

LA VIE POUSSÉE À SES EXTRÉMITÉS

La mer Morte constitue un lac qualifié de « mort », parce que sa salinité est telle que les organismes aquatiques macroscopiques, tels les poissons et les plantes aquatiques, ne peuvent y vivre. Cependant, des micro-organismes adaptés à la très forte salinité sont présents.

À l'aide de techniques particulières telles que la microscopie à fluorescence par coloration au DAPI, Daniel Ariztegui (l'un des auteurs) et son collègue Camille Thomas, à l'Université de Genève, ont détec-

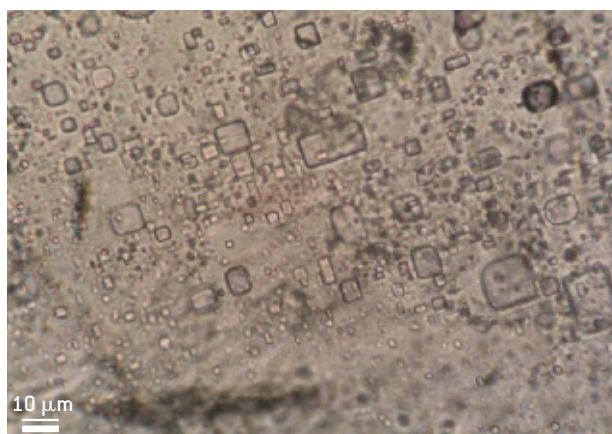
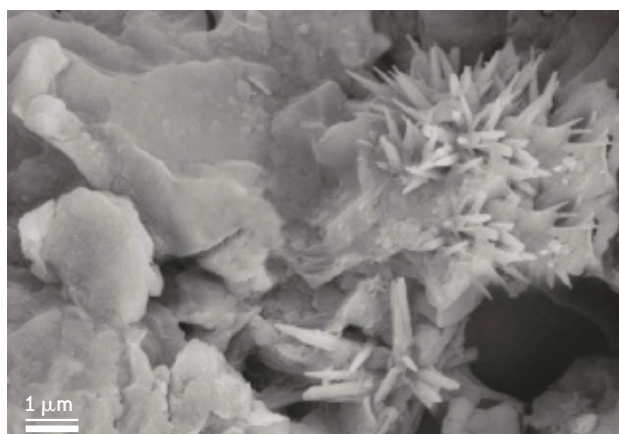
té la présence de microbes dans les 130 premiers mètres de sédiments de la carotte prélevée au centre du lac. Il reste à déterminer s'il s'agit de microbes encore vivants, ou d'une activité microbienne passée.

Plusieurs intervalles lithologiques sont dominés par l'aragonite, avec des cristaux en forme d'aiguilles et d'étoiles, un carbonate de calcium précipité directement (voir la photographie ci-dessous à gauche). Des précurseurs de minéraux ferreux en forme de glo-

bules ou de framboises sont également présents, ce qui indique une minéralisation d'origine microbienne. De même, la rive occidentale de la mer Morte présente aujourd'hui de minces tapis microbiens de couleur noire, intercalés avec des couches blanches d'aragonite.

Les intervalles interglaciaires riches en sel contiennent de petites inclusions fluides (voir la photographie ci-dessous à droite), qui sont en cours d'étude en collaboration avec Véronique Gardien,

de l'Université de Lyon. On espère ainsi déterminer la température et d'autres paramètres physico-chimiques ayant prévalu lors de la précipitation des cristaux de sel. De façon analogue, ces inclusions fluides sont examinées pour déceler des restes microbiens qui y auraient été piégés. L'étude de l'influence microbienne sur ces dépôts devrait apporter un éclairage nouveau sur les conditions dominantes dans lesquelles les sédiments de la mer Morte se sont accumulés au fil du temps.



Camille Thomas

Mais les découvertes les plus frappantes de l'opération de forage étaient d'une part une couche de galets trouvée à environ 235 mètres sous la surface des sédiments et correspondant à la période interglaciaire ayant précédé l'Holocène, d'autre part la présence d'une activité microbienne jusqu'à 130 mètres au-dessous du fond du lac (voir l'encadré ci-dessus). La couche de galets semble être un dépôt de plage et rien de tel n'a été trouvé à aucun autre niveau dans les carottes. Cette couche indiquerait que la mer Morte s'est pratiquement asséchée il y a environ 120 000 ans. Des analyses sont en cours pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Aujourd'hui, le niveau de la mer Morte baisse rapidement parce qu'il ne s'y déverse pas d'eau douce : presque toutes les eaux de ruissellement sont utilisées par les populations de la région. Si l'hypothèse de l'assèchement de la mer Morte est confirmée, cela signifie que dans le passé géologique, sans intervention de l'homme, le ruissellement aurait fortement diminué ou se serait

presque interrompu. Une situation qui est à comparer avec celle d'aujourd'hui : les modèles climatiques prédisent que, en raison du renforcement de l'effet de serre dû aux activités humaines, cette région sera dans un proche avenir plus aride, avec des températures moyennes plus élevées. Cette précieuse ressource qu'est l'eau douce, déjà pleinement exploitée, deviendra encore plus rare.

