèmes intéressants en deux dimensions. Pour utiliser les microscopes, les biologistes font des coupes bidimensionnelles, dont la superposition permet de reconstituer l'organe étudié en trois dimensions. En physique et en chimie, une question se pose : la nature se comporte-t-elle différemment dans le monde à deux dimensions ? La théorie de l'adsorption sur une surface, par l'Américain Irving Langmuir, en 1918, ou la solution du modèle d'Ising à deux dimensions, par l'Américain d'origine norvégienne Lars Onsager, en 1944, en sont deux exemples.

En 1980, le physicien allemand Klaus von Klitzing a découvert l'effet Hall quantique, dans lequel la conductivité transverse d'un matériau à basse température et soumis à un fort champ magnétique extérieur prend des valeurs quantifiées. La description de ce phénomène oblige à considérer un système d'électrons à deux dimensions. À la même époque, les spécialistes ont commencé à utiliser des

films de cristaux liquides épais de seulement quelques molécules pour étudier le comportement de matériaux bidimensionnels. Plus récemment, en 2004, les physiciens d'origine russe Andre Geim et Konstantin Novoselov, Prix Nobel de physique en 2010, ont réussi à

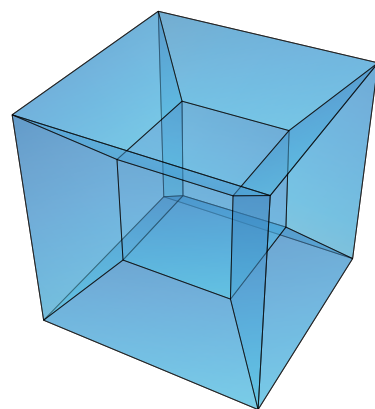
Les propriétés du graphène sont toutes liées à sa bidimensionnalité

extraire, à partir du graphite, du graphène, un matériau cristallin bidimensionnel théorisé dès 1947. Les propriétés mécanique, thermique et électronique de ce matériau sont toutes liées à sa bidimensionnalité.

DES ARGUMENTS POUR JUSTIFIER LE NOMBRE TROIS

La première discussion concernant le nombre de dimensions de l'espace remonte aux Pythagoriciens, dont Aristote a repris les considérations dans son *Traité du Ciel* en professant que «le monde et tout ce qu'il contient est déterminé par le nombre trois, puisque la fin, le milieu et le commencement forment le nombre de ce qui est un tout, et que le nombre donné est la triade». Dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, publié en 1632, Galilée a apporté un argument géométrique affirmant qu'il n'y a pas plus de trois dimensions car par un point ne peuvent concourir plus de trois droites perpendiculaires deux à deux.

Dans un de ses premiers écrits, Emmanuel Kant tenta vainement de démontrer que la tridimensionnalité de l'espace était une conséquence de la loi de gravitation universelle d'Isaac Newton qui stipule que les corps s'attirent en raison inverse du carré de leur distance. Cette remarque est d'importance car, pour la première fois, le problème de la dimensionnalité de l'espace est envisagé non pas du point de vue métaphysique ou géométrique, mais par une considération physique interprétant la relation liant la force entre deux corps à la distance r qui les sépare. La proposition de Kant peut être aisément démontrée, et même généralisée, grâce au théorème de Gauss : dans un espace à n dimensions, la force de gravitation varie comme $1/r^{n-1}$. Ainsi, la loi de



Ce cube de dimension quatre, ou hypercube, est obtenu en généralisant une opération simple. Quand on duplique un segment par translation et qu'on relie les segments par des arêtes, on forme un carré. De même, dédoubler un carré permet de former un cube. La transformation opérée sur ce dernier donne un hypercube. Celui-ci présente deux fois plus de sommets qu'un cube de dimension trois, et chaque sommet est connecté à quatre autres (trois pour le cube de dimension trois).

gravitation de Newton est une conséquence directe des trois dimensions de notre espace ; dans un espace à quatre dimensions, l'attraction gravitationnelle serait proportionnelle au cube de la distance.

Dans un article publié en 1917, le physicien autrichien Paul Ehrenfest s'est intéressé au mouvement gravitationnel des astres dans un espace à n dimensions. Il a montré que le problème ne possède des solutions stables et bornées qu'à deux ou trois dimensions. Et si l'on impose à l'énergie d'interaction des deux corps

de tendre vers zéro quand leur distance tend vers l'infini (ce qui est raisonnable, car deux corps infiniment distants interagissent infiniment peu), il ne reste plus que le cas tridimensionnel. Ainsi, c'est dans ce cas, et dans ce cas seulement, que les planètes peuvent avoir des orbites stables durant plusieurs centaines de millions d'années, une condition *a priori* nécessaire à l'apparition de la vie.

La dimensionnalité de l'espace a aussi des conséquences sur le monde des atomes. Nous constatons quotidiennement que la matière est

UN MONDE À DIX DIMENSIONS !

