

L'ÉTONNANTE DIVERSITÉ DES VARANIDÉS

Apparue en Asie centrale au Crétacé supérieur, la famille des varanidés n'est plus représentée aujourd'hui que dans l'Ancien Monde, en Afrique, en Asie, ainsi que dans l'écozone australasienne. Il existe plus de quatre-vingts espèces de varans : ces « lézards » sont généralement d'une taille considérable, avec une tête triangulaire, une langue bifide rétractile et un cou délié. Amputée, leur queue ne peut se régénérer. La majorité des varans est carnivore ou insectivore ; les milieux investis sont variés, allant du désert à la forêt, en passant par l'élément aquatique, ou encore les savanes. Ainsi, si le varan de



Le varan de Salvadori *Varanus salvadorii*, endémique de la Nouvelle-Guinée.

Komodo préfère les biotopes de prairie, celui de Mertens, australien, est amphibie, tandis que le *Varanus salvadorii* indo-malais grimpe avec aisance dans les arbres. Quant au varan du Nil, il est à son aise dans des milieux diversifiés, le facteur limitant étant ici l'eau disponible. Toutes les espèces sont ovipares. Fait notable, les « dragons de Komodo »

femelles se sont révélées capables, en captivité, de reproduction sans mâle (parthénogenèse). On découvre encore de nouveaux varanidés. En 1985, alors que l'herpétologue allemand Wolfgang Böhme visionnait un documentaire sur le Yémen, il identifia à l'écran un varan appartenant à une espèce inconnue. Grâce à des collègues, il finit par s'en

procurer des spécimens, l'animal étant baptisé *Varanus yemenensis*. Plus récemment, en 2010, sur l'île de Luçon (Philippines), on décrit un grand varan frugivore, le *Varanus bitatawa*. Enfin, la même année, ce fut au tour du varan sago (*Varanus obor*), propre à l'île de Sanana, dans les Moluques, de faire son entrée dans nos classifications zoologiques.

> protéines antimicrobiennes efficaces contre des bactéries responsables d'infections.

DES ORIGINES ENFIN ÉLUCIDÉES

La queue du « dragon de Komodo » est déprimée latéralement, comme chez les varanidés à tendance amphibie, et c'est un fait que *Varanus komodoensis* est un bon nageur. Cependant, avec son équipe, l'écologue Tim Jessop a pu montrer que le « dragon » était aussi une créature « casanière ». Éloigné de son territoire, l'animal fera en sorte de le rejoindre... sauf si l'expérimentateur l'a déplacé sur une autre île : il restera alors sur place sans tenter d'effectuer un retour à la nage. Ce moyen de déplacement a pourtant joué à coup sûr un rôle important quand, dans un passé géologique récent, ces animaux ont investi les petites îles de la Sonde. Il est vrai que jusqu'il y a 10 000 ans de cela, les différentes îles qu'occupe aujourd'hui le varan géant ont été périodiquement reliées, en fonction des variations du niveau de la mer. Mais la paléontologie nous apprend que le varan de Komodo est apparu en Australie, il y a quelque 4 millions d'années, et qu'il y a coexisté avec son proche parent le *Varanus priscus*, un géant de 7 mètres de long disparu au Pléistocène. Par la suite, il a atteint

les îles de la Sonde (via Timor), il y a 900 000 ans, et finit par disparaître de son habitat australien 600 000 ans plus tard. Les « dragons » n'ont donc pas évolué vers le gigantisme en fonction d'une adaptation insulaire après avoir gagné l'Indonésie : d'aucuns avaient pourtant supposé, à tort, qu'ils auraient acquis leurs dimensions actuelles sur Timor et Florès, en devenant les prédateurs spécialisés d'éléphants nains disparus, du genre *Stegodon*.