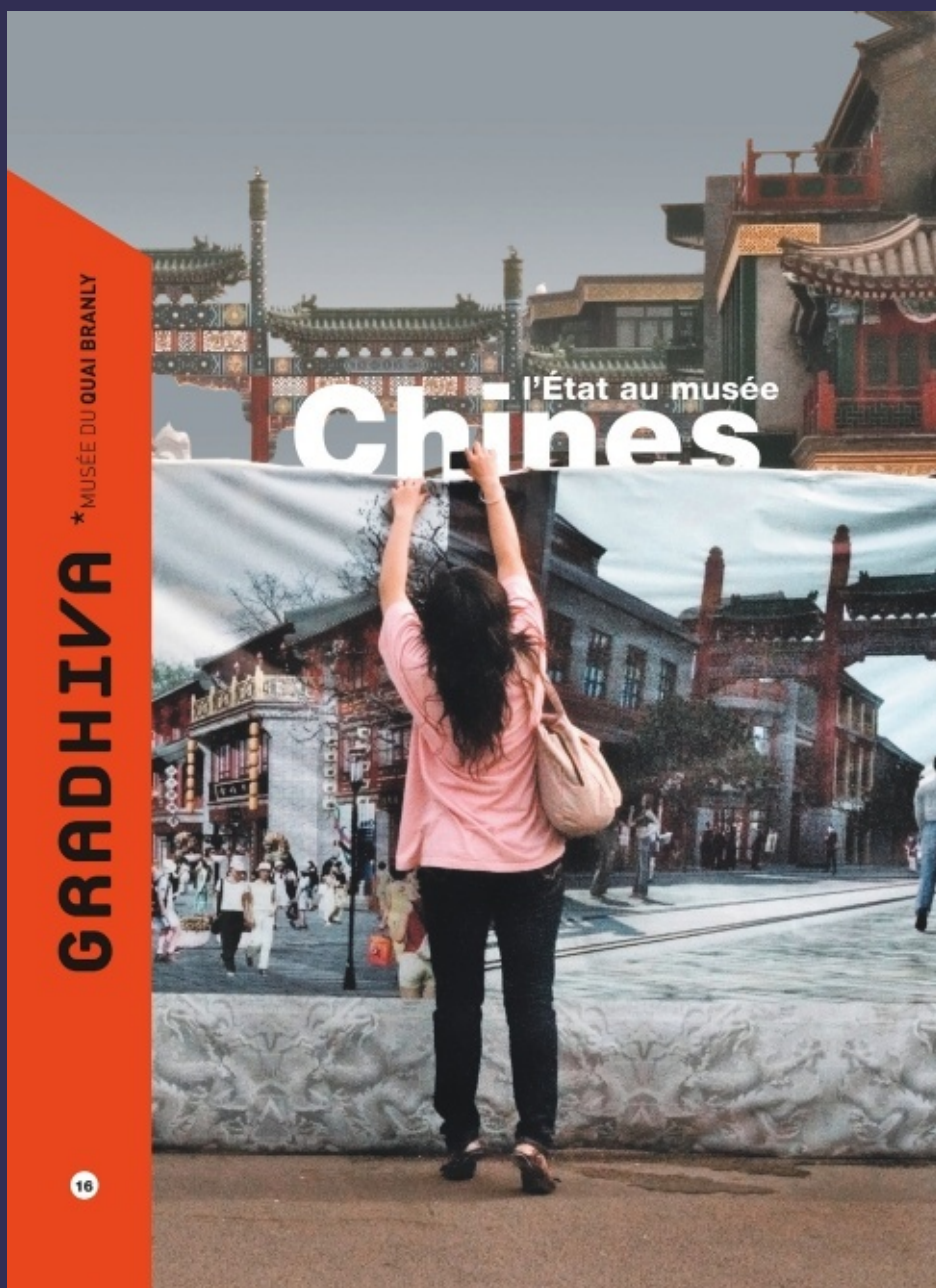
Ainsi, le forage dans les fonds de la mer Morte a d'ores et déjà livré quelques informations intéressantes. Il ne s'agit là que d'un début : l'étude détaillée des carottes prélevées est en cours et ses résultats sont attendus avec impatience par les scientifiques. Des résultats qui permettront non seulement de préciser l'histoire géologique du bassin de la mer Morte, mais aussi de mieux comprendre les conditions environnementales ayant régné durant l'émergence de l'espèce humaine et ses migrations par le corridor de la mer Morte, et de mieux évaluer les risques climatiques et sismiques aux différentes échelles de temps. ■

