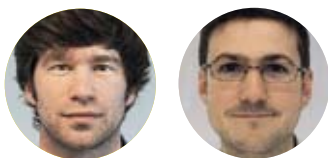


Le monde est un ordinateur quantique

Notre Univers peut-il être représenté comme un très gros ordinateur parallèle ? Sans doute, à condition que cet ordinateur obéisse aux lois de la physique quantique.



PAR Pablo Arrighi,
maître de conférences
à l'université de Grenoble,
ET Jonathan Grattage,
chercheur à l'école normale
supérieure de Lyon.

© PATRICIO MICHELIN - DR

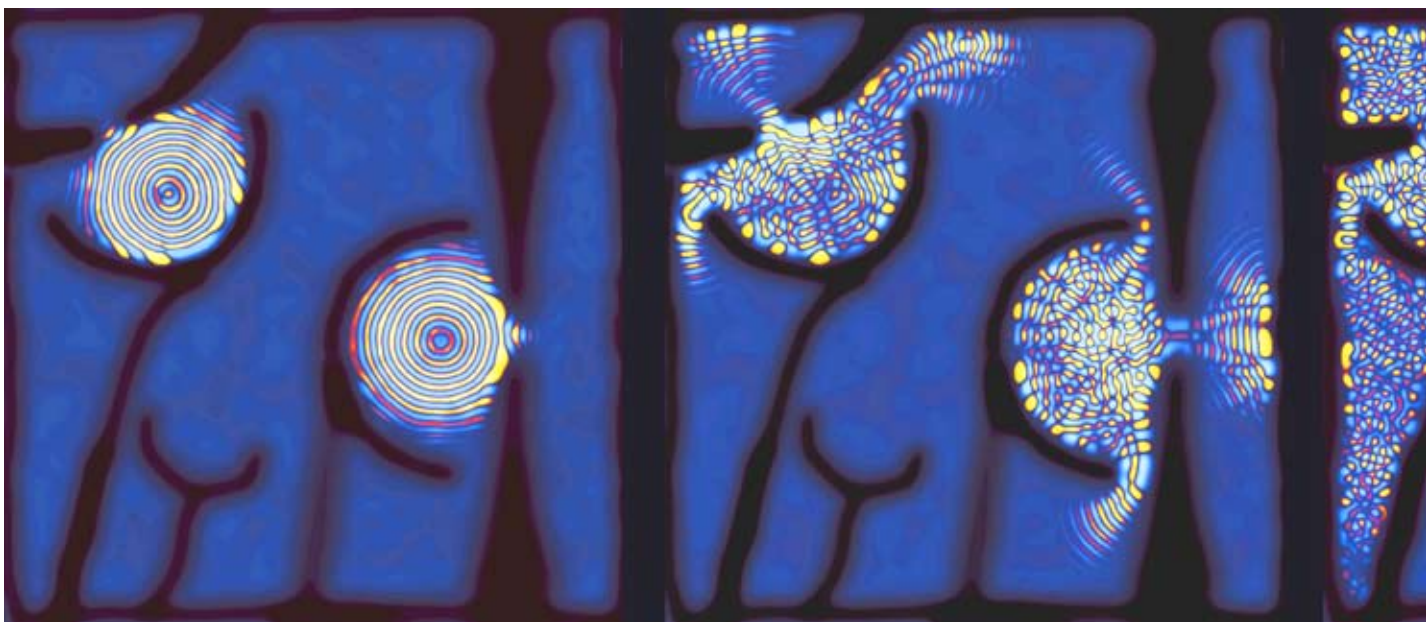
Ce texte est la traduction d'un article
publié dans le numéro de juin 2012
du magazine *Physics World*.

Mettez-vous un instant à notre place. Vous vous trouvez avec des amis d'amis dans un bon restaurant lyonnais. L'une des convives vous demande gentiment ce que vous faites dans la vie. Vous essayez d'éluder en répondant évasivement : « *En ce moment, je fais de la physique théorique.* »

Pourtant, vous n'êtes pas peu fier d'appartenir à la première génération de scientifiques ayant fait leur thèse en information quantique, champ de recherche qui mêle informatique, physique et mathématiques. Aussi, quand elle vous demande des précisions, vous n'hésitez plus, vous développez la thématique des « *modèles de calcul quan-*

tique et de leurs conséquences pour la physique théorique ». Dans son regard, l'incompréhension est perceptible.