Près de 6 000 individus vivent actuellement dans le parc national de Komodo. Outre la consanguinité, leur espèce est désormais menacée par les trafiquants qui capturent des spécimens pour la confection de remèdes traditionnels de la médecine chinoise. Il reste à espérer que le varan de Komodo ne rejoindra pas un jour la liste déjà longue des grands disparus des faunes insulaires... Ce qui est loin d'être acquis : fin septembre, le ministère indonésien des Affaires maritimes a décidé de ne plus interdire l'accès à l'île de Komodo. Sous la pression des populations de l'île – environ 2000 habitants, qui avaient appris que la fermeture de l'île au tourisme devait s'accompagner de leur délocalisation –, il a annoncé qu'il restreindrait simplement le nombre de visites. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. L. Lind et al., **Genome of the Komodo dragon reveals adaptations in the cardiovascular and chemosensory systems of monitor lizards**, *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 3(8), pp. 1241-1252, 2019.

B. G. Fry et al., **A central role for venom in predation by *Varanus komodoensis* (Komodo Dragon) and the extinct giant *Varanus (Megalania) priscus***, *PNAS*, vol. 106(22), pp. 8969-8974, 2009.

G. Mitman, **Cinematic nature : Hollywood technology, popular culture, and the American Museum of Natural History**, *Isis*, vol. 84(4), pp. 637-661, 1993.

W. D. Burden, **Dragon Lizards of Komodo**, Putnam, 1927.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



N° 502 (août 19)
réf. PL502



N° 501 (juillet 19)
réf. PL501



N° 500 (juin 19)
réf. PL500



N° 499 (mai. 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498



N° 497 (mar. 19)
réf. PL497



N° 496 (févr. 19)
réf. PL496



N° 495 (jan. 19)
réf. PL495



N° 494 (déc. 18)
réf. PL494

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 01 x 9,90 € = 9,90 €
 2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/07/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
 P.86 Art & science
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

LA PHYSIQUE A-T-ELLE BESOIN DES NOMBRES RÉELS?

L'usage des nombres réels pour représenter des grandeurs physiques semble aller de soi. Pourtant, ces nombres ne sont pas aussi réels que le suggère leur nom, et ils engendrent parfois illusions et faux espoirs.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au
 laboratoire Cristal
 (Centre de recherche
 en informatique, signal
 et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

L'usage des nombres réels en physique et plus généralement dans les sciences a pour origine la géométrie, avec sa conception idéalisée des points d'une droite, d'un plan ou de l'espace. Les nombres réels, dont la structure constitue ce qu'on dénomme «le continu», possèdent de formidables propriétés. En voici quatre.

– Entre deux nombres réels x et y tels que $x < y$, il y a toujours le nombre réel $(x + y)/2$ et une infinité d'autres, dont tous ceux donnés par la formule $(nx + my)/(n + m)$ où n et m sont deux entiers positifs :

$$x = (nx + mx)/(n + m) \\ < (nx + my)/(n + m) < (ny + my)/(n + m) = y.$$

– Si une suite de nombres réels $x_1, x_2, x_3, \dots$ est croissante et majorée (tous les x_i sont inférieurs à un nombre fixé M), alors elle converge vers une limite qui est un nombre réel. Cette propriété permet de savoir qu'il existe un nombre réel x dont le carré est 2; on le note $\sqrt{2}$. Cette seconde propriété est importante, car la première propriété qu'ont aussi les nombres rationnels (les quotients de deux entiers) ne permet pas de démontrer qu'un tel nombre existe; d'ailleurs, $\sqrt{2}$ n'est pas un nombre rationnel.

– Les opérations d'addition et de multiplication entre nombres réels ont des propriétés simples et bien commodes, qui en font ce que les mathématiciens nomment un «corps». On a ainsi $x + y = y + x$, $x(y + z) = xy + xz$ et bien d'autres égalités utiles.

– La relation d'ordre sur les nombres réels est totale, c'est-à-dire que deux nombres

distincts x et y étant donnés, l'un domine l'autre: on a soit $x < y$, soit $y < x$.

Ces propriétés ont servi de base pour le calcul différentiel et les réels constituent un outil commode pour représenter l'espace physique (chaque point est déterminé par trois nombres réels), pour décrire le temps, les masses, les vitesses, et plus généralement les grandeurs physiques: on formule les lois de la nature en utilisant les nombres réels. La plupart des physiciens utilisent ces nombres sans se poser de question. Pourtant, ils créent une situation insatisfaisante sous plusieurs aspects.