★ MUSÉE DU QUAI BRANLY

là où dialoguent les cultures

LA REVUE GRADHIVA★

EN VENTE EN LIBRAIRIE
ET EN LIGNE SUR <http://www.librairie-epona.fr/revues/gradhiva.html>



Chines, l'État au musée

Coordonné par Anne-Christine Trémon
et Brigitte Baptandier

Comment et pourquoi les musées sont-ils créés en Chine ? Quelles politiques de valorisation du patrimoine, de l'histoire, de l'art sont actuellement mises en œuvre, aussi bien en République populaire de Chine (RPC) qu'à Taïwan ? Souvent moins connus et étudiés, **les musées et autres outils de transmission patrimoniale participent eux aussi du développement chinois** : alors qu'on en comptait une vingtaine en 1949, ils sont aujourd'hui plus de 2 300 en RPC. S'intéresser à leur genèse et à leur fonctionnement, c'est être directement aux prises avec la société chinoise d'aujourd'hui et les grandes questions qui la traversent : **statut des minorités, interactions souvent conflictuelles entre les différents échelons de gouvernement, place accordée à la religion, regard et discours du pays sur ses traditions et son histoire**, etc. Autant de problématiques abordées par ce nouveau numéro de GRADHIVA qui s'attache à proposer une ethnographie de divers projets muséaux et patrimoniaux et, partant, à esquisser une anthropologie politique des États-nations chinois et taïwanais.

Retrouvez tous les numéros de GRADHIVA sur www.quaibrantly.fr/gradhiva

Bon nombre de physiciens
théoriciens soutiennent
une vision pointilliste du monde
aux plus petites échelles.
Toutefois, un examen des lois
de la nature suggère
un monde physique continu.