Un des plus grands défis des physiciens est de réussir à unifier la relativité générale et la mécanique quantique, deux théories réputées incompatibles. Albert Einstein a développé la première en 1915. Elle décrit comment l'énergie et la matière déforment la toile de l'espace-temps à quatre dimensions (une de temps et trois d'espace) et, à l'inverse, elle indique comment la courbure de l'espace-temps détermine la trajectoire de la matière qui s'y déplace en « chute libre ». En d'autres termes, la force gravitationnelle résulte de la courbure de l'espace-temps. À peu près à la même époque, de nombreux physiciens ont découvert les lois qui régissent le monde microscopique. La mécanique quantique et ses développements ultérieurs décrivent les particules fondamentales et leurs interactions.

Certaines situations, tels les premiers instants du Big Bang ou les régions proches de la singularité d'un trou noir, nécessitent une formulation quantique de la gravitation, car les effets quantiques y sont *a priori* importants. Mais les tentatives de quantification directe de la relativité générale, suivant une procédure utilisée avec succès pour l'interaction électromagnétique, ont échoué. Les calculs dans ce cadre conduisent à des grandeurs infinies, non physiques, signes d'une défaillance de cette approche.

À partir de la fin des années 1960, des chercheurs ont découvert par hasard une piste prometteuse pour concilier ces deux théories. En remplaçant des particules ponctuelles par des petites cordes vibrantes, il était possible d'éliminer les infinis précédemment rencontrés. Le formalisme mathématique de cette théorie est très complexe et repose sur de nombreuses notions comme des symétries dites « conformes », où les transformations conservent les angles mais pas les distances. Les physiciens ont rapidement compris que pour avoir une théorie des cordes cohérente et préservant ces symétries, il fallait

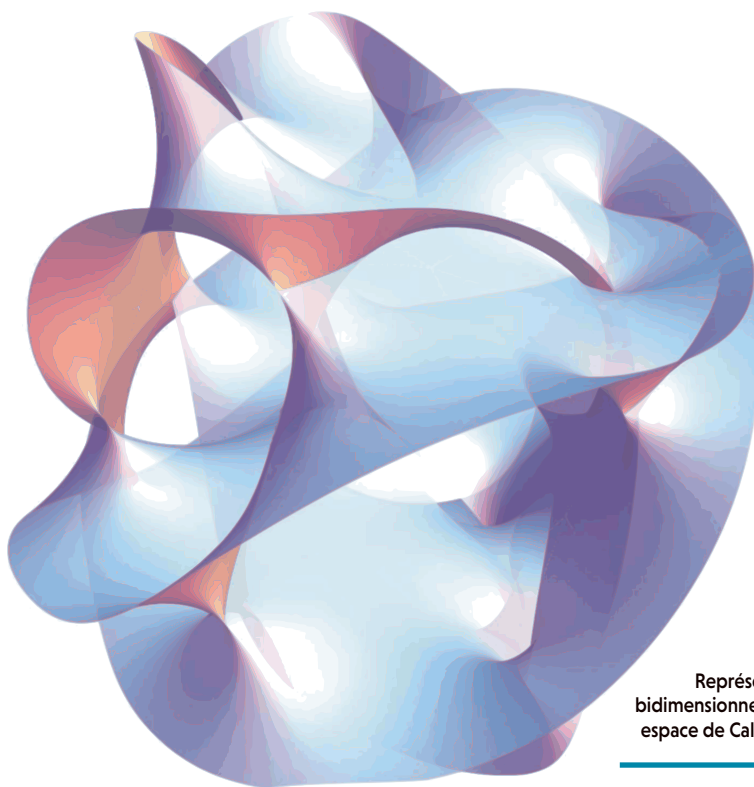
supposer que l'espace-temps contienne vingt-six dimensions !

Cette première version de la théorie des cordes était limitée, car elle ne permettait pas de décrire les particules présentant un spin demi-entier, tel l'électron. En 1971, Pierre Ramond, de l'université de Floride, puis André Neveu, alors au Laboratoire de physique théorique, à Orsay, et John Schwarz, de l'université de Princeton, ont modifié la théorie pour y introduire une nouvelle symétrie, la « supersymétrie », qui relie les particules de spin entier et celles de spin demi-entier. C'est la théorie des supercordes. La contrainte de cohérence imposait dans ce cas d'avoir un espace-temps à dix dimensions.

Comment passer d'une théorie à dix dimensions à une théorie à quatre dimensions (trois d'espace et une de temps) ? Que faire des six autres

dimensions, où sont-elles ? La réponse consiste à les compacter. En chaque point de l'espace, les six dimensions supplémentaires sont enroulées sur elles-mêmes. Comme elles ne sont pas étendues, nous ne pouvons les percevoir directement. Ces six dimensions forment un objet mathématique nommé « espace de Calabi-Yau ». Chacun de ces espaces de Calabi-Yau conduit à un modèle d'univers avec ses propres propriétés. L'estimation du nombre de configurations possibles la plus souvent avancée est 10^{90} , mais cela pourrait être beaucoup plus. Comment alors savoir quelle est la configuration qui correspond à l'univers réel ? Pour l'instant, les physiciens n'ont pas la réponse.

SEAN BAILLY
journaliste à *Pour la Science*



Représentation bidimensionnelle d'un espace de Calabi-Yau.