LES UNITÉS IGNORÉES ET LA PRÉCISION LIMITÉE

David Ruelle, membre de l'Académie des sciences, dit que les réels du physicien sont différents de ceux du mathématicien à cause de deux points de divergence grave:

«(a) Les nombres utilisés en physique ont une dimension. Cela signifie qu'ils correspondent à une mesure faite en une unité donnée, par exemple le centimètre pour une longueur, le degré Celsius ou le kelvin pour une température, le centimètre par seconde pour une vitesse, etc. [...] Une formule physique qu'un mathématicien considérerait convenable pourrait être fermement rejetée par un physicien pour une incorrection concernant les unités. (b) Les nombres utilisés en physique ne peuvent être définis qu'avec une précision limitée, car ils proviennent de mesures opérées en utilisant une unité qui n'est définie qu'avec une précision limitée et dans le cadre de théories à l'applicabilité

CE QUI N'A PAS DE SENS POUR UN PHYSICIEN

1

Les nombres réels utilisés en physique ont des propriétés que les mathématiciens jugent importantes et qui, pourtant, n'ont pas vraiment de contrepartie physique. En voici quelques illustrations.

On mesure les distances et les durées avec des nombres réels, alors que ceux-ci ne sont jamais connus qu'avec une précision finie (rarement plus de 10 décimales). Les autres décimales, en quelque sorte cachées, ont-elles un sens ? Ce n'est pas certain, mais alors pourquoi se référer au continu des nombres réels pour parler de distance et de durée ?

L'ensemble des nombres réels n'est pas dénombrable, de même, tout simplement, que l'intervalle des nombres réels entre 0 et 1 : on ne peut pas mettre les entiers en correspondance un à un avec ces nombres. Cette propriété des nombres réels, importante pour les mathématiciens, n'a aucune traduction en physique.

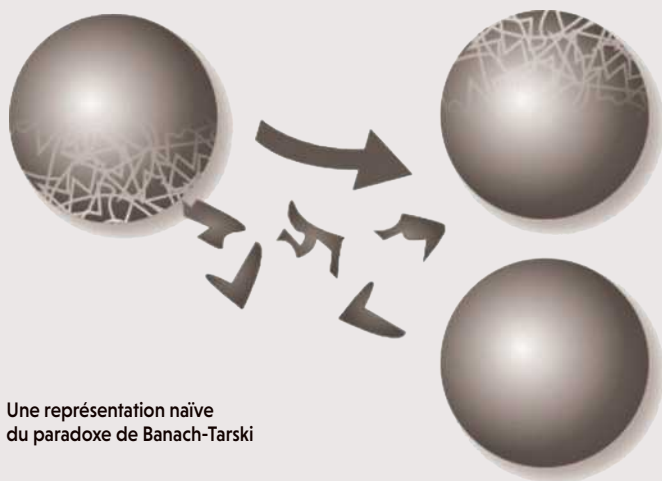
L'axiome du choix indique qu'à toute collection E d'ensembles non vides, par exemple $E = \{\{1, 2\}, \{a, b, c\}, \{z, y\}\}$,

correspond au moins un ensemble de choix C ayant un élément commun avec chaque ensemble de E . L'axiome paraît évident, mais il engendre des situations gênantes. Pour notre exemple, $C = \{2, b, z\}$ convient. Cependant, à partir de l'idée que l'espace est défini par des triplets de nombres réels, on déduit de l'axiome du choix qu'une boule de rayon 1 se décompose en cinq ensembles de points, que l'on peut déplacer sans les déformer pour recomposer deux boules de rayon 1. Ce paradoxe de la multiplication miraculeuse des boules, nommé « paradoxe de Banach-Tarski » (voir www.madore.org/~david/math/bantar.pdf), n'a évidemment aucune traduction dans le monde physique et il s'oppose à l'intuition la plus élémentaire que nous avons de l'espace et à la loi de conservation de la masse.