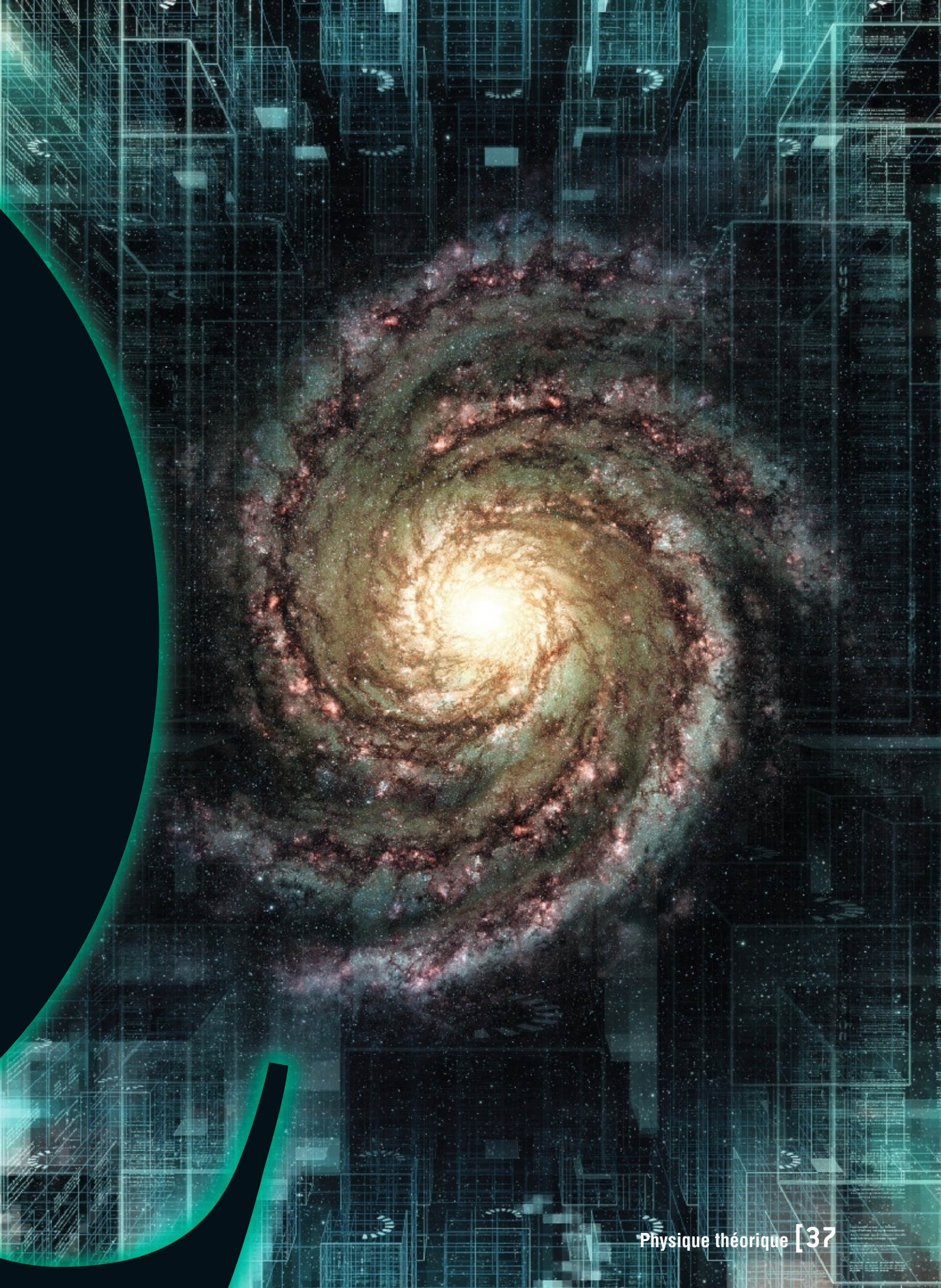
Quantique mais non discret

David Tong

L'ESSENTIEL

- On se représente en général la mécanique quantique comme discrète par nature. Toutefois, ses équations sont formulées en termes de grandeurs continues. Les valeurs discrètes, ou quanta, émergent de la façon dont le système est contraint.
- Selon les partisans d'un monde discret, les grandeurs physiques sont discrètes, mais donnent l'illusion d'un continuum à grande échelle.
- L'idée d'un monde discret semble incompatible avec la chiralité, une asymétrie gauche-droite de certaines particules.

© Kenn Brown/Mandalithic Studios



À la fin du XIX^e siècle, le mathématicien allemand Leopold Kronecker déclarait : « Dieu a créé les nombres entiers, tout le reste est l'œuvre de l'homme. » Il pensait que les nombres entiers jouent un rôle fondamental en mathématiques. Pour les physiciens d'aujourd'hui, cette citation a un autre retentissement. Elle fait écho à une vision qui s'est imposée ces dernières décennies, à savoir que la nature serait essentiellement discrète et non continue, que les éléments de base de la matière et de l'espace-temps peuvent être comptés un par un. Cette idée remonte aux atomistes de la Grèce ancienne, et elle nous parle davantage encore à l'ère numérique. De nombreux physiciens en sont arrivés à se représenter le monde naturel comme un immense ordinateur décrit par des bits d'information, et les lois de la physique comme un algorithme, semblable à la pluie de chiffres verts que Neo voit à la fin du film *Matrix* (1999).

Mais est-ce vraiment ainsi que les lois de la physique sont faites ? Même si cela n'est pas dans l'air du temps, je suis loin d'être le seul scientifique à penser que la réalité est au fond continue plutôt que discrète. Selon cette vision, le monde est un continuum : zoomez tant que vous voudrez, vous ne trouverez pas d'éléments de base irréductibles.

Les quantités physiques ne sont pas des nombres entiers, mais des nombres réels, des nombres continus avec une infinité de chiffres après la virgule. Les fans de *Matrix* seront déçus de l'apprendre, mais les lois actuelles de la physique présentent certaines caractéristiques que personne ne sait simuler sur ordinateur, quelle que soit sa capacité de mémoire. Il est essentiel

L'AUTEUR



David TONG est professeur de physique théorique à l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne.

Cet article est adapté de l'essai présenté en 2011 par D. Tong au troisième concours d'essais de l'Institut des questions fondamentales (FQXi, une association internationale à but non lucratif, www.fqxi.org), où la question posée était : « La réalité est-elle numérique ou analogique ? » L'essai de D. Tong a été classé deuxième ex aequo.

BIBLIOGRAPHIE

A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press (2^e édition), 2012.