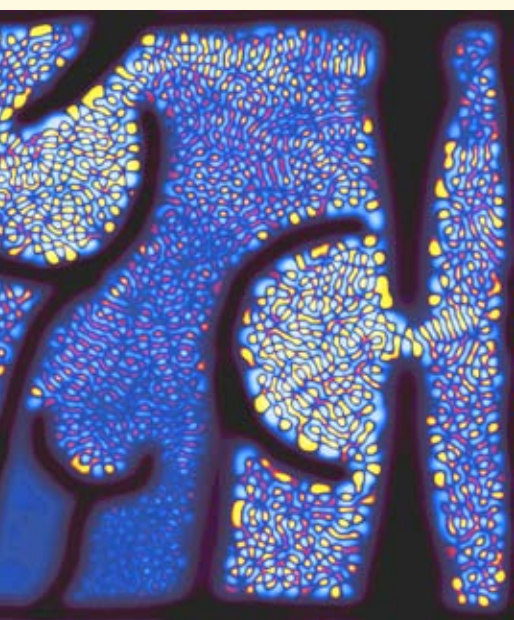
Pourtant un certain nombre de physiciens mondialement reconnus, dont Seth Lloyd, du Massachusetts Institute of Technology, aux États-Unis, et Lee Smolin, de l'institut Perimeter, au Canada, se sont récemment emparés du sujet. Ils soutiennent l'idée que la recherche en physique théorique devrait se concentrer sur la notion d'« information » et non sur celle de « matière ». Selon eux, il faut aller au-delà d'une vision du monde dans laquelle des particules se propagent et interagissent, et mettre l'accent sur des concepts comme l'entropie (une fonction de mesure de l'information) et les échanges d'information entre les systèmes.



L'idée n'est pas si nouvelle. L'entropie est une quantité fondamentale de la thermodynamique. Et les concepts d'observateurs (ceux qui reçoivent l'information) et de mesures (les procédés par lesquels on obtient cette information) ont une place centrale respectivement dans la théorie de la relativité et en mécanique quantique. De plus, la physique de l'information a déjà permis des avancées significatives dans la compréhension de phénomènes quantiques fondamentaux. Elle a, par exemple, permis de mieux comprendre l'intrication, corrélation étonnante qui relie parfois les particules quantiques, y compris à très grande distance.

Motifs d'information. La physique de l'information a aussi permis de construire la théorie de la décohérence quantique, qui explique pourquoi le principe de superposition, fondement de la mécanique quantique, n'est pas

Deux ondes quantiques se propagent, sont réfléchies sur des barrières (en noir) et interagissent (de gauche à droite). Ces images produites par ordinateur évoquent ce que pourrait être un algorithme quantique à deux dimensions qui reproduirait les lois de la physique.



observable à grande échelle. En 1935, Erwin Schrödinger avait illustré ce principe de superposition à l'aide d'un exemple resté célèbre : il avait imaginé un chat enfermé dans une boîte avec de la matière faiblement radioactive et un dispositif programmé pour tuer l'animal dès qu'il détecte la désintégration d'un atome radioactif. Tant que l'on n'observe pas le contenu de la boîte, expliquait Schrödinger, le chat est à la fois mort, dans une certaine proportion, et vivant, dans une certaine autre proportion. La théorie de la décohérence explique pourquoi on observe ce type de comportement à l'échelle des particules, mais jamais à l'échelle d'un chat.

La physique théorique est donc déjà très largement « informationnelle ». Nous défendons le fait que, dans le futur, elle sera aussi « computationnelle ». Afin de comprendre ce que cela signifie, revenons aux années 1970. Aux États-Unis, des scientifiques, tels Edward Fredkin, de l'université Carnegie Mellon, et Tommaso Toffoli, de l'université de Boston, ont proposé de concevoir l'Univers comme un ordinateur parallèle géant. Dans cette vision, les particules sont considérées comme des motifs d'information, qui se meuvent dans une vaste grille de microprocesseurs, et non comme des entités matérielles entrant en collision et se désagrégant. Par exemple, quand nous regardons un match de tennis à la télévision : la balle peut être considérée comme un assemblage de pixels qui se déplacent sur l'écran, plutôt que comme une balle de caoutchouc rebondissant sur de la terre battue.

Automate cellulaire. De ces réflexions Robin Gandy, mathématicien et logicien britannique, a tiré une idée en 1980 : l'Univers peut être simulé à l'aide d'un ordinateur classique à la mémoire illimitée. En guise d'introduction, il nota que les physiciens s'accordent sur un certain nombre de principes. Le premier d'entre eux stipule que les lois de la physique sont homogènes : elles restent les mêmes en tout temps et en tout lieu.