L'espace mathématique de la géométrie euclidienne s'étend infiniment loin, alors que les physiciens et cosmologistes n'affirment rien de définitif sur cette question pour l'espace physique.



Stefan Banach (1892-1945) était un mathématicien polonais. Ses travaux ont surtout porté sur l'analyse fonctionnelle, dont il est l'un des fondateurs.



Une représentation naïve du paradoxe de Banach-Tarski



Alfred Tarski (1901-1983) était un logicien et philosophe polonais. Il a vécu et travaillé aux États-Unis depuis le début de la Seconde Guerre mondiale, en 1939.

limitée. Il s'ensuit que l'affirmation mathématique «un nombre réel est rationnel, ou irrationnel» n'a pas de sens pour un physicien.»

Ajoutons qu'un mathématicien accorde une grande importance à l'idée que l'infini des nombres réels est plus grand que l'infini dénombrable des nombres entiers et des nombres rationnels, alors que pour le physicien cela ne correspond à rien de concret.

UNE PHYSIQUE ÉLÉGANTE, MAIS INEXACTE !

Le physicien et mathématicien Roger Penrose, professeur émérite à l'université d'Oxford, exprime aussi ses doutes : «Les nombres réels se réfèrent à une idéalisation mathématique plutôt qu'à une quantité physique objective et réelle. Le système des nombres réels a la propriété, par exemple, qu'entre deux >

2

> quelconques d'entre eux, si proches soient-ils, il en existe un troisième. Si nous continuions à diviser l'intervalle physique entre deux points, nous atteindrions finalement des échelles si petites que le concept même de distance cesserait d'avoir du sens. On considère qu'à l'échelle de la gravitation quantique, environ $1/10^{20}$ de la taille d'une particule subatomique, ce serait le cas. [...] Les nombres réels sont choisis en physique pour leur utilité mathématique, leur simplicité et leur élégance, et aussi parce qu'ils s'accordent sur un grand intervalle avec les concepts physiques de distance et de temps, [...] mais ils ne sont pas en accord avec les concepts physiques sur toutes les échelles.»

LA CARTE N'EST PAS LE TERRITOIRE

Toutefois, pour le physicien et philosophe des sciences français Hervé Zwirn, la difficulté est levée quand on distingue ce que l'on représente et ce qui est représenté : le modèle mathématique n'est pas la réalité modélisée. Il ajoute : « Les nombres réels ne sont pas des objets

physiques qui existent dans l'espace, ils ne sont que des modes de représentation qui permettent de se référer à des objets physiques. » Pour lui, il n'y a donc pas de problème grave lié à l'utilisation des nombres réels en physique.

Cependant, en utilisant les nombres réels en physique, on opère une surreprésentation de la réalité : les concepts mathématiques utilisés sont bien plus riches en informations que ne l'est la réalité visée. D'habitude, c'est le contraire ! On modélisera par exemple un réseau routier par un graphe mathématique qui contient moins d'informations que le réseau véritable. De même, les neurones formels sont des simplifications discrètes et finies de la complexité biologique des neurones biologiques.

Récemment, Nicolas Gisin, physicien à l'université de Genève, a dénoncé l'une des conséquences de l'utilisation des nombres réels en physique.

On oppose souvent la mécanique classique et la mécanique quantique en affirmant que la première est déterministe alors que la seconde

LA QUESTION DU DÉTERMINISME

La mécanique classique est généralement considérée comme déterministe. L'idée de ce déterminisme a été magistralement exprimée par Pierre-Simon de Laplace dans son essai sur les probabilités de 1814 : « Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, seraient présents à ses yeux. »

Selon Nicolas Gisin, ce déterminisme provient d'une utilisation trompeuse des nombres réels. Ce physicien de l'université de Genève propose de considérer que les nombres réels décrivant l'état initial d'un système physique ne sont fixés que partiellement (c'est-à-dire avec quelques chiffres significatifs) et que ce n'est que plus tard, au cours de l'évolution du système, que les chiffres donnant plus de précisions se déterminent progressivement, et cela d'une manière aléatoire. Cette version non déterministe de la mécanique classique est empiriquement équivalente à sa version usuelle. Symétriquement, Nicolas Gisin insiste sur l'existence de versions déterministes non réfutées de la mécanique quantique, théorie que l'on considère en général comme intrinsèquement indéterministe. Finalement, pour lui et d'autres philosophes des sciences, la question du déterminisme n'est pas une question scientifique.