D. B. Kaplan, *Chiral symmetry and lattice fermions*, <http://arxiv.org/abs/0912.2560>.

F. Tanedo, *Helicity, chirality, mass, and the Higgs*, www.quantumdiaries.org/2011/06/19/helicity-chirality-mass-and-the-higgs.

d'intégrer cet aspect pour développer une théorie physique complètement unifiée.

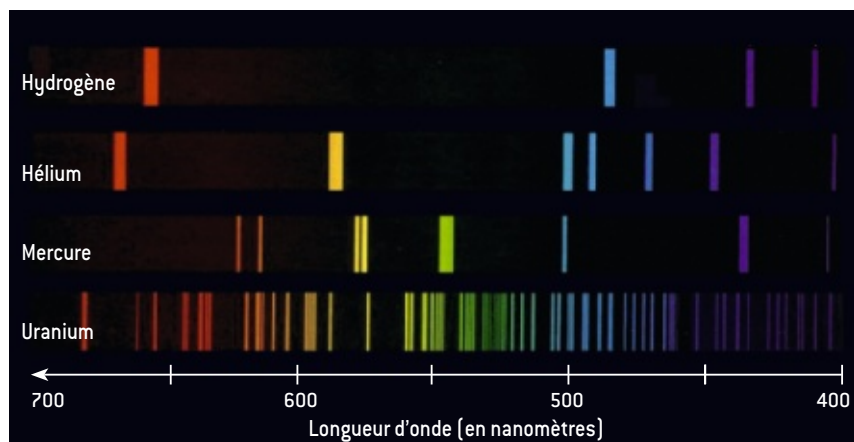
Le débat entre le continu et le discret est l'un des plus anciens de la physique. Tandis que les atomistes concevaient la réalité comme discrète, d'autres philosophes grecs (Aristote par exemple) se la représentaient comme un continuum. À l'époque d'Isaac Newton, aux XVII^e et XVIII^e siècles, les philosophes de la nature étaient partagés entre théories corpusculaires (discrètes) et théories ondulatoires (continues). À l'époque de Kronecker, les avocats de l'atomisme, tels que John Dalton, James Clerk Maxwell et Ludwig Boltzmann, savaient même dériver, sur des bases atomistiques, les principes de la chimie et de la thermodynamique. Mais de nombreux scientifiques restaient sceptiques.

Wilhelm Ostwald, lauréat du prix Nobel de chimie en 1909, faisait remarquer que les principes de la thermodynamique ne se réfèrent qu'à des quantités continues telles que l'énergie. De même, la théorie électromagnétique de Maxwell décrit les champs électriques et magnétiques comme des grandeurs continues. En 1882, Max Planck, qui sera un précurseur de la physique quantique, concluait un important article par ces mots : « Malgré le succès actuel de la théorie atomique, elle devra à terme être abandonnée au profit de l'hypothèse d'une matière continue. »

Des entiers arbitraires

L'un des arguments les plus puissants des partisans du continu est l'apparence arbitraire du discret. À titre d'exemple, considérons le nombre de planètes dans le Système solaire. À l'école, on m'a appris qu'il y en avait neuf. En 2006, les astronomes ont officiellement déchu Pluton de son rang de planète, et il n'en reste plus que huit. Dans le même temps, ils ont introduit une liste de « planètes naines ». Si vous incluez ces dernières, leur nombre s'élève alors à 13.

En résumé, la seule réponse honnête à la question du nombre de planètes est que cela dépend de la façon dont vous comptez. La ceinture de Kuiper, au-delà de Neptune, contient des objets dont la taille varie entre quelques micromètres et quelques milliers de kilomètres. Vous ne pouvez compter le nombre de planètes que si vous faites une distinction arbitraire entre ce qui est une planète, ce qui est une planète naine, et ce



1. LES SPECTRES D'ÉMISSION DES ATOMES ont des parties discrètes, constituées de longueurs d'onde que l'on peut étiqueter à l'aide de nombres entiers.