L'essentiel

- > DES PHYSICIENS pensent que le monde serait mieux expliqué en termes d'information plutôt qu'en termes de matière.
- > CELA SIGNIFIE que l'on peut considérer l'Univers comme un ordinateur géant, dont il faudrait trouver les règles de calcul.
- > RÉCEMMENT, cette idée a été étendue pour intégrer les lois de la physique quantique.

Selon le deuxième principe, les lois de la physique sont causales : l'information ne peut se propager à une vitesse supérieure à c , la vitesse de la lumière. Cela signifie que l'état d'un système à l'instant $t + \Delta t$ est déterminé par l'état de ses voisins à l'instant t sur un rayon $c\Delta t$ – les autres systèmes sont trop éloignés pour pouvoir l'influencer. Enfin, il invoqua un troisième principe plus discutable : un volume d'espace fini ne peut contenir qu'une quantité finie d'information.

De ces trois principes on déduit que, si l'on se place dans un cadre de référence où l'espace se décompose en cubes, chaque cube est décrit dans sa totalité par l'information, finie, qu'il contient. De plus, l'état de chaque cube à l'instant $t + 1$ est fonction de l'état des cubes voisins à l'instant t . En d'autres termes, on obtient l'état d'un cube en appliquant ce que les informaticiens appellent une « règle locale ». Dernière conséquence, cette règle locale est la même partout, et en tout temps. Il découle de ces trois principes que l'état de l'Univers à l'instant $t + 1$ peut être calculé à partir de son état à l'instant t , en appliquant une même règle locale partout à la fois dans l'espace.

En procédant de la sorte, le théorème de Gandy réduit l'Univers à une sorte d'ordinateur parallèle, autrement appelé « automate cellulaire ». Nombre d'entre nous ont déjà joué avec un automate cellulaire : le « jeu de la vie », de John Conway. Malgré l'apparente sim- >>>

Le monde est un ordinateur quantique

>>> plicité de ce « jeu de la vie » [fig. 1], il a été démontré qu'il permet de calculer n'importe quel algorithme classique – comme le font les portes logiques et les fils d'un ordinateur conventionnel.

Le théorème de Gandy présente toutefois un problème : il est incompatible avec la théorie quantique. Comme nous l'avons vu avec le chat de Schrödinger, celle-ci stipule que même un système à deux états, tant qu'il n'est pas observé, peut se trouver dans une infinité d'états superposés possibles. Dans ce cadre, le principe de densité d'information finie de Gandy s'écroule.

C'est l'invention de l'informatique quantique par le physicien américain – et Prix Nobel – Richard Feynman, au début des années 1980, qui ouvre la voie de la solution. Frustré de voir des ordinateurs classiques prendre des semaines pour simuler des expériences de physique quantique qui pourtant se produisent en un clin d'œil, il eut l'intuition que ces simulations seraient mieux réalisées par un ordinateur qui exploiterait lui aussi les phénomènes quantiques au service de sa puissance de calcul. Cette idée a relancé le projet de la physique numérique.

Comme leurs homologues classiques, les ordinateurs quantiques s'organisent en réseaux de fils transportant de l'information. Sauf que les informations qu'ils transportent ne sont plus des bits, dont les états seraient 0 ou 1, mais des qubits, dont les états sont des superpositions de 0 et de 1.

Pour traiter l'information, un ordinateur quantique, comme un ordinateur conventionnel, applique des portes logiques. Par exemple, la porte quantique dite de « Hadamard » permet de faire passer un qubit de l'état 0 à la superposition d'états équirépartis entre 0 et 1. Outre la porte de « Hadamard », un ordinateur quantique a besoin d'une porte quantique agissant sur deux qubits à la fois. Il s'agit de la porte « $\pi/8$ », qui provoque un changement de phase si les deux qubits sont dans l'état 1, et les laisse inchangés dès que l'un des deux est 0. Ces deux portes prises ensemble sont universelles : en les combinant on peut calculer n'importe quel algorithme quantique.