Pierre-Simon, marquis de Laplace (1749-1827), portrait de Jean-Baptiste Paulin Guérin.

3

TOUS LES CHIFFRES IMPORTENT

En physique classique, on utilise des nombres réels pour représenter les variables physiques. On considérera par exemple la fonction continue f vérifiant $f(x) = 2x$ si x est compris entre 0 et $1/2$, et $f(x) = 2(1 - x)$ si x est compris entre $1/2$ et 1, pour représenter l'évolution de la coordonnée longitudinale d'un point quand on applique la transformation du boulanger à une pâte qui est allongée puis repliée en deux sur elle-même de manière répétée (on itère l'application de la fonction f à la coordonnée initiale).

L'étude de cette transformation déterministe illustre l'importance de tous les chiffres du nombre réel x donnant la coordonnée d'un point initial quand on suit sa position lors de la manipulation répétée du boulanger. On observe le phénomène de la « montée des chiffres » : les chiffres les plus loin dans le développement en base 2 de x prennent progressivement de plus en plus d'importance en s'approchant de la virgule. Prenons par exemple pour coordonnée initiale le nombre x_0 , qui, écrit en base 2, est :

$x_0 = 0,0100100010000100000100000010000001...$
La suite des nombres $x_n = f(x_{n-1})$ donnant sa position quand on applique successivement la transformation du boulanger est représentée ci-dessous.

$x_0 = 0,0100100010000100000100000010000001...$
 $x_1 = 0,100100010000100000100000010000001...$
 $x_2 = 0,1101110111101111101111101111110...$
 $x_3 = 0,01000100001000001000000100000001...$
 $x_4 = 0,1000100001000001000000100000001...$
 $x_5 = 0,111011110111110111110111110111110...$
 $x_6 = 0,00100001000001000000100000001...$
 $x_7 = 0,0100001000001000000100000001...$
 $x_8 = 0,100001000001000000100000001...$

est indéterministe. Pour Nicolas Gisin, il s'agit là d'une illusion, et elle est due à l'usage des nombres réels pris trop au sérieux et de la confusion déjà évoquée entre modèle et réalité.

Pour Nicolas Gisin, « la physique classique n'est déterministe que si l'on attribue à l'outil que sont les nombres réels une signification physique. Dès que l'on réalise que les nombres réels mathématiques ne sont "pas vraiment réels", c'est-à-dire qu'ils n'ont aucune signification physique, il s'ensuit que la physique classique n'est pas déterministe. »

En effet, quand on considère l'évolution d'un système physique, par exemple quelques particules ponctuelles à partir d'une situation initiale donnée, elle n'est effectivement déterminée de manière unique et calculable instant après instant qu'à la condition que les données initiales (les positions et vitesses des particules) soient connues avec une précision infinie. Cela revient à prendre au sérieux que les variables physiques sont bien équivalentes à des nombres réels comportant une infinité de décimales.

UNE MÉCANIQUE QUI NE SUPPOSE PAS D'INFORMATIONS INACCESSIBLES

Nicolas Gisin a imaginé une théorie équivalente à la mécanique classique dans laquelle on considère que le système initial dont on étudie l'évolution n'est connu qu'avec une précision limitée, et que ce n'est qu'une fois que le système physique évolue et lorsque c'est nécessaire que les décimales non connues au départ sont fixées, cela de manière différée et aléatoire. Il défend que « cette alternative à la mécanique classique est plus naturelle, car elle ne suppose pas d'informations inaccessibleles. »

Tout ce qu'est capable de prévoir la mécanique classique est prévu de la même façon par la mécanique alternative de Gisin, et nous avons autant de raisons de croire en cette mécanique non déterministe que nous en avons de croire en la mécanique classique déterministe.