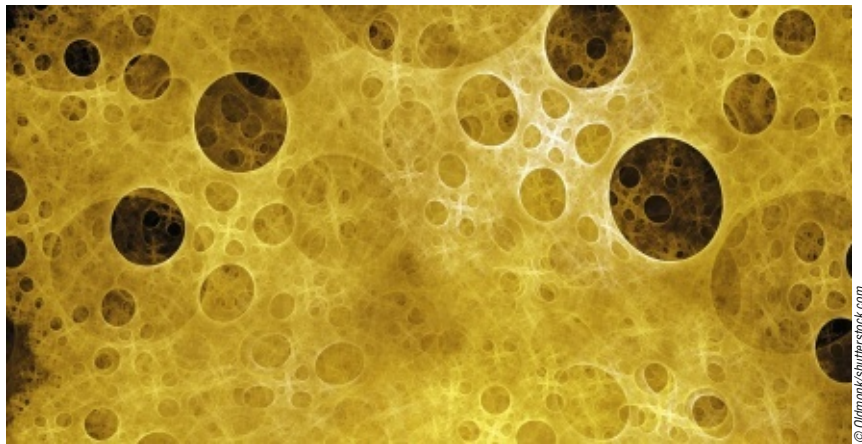
qui est simplement un gros morceau de roche ou de glace.

La mécanique quantique a transformé le débat discret-continu (le terme *quantum* a été introduit pour désigner une quantité minimale bien définie, d'énergie en l'occurrence). Si la définition d'une planète peut être arbitraire, ce n'est pas le cas de la définition d'un atome ou d'une particule élémentaire. Les entiers qui numérotent les éléments chimiques sur le tableau de Mendeleïev (et qui, nous le savons aujourd'hui, correspondent aux nombres de protons des atomes en question) sont objectifs. Quels que soient les développements que la physique nous réserve, je suis prêt à miser gros sur le fait que nous n'observerons jamais d'élément à $\sqrt{500}$ protons, situé entre le titane et le vanadium. Les entiers en physique atomique ont vocation à rester.

Des entiers nés d'une équation continue

Un autre exemple est fourni par la spectroscopie, l'étude de la lumière émise ou absorbée par la matière. Un atome d'un type donné ne peut émettre que de la lumière de longueurs d'onde (ou couleurs) particulières, ce qui constitue une empreinte caractéristique de chaque élément. Contrairement aux empreintes digitales humaines, les spectres atomiques obéissent à des règles mathématiques précises, et ces règles mettent en jeu des entiers. Les premières tentatives pour comprendre la théorie quantique, notamment par le physicien danois Niels Bohr, plaçaient l'aspect discret au cœur de l'édifice.

Mais l'interprétation de Bohr n'a pas eu le dernier mot. En 1925, l'Autrichien Erwin Schrödinger a développé une approche alternative de la théorie quantique, fondée sur la notion d'ondes. L'équation qu'il a formulée pour décrire l'évolution de ces ondes au cours du temps ne contient que des grandeurs continues, et pas d'entiers. Mais quand on résout l'équation de Schrödinger pour un système donné, on assiste à un tour de magie mathématique. Prenons l'atome d'hydrogène : les électrons sont en orbite autour du noyau à des niveaux d'énergie bien particuliers. Cela se traduit par un spectre spécifique de l'atome. L'atome est analogue à un tuyau d'orgue, qui produit une série discrète de notes alors que le mouvement de l'air est continu. Au moins en ce qui concerne l'atome, la leçon est claire : Dieu n'a pas fait les nombres entiers ; il a



2. LE NOMBRE DE DIMENSIONS n'est pas forcément un entier. Ainsi, cette éponge fractale peut être caractérisée par une dimension comprise entre deux et trois.

fait les nombres réels, et le reste est le fait de l'équation de Schrödinger.

En d'autres termes, les entiers ne sont pas des hypothèses de la théorie, comme le pensait Bohr, mais des conséquences. Les entiers sont un exemple de ce que les physiciens appellent une quantité émergente. Dans cette perspective, le terme de mécanique « quantique » est impropre : la théorie ne contient pas de quanta (c'est-à-dire des quantités discrètes) dans sa formulation. Dans des systèmes tels que l'atome d'hydrogène, les processus décrits par la théorie engendrent du discret à partir de la continuité sous-jacente.

Peut-être plus surprenant encore, l'existence d'atomes, ou de toute particule élémentaire, n'est pas une hypothèse de nos théories. Les physiciens enseignent au quotidien que les briques de la nature sont des particules discrètes telles que l'électron ou le quark. C'est faux. Les éléments fondamentaux de nos théories ne sont pas des particules, mais des champs : des objets continus, semblables à des fluides, qui occupent tout l'espace. Les champs électriques et magnétiques en sont des exemples familiers, mais il existe aussi un champ électronique pour l'électron, un champ pour chaque type de quark, un champ de Higgs, et ainsi de suite. Les objets que nous qualifions de particules élémentaires ne sont pas fondamentaux, ce sont en fait des modes d'oscillation de champs continus.