Portes quantiques. Il existe bien des façons de mettre en œuvre ce type de système. Par exemple, on peut utiliser une

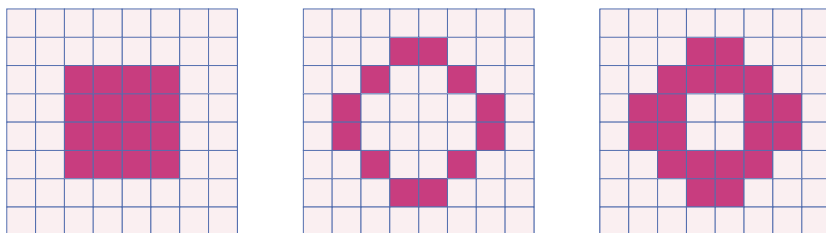
particule pouvant avoir deux états à la fois : excité et non excité. Au cours de la dernière décennie, les expérimentateurs de nombreux groupes à travers le monde ont fait fonctionner avec succès des fils quantiques et des portes à un qubit telle la porte de « Hadamard ». La difficulté actuelle est de faire fonctionner avec précision des portes à deux qubits et des fils quantiques en grande quantité.

Quoi qu'il advienne sur le plan expérimental, cela ne nous empêche nullement d'avancer sur le plan théorique. En collaboration avec Gilles Dowek, d'Inria, et en se fondant sur des recherches précédentes menées avec Vincent Nesme, de l'université de Grenoble, et Reinhard Werner, de l'université de Hanovre [1], nous avons ainsi développé une version des hypothèses de Gandy qui tient compte de la mécanique quantique [2]. Principalement, cela signifie que nous avons remplacé le principe de densité finie de Gandy par l'hypothèse qu'un volume d'espace fini ne peut contenir qu'un nombre fini de qubits. Cela nous a conduits à une version quantique du théorème de Gandy, qui suggère une autre vision de l'Univers : celui-ci se comporterait comme la version quantique d'un automate cellulaire.

Dans ce type d'automate, l'évolution temporelle de t à $t + 1$ s'obtient en appliquant, de manière répétée à travers l'espace, une porte logique quantique sur des groupes de cellules voisines. Cependant, les automates cellulaires quantiques possèdent aussi toutes les spécificités inhérentes à la mécanique quantique. Les cellules peuvent se trouver dans des superpositions d'états. Au fil du temps, elles peuvent aussi s'intriquer avec d'autres cellules, éventuellement très éloignées.

Un exemple d'automate cellulaire quantique tridimensionnel est le modèle du « jeu de la vie quantique » que nous avons proposé [3]. Dans celui-ci, chaque cellule peut être « vide », « pleine » ou dans la superposition des deux états. L'évolution de la grille est obtenue en appliquant une porte quantique sur des cubes de deux cellules de côté. Cette porte quantique que nous avons définie constitue la « règle du jeu » [fig. 2].

Fig.1 Les règles du « jeu de la vie »

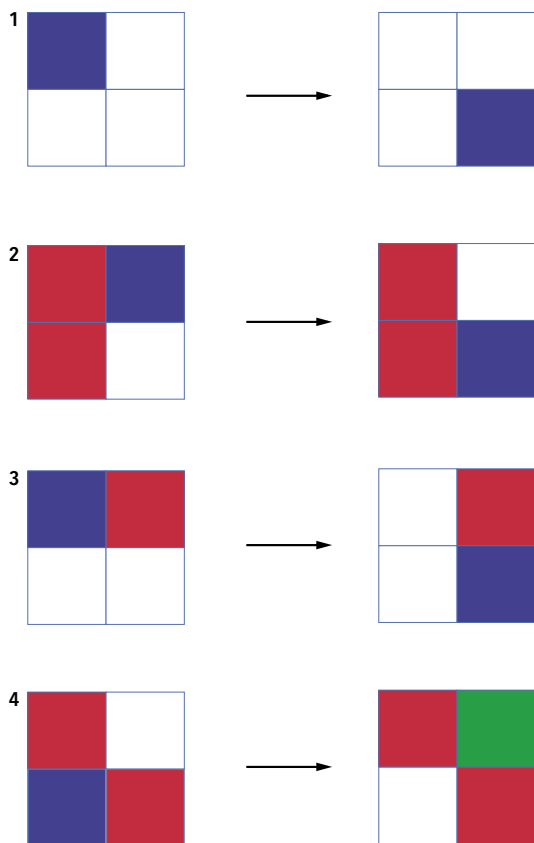


LE « JEU DE LA VIE » fonctionne sur une grille dont chaque cellule peut être « vivante » (en magenta) ou « morte » (en rose pâle). L'état de chaque cellule (de gauche à droite) à chaque étape est déterminé par son état, et celui de ses huit voisines à l'étape précédente. Une cellule vivante meurt si elle est entourée de moins de deux ou de plus de trois voisines vivantes ; elle reste en vie si elle est entourée de deux ou de trois voisines vivantes. Une cellule morte prend vie uniquement si elle est entourée de trois cellules vivantes. Cet « automate cellulaire » d'apparence simple permet de calculer tous les algorithmes classiques.