Nicolas Gisin en déduit que la question : « La physique classique est-elle déterministe ? » n'est pas une question scientifique.

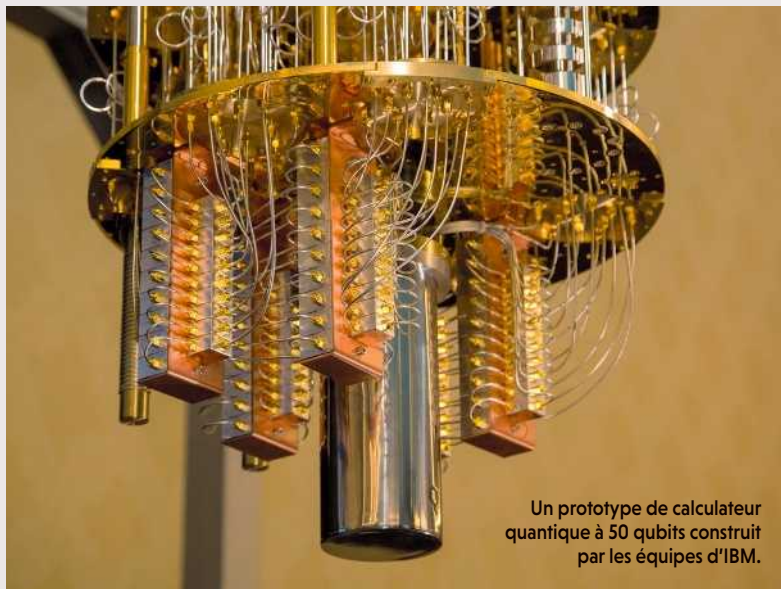
Pour compléter sa démonstration, il revient sur la théorie de De Broglie-Bohm de la mécanique quantique qui, en utilisant l'idée qu'existeraient des variables cachées, propose une version déterministe de la mécanique quantique. Bien que cette théorie ait peu de défenseurs, elle n'a pas été réfutée et on peut donc affirmer que, pas plus que la mécanique classique ne décrit vraiment un monde déterministe, la mécanique quantique n'en décrit un vraiment indéterministe.

La mécanique classique et la mécanique quantique sont chacune, au choix, déterministe ou non déterministe et il n'existe pas de moyen empirique pour départager les options. Hervé Zwirn est d'accord avec Nicolas Gisin sur ce point de vue : « La question de savoir si la nature est déterministe ou pas est une fausse question épistémologique qui n'a pas de solution. Elle semble grammaticalement poser une question qui concerne la nature elle-même alors qu'en fait, elle concerne nos moyens de description. »

Une autre raison doit nous rendre méfiants vis-à-vis des nombres réels utilisés en physique. Elle est liée à l'existence des principes de finitude : de même qu'il existe un principe physique fondamental stipulant qu'aucun objet réel et qu'aucune information ne peut voyager ➤

4

LES CALCULATEURS QUANTIQUES



Un prototype de calculateur quantique à 50 qubits construit par les équipes d'IBM.

Depuis vingt-cinq ans, on mène des travaux sur les systèmes de calcul quantique. Ceux-ci, en théorie, seraient capables de calculer plus rapidement que les ordinateurs classiques. Ils utilisent des bits quantiques, ou qubits, au lieu de bits. L'idée repose sur la possibilité de mener, grâce à la superposition quantique, des calculs parallèles en grand nombre et revient à considérer qu'il n'y a pas de limite à l'exactitude de la théorie quantique, même quand elle contredit le principe de densité finie de l'information, lui-même lié à la méfiance que les nombres réels doivent nous inspirer.