Un sceptique pourrait rétorquer que des entiers sont bien inscrits dans les lois de la physique. Par exemple, ces lois décrivent trois types de neutrinos, six types de quarks (avec pour chacun trois variétés ou « couleurs »), et ainsi de suite. Des entiers, partout des entiers. Vraiment ? Tous ces exemples

dénombrant en fait les espèces de particules du modèle standard de la physique des particules, des quantités pour lesquelles il est difficile d'obtenir une précision mathématique quand les particules interagissent. En effet, ces dernières se transforment : un neutron peut se scinder en un proton, un électron et un neutrino. Devrions-nous alors considérer que nous avons affaire à une, trois ou quatre particules ? L'affirmation de l'existence de trois sortes de neutrinos, six sortes de quarks, etc., est un artifice dû à la non-prise en compte des interactions des particules.

Un nombre incertain de dimensions ?

Un autre exemple d'entier intervenant dans les lois de la physique est le nombre de dimensions de l'espace. On en observe trois. Mais en sommes-nous certains ? Le mathématicien franco-américain Benoît Mandelbrot a fait remarquer que le nombre de dimensions n'est pas nécessairement un entier. La côte de la Grande-Bretagne, par exemple, a une dimension (dite fractale) d'environ 1,3. De plus, dans de nombreuses propositions de théories unifiées, telles que la théorie des cordes, il y a ambiguïté sur le nombre de dimensions de l'espace : des dimensions spatiales peuvent émerger ou se dissoudre.

Je me hasarde à dire qu'il pourrait n'y avoir qu'un seul entier véritable dans toute la physique. Les lois de la physique ne prennent en compte qu'une seule dimension pour le temps. S'il n'y avait pas précisément une dimension temporelle, il semble que la physique serait incohérente.

Même si nos théories actuelles supposent que la réalité est continue, beaucoup

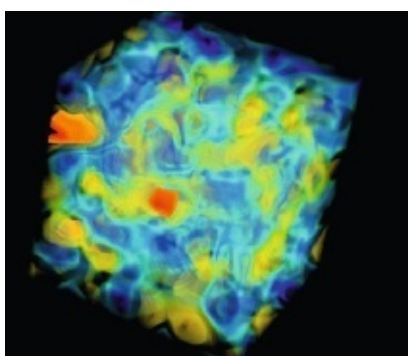
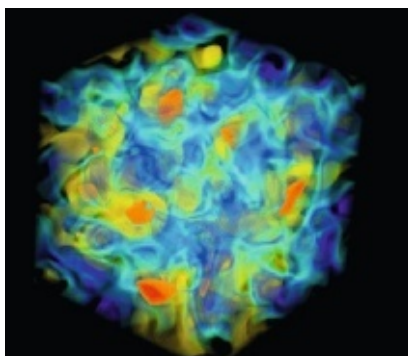
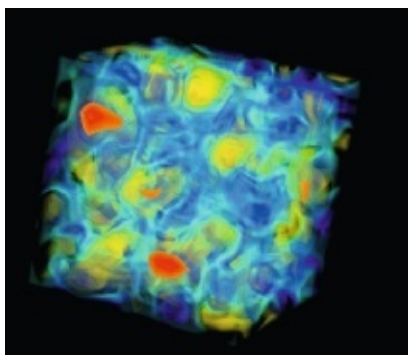
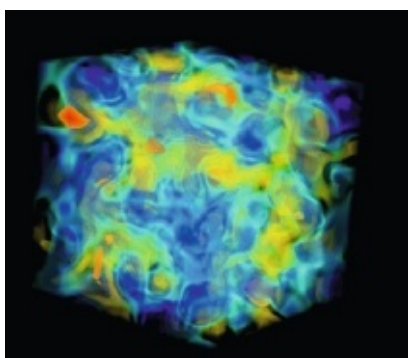
de mes collègues physiciens pensent malgré tout qu'une réalité discrète est sous-jacente. Ils mettent en avant des exemples montrant comment la continuité peut émerger de la quantification. Aux échelles macroscopiques de notre expérience quotidienne, l'eau contenue dans un verre semble lisse et continue. C'est seulement quand on l'examine de beaucoup plus près que l'on discerne les constituants atomiques. Un mécanisme de ce type pourrait-il être à la base de la physique ? Si nous regardions à un niveau plus profond, les champs quantiques, voire l'espace-temps lui-même, révéleraient-ils eux aussi une structure sous-jacente discrète ?