Fig.2 Le « jeu de la vie quantique »

EN DEUX DIMENSIONS du jeu de la vie quantique s'intéresse aux évolutions, sur une grille, d'un bit quantique, un qubit (en bleu). Celui-ci se déplace généralement en diagonale (1). Certaines cases de la grille sont occupées par des barrières fixes (en rouge) qui réfléchissent le qubit (2) ou le laissent passer (3) selon leur disposition. Lorsqu'un qubit passe en diagonale entre deux barrières, il se retrouve dans un état de superposition (4, en vert). Si l'on ajoute une règle de croisement de deux qubits (non représentée), on obtient un automate cellulaire qui peut en théorie simuler tous les algorithmes quantiques.

-  Barrière
-  État pur
-  État de superposition



Évidemment, il y a un gouffre entre la construction d'un modèle théorique d'automate cellulaire quantique et son utilisation pour la compréhension de phénomènes réels. Mais si les versions mises à jour des hypothèses de Gandy sont vraies, alors nous pouvons en théorie décrire l'Univers comme un gigantesque automate cellulaire quantique. Dans cette vision, faire de la physique consiste donc à déduire le « programme » du vaste ordinateur quantique parallèle dans lequel nous vivons.

Règles universelles. L'approche conventionnelle pour trouver la règle du jeu n'est pas d'utiliser la théorie des automates cellulaires quantiques, ou tout autre modèle du genre, mais de sonder ces règles du jeu *via* des expériences de physique de plus en plus précises, du même genre que celles réalisées au Grand collisionneur de

hadrons du CERN, à Genève. Cependant, nous croyons qu'il existe une autre méthode, complémentaire, pour identifier ces règles, et qui serait purement déductive. Premièrement, nous éliminons les règles trop simples, puisque nous vivons dans un univers complexe. Deuxièmement, nous pouvons remarquer que, dès lors qu'une règle est suffisamment complexe, elle devient capable de simuler toutes les autres règles, même les plus compliquées. Cette propriété s'appelle l'« universalité intrinsèque ».

Troisièmement, remarquons que, parmi les règles intrinsèquement universelles, il en est d'horriblement compliquées, et d'autres plus simples. Donc, si nous trouvons la règle intrinsèquement universelle la plus naturelle, nous pourrions l'utiliser pour trouver la manière la plus naturelle de simuler des phénomènes physiques.

Le « jeu de la vie quantique » que nous avons décrit est un automate cellulaire quantique intrinsèquement universel minimal. Reste à savoir si les phénomènes de la physique quantique peuvent y être encodés *via* les concepts que nous avons évoqués. De nombreux obstacles sont encore à franchir pour cela.

Problème de propagation. L'un des problèmes les plus criants provient du fait que les modèles d'automates cellulaires quantiques ne sont pas isotropes : dès que l'on considère une grille carrée, les signaux se propagent en général plus rapidement dans les quatre directions cardinales qu'en diagonale. De façon générale, les modèles qui dépendent fondamentalement de l'utilisation de la grille comme cadre de référence peuvent difficilement simuler la propagation par ondes, même s'il leur est souvent possible de les reproduire de façon approchée.

Un autre problème réside dans le fait que la physique numérique quantique n'intègre pas la relativité générale. Tout comme la physique numérique classique ne tenait pas compte, à son époque, des caractéristiques premières de la mécanique quantique. Aussitôt née, elle devra donc être modifiée.

Concernant ce dernier problème, certains spécialistes de la gravité quantique, parmi lesquels Fotini Markopoulou et Lee Smolin, de l'institut Perimeter, ont déjà fait une première proposition [4]. Nous avons donc bon espoir qu'une nouvelle physique numérique quantique, et relativiste, émerge dans la prochaine décennie. Dans ces nouvelles théories, les concepts d'automates cellulaires quantiques et d'universalité intrinsèque auront vraisemblablement un rôle simplificateur important, à défaut de nous permettre de briller auprès des convives des restaurants lyonnais. ■

- [1] P. Arrighi *et al.*, *JCSS*, 2, 372, 2011.
- [2] P. Arrighi et G. Dowek, *IJFCS*, arXiv:1102.1612, 2011.
- [3] P. Arrighi et J. Grattage, *Proceedings of JAC 2010*, 2010.
- [4] T. Konopka *et al.*, arXiv:hep-th/0611197, 2006.

Pour en savoir plus

> http://bit.ly/jeu_quantique