L'objectif de la « suprématie quantique » est de mener avec un ordinateur quantique un calcul infaisable avec un ordinateur classique. Il aurait récemment été atteint par Google, mais l'exploit est contesté par les chercheurs d'IBM. Même si l'objectif est atteint, des chercheurs font remarquer que les méthodes envisagées ne produiront rien d'utile, car elles concernent des calculs spécialisés de densités de probabilité qui n'ont pas d'intérêt pratique. Nul n'a prouvé que les recherches concernant les ordinateurs quantiques n'aboutiront pas, mais divers spécialistes, dont Sabine Hossenfelder, physicienne

théoricienne à l'institut d'études avancées de Francfort, expliquent qu'il faut rester prudent. Elle écrit : « Quand verrons-nous un ordinateur quantique avec des millions de qubits ? Personne ne sait. Le problème est qu'il est peu probable que les approches dominantes à l'heure actuelle puissent s'adapter pour changer d'échelle. [...] On ne sait pas comment dépasser quelques centaines de qubits. C'est à la fois un problème d'ingénierie et un problème de coût. Cela explique pourquoi, ces dernières années, on a beaucoup parlé des ordinateurs NISQ (*noisy intermediate scale quantum computers*). Il s'agit en réalité d'un terme inventé pour faire croire aux investisseurs que l'informatique quantique aura des applications pratiques au cours des prochaines décennies. Même s'il est possible qu'on sache prochainement faire fonctionner des NISQ, personne ne sait en tirer quelque chose d'utile. Je ne suis pas très optimiste sur le fait que les ordinateurs quantiques auront bientôt des applications pratiques. Je crains que l'informatique quantique ressemble à la fusion nucléaire ; c'est-à-dire qu'elle reste toujours prometteuse, mais ne fonctionne jamais vraiment. »

> plus vite que la lumière, il semble que les physiciens soient prêts à reconnaître qu'un volume fini d'espace ne peut pas contenir une quantité infinie d'informations.

Les informaticiens Pablo Arrighi, de l'université d'Aix-Marseille et Gilles Dowek, de l'Inria et de l'ENS Paris-Saclay, défendent cette idée d'un principe de densité finie d'information et considèrent qu'il devrait être affirmé clairement, comme celui de la vitesse limitée.

UNE DENSITÉ FINIE D'INFORMATION

Bien sûr, un tel principe empêcherait de croire que la position d'une particule et sa vitesse soient déterminées par des nombres réels dont l'infinité de décimales contient potentiellement une infinité d'informations. Pablo Arrighi et Gilles Dowek proposent une expérience de pensée : « Imaginons une quantité infinie d'informations exprimée sous la forme d'une suite illimitée de 0 et de 1 ; nous pouvons voir cette séquence comme les chiffres d'un nombre réel et écarter les mâchoires d'un pied à coulisse d'une distance correspondant à ce nombre. Cela placerait une quantité infinie d'informations dans un volume fini. Bien sûr, nous avons tous appris que cette idée est absurde et que la distance entre les mâchoires d'un pied à coulisse est fixée avec une précision finie de trois ou quatre chiffres. Il est surprenant que l'affirmation qu'une grandeur physique est toujours définie avec une précision finie n'ait jamais reçu le statut de principe en physique. »

L'idée de ce principe de densité finie d'information, si on savait le rendre précis, aurait une incidence sur les pronostics que l'on fait concernant les capacités futures des ordinateurs quantiques. Le mode de fonctionnement de ces ordinateurs sur lesquels des recherches se poursuivent depuis plus de vingt-cinq ans est la superposition quantique : on obtient dans un volume fini d'espace une grande puissance de calcul en superposant les états quantiques d'un système qu'on fait calculer et qui mène plusieurs calculs en parallèle. Cette possibilité de superposer les calculs est envisagée sans limite et conduirait en théorie à pouvoir dépasser les capacités de calcul des systèmes fondés sur la physique classique.

On sait ainsi comment s'y prendre pour tirer de la mécanique quantique un algorithme fonctionnant en temps polynomial (c'est-à-dire rapidement) pour factoriser les nombres entiers. Cet algorithme conçu par l'Américain Peter Shor en 1995 n'a pas d'équivalent classique connu. Certains systèmes cryptographiques, dont le système RSA notamment utilisé pour les cartes bancaires, s'appuient sur la difficulté de la factorisation. On craint donc que leur sécurité soit mise prochainement en danger.

Pourtant, dès 2003, le logicien Leonid Levin, professeur à l'université de Boston, a exprimé