Nous ignorons la réponse à cette question, mais 40 années de tentatives de simulation du modèle standard sur ordinateur livrent un indice. Pour réaliser une telle simulation, il faut tout d'abord prendre les équations, exprimées en termes de grandeurs continues, et en trouver une formulation discrète, compatible avec les bits d'information que les ordinateurs manipulent. Or en dépit de plusieurs décennies d'efforts, personne n'y est encore parvenu. Et cela constitue l'un des problèmes ouverts les plus importants de la physique théorique, bien que ce soit rarement évoqué.

Problématiques fermions

Les physiciens ont développé une version discrétisée de la théorie quantique des champs, la « théorie des champs sur réseau », où l'espace-temps continu est remplacé par un réseau de points. Les ordinateurs évaluent les champs en ces points pour approximer un champ continu. Mais cette technique a des limites. La difficulté vient des électrons, des quarks et des autres particules de matière, les fermions (contrairement aux autres particules – les bosons –, si l'on fait tourner un fermion de 360 degrés, on ne retrouve pas l'objet de départ ; pour cela, il faut le faire tourner de 720 degrés). Les fermions (ou plutôt leurs champs) résistent à la mise sur réseau. Dans les années 1980, le Danois Holger Bech Nielsen et le Japonais Masao Ninomiya ont prouvé un théorème selon lequel il est impossible de discrétiser le type le plus simple de fermion.

Cependant, la validité de tels théorèmes n'est pas supérieure à celle de leurs hypothèses. Dans les années 1990, des théoriciens, en particulier David Kaplan, maintenant à l'Université de Washington, et Herbert



3. CETTE VISUALISATION d'une grandeur nommée charge topologique à quatre instants différents provient d'une simulation numérique sur réseau (un ensemble constitué d'un nombre fini de points) de la chromodynamique quantique – la théorie décrivant les quarks, les gluons et l'interaction forte à laquelle ces particules sont soumises. Une telle simulation sur réseau ne semble pas réalisable pour certains types de particules intervenant dans le modèle standard, qui décrit aussi l'interaction électromagnétique et l'interaction faible.

Neuberger de l'Université Rutgers, ont introduit diverses méthodes astucieuses pour mettre des fermions sur réseau. Les théories quantiques des champs se présentent sous de nombreuses formes, chacune avec différents types possibles de fermions, et l'on parvient maintenant à les formuler presque toutes sur réseau. Il ne reste qu'une classe de théories des champs que l'on ne sache toujours pas mettre sur réseau. Et malheureusement, le modèle standard en fait partie : nous savons manipuler toutes sortes de fermions hypothétiques, mais pas ceux qui existent en réalité.

Les fermions du modèle standard ont une propriété très particulière. Ceux qui tournent sur eux-mêmes dans le sens contraire des aiguilles d'une montre sont sensibles à l'interaction faible, mais pas ceux qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre. La théorie est dite chirale. Or une théorie chirale est délicate : des effets subtils, qualifiés d'anomalies, menacent en permanence de la rendre incohérente. Ces théories ont jusqu'à présent résisté à toutes les tentatives de simulation sur ordinateur.

Mais la chiralité n'est pas un défaut du modèle standard susceptible de disparaître dans une théorie plus profonde ; elle en est une caractéristique centrale. À première vue, le modèle standard, fondé sur trois forces liées les unes aux autres, apparaît comme une construction arbitraire. C'est seulement lorsqu'on réfléchit aux fermions chiraux que sa véritable beauté émerge. C'est un puzzle parfait, dont les trois composantes sont emboîtées de la seule manière possible. Dans le modèle standard, c'est la nature chirale de ses fermions qui permet à tous les éléments de bien s'imbriquer.

Les scientifiques ne savent pas très bien que conclure de notre incapacité à simuler complètement le modèle standard sur ordinateur. Il est difficile de tirer des conclusions solides d'une inaptitude à résoudre un problème ; il est possible que ce soit juste un problème très ardu qui finira par être résolu par des techniques classiques. Mais certains aspects du problème laissent penser qu'il est plus profond que cela. Les obstacles en cause sont intimement liés à des propriétés topologiques et géométriques. La difficulté de modéliser sur réseau des fermions chiraux indique peut-être quelque chose de plus important : que les lois de la physique ne sont pas, fondamentalement, discrètes. Nous n'habitons pas une simulation numérique. ■

**L'ESPCI ParisTech, l'ECPM, Chimie ParisTech
et l'ENSIC vous invitent au :**

FORUM HORIZON CHIMIE

Jeudi 31 Janvier 2013
9h00 / 18h00

**27^{ème}
édition**

**Entrée
libre**

Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique
75007 PARIS
Métro Invalides

Renseignements :
01 45 35 41 82
www.horizon-chimie.fr