

des réserves sur ce que l'on peut attendre des ordinateurs quantiques. Pour lui, croire aux pouvoirs colossaux des ordinateurs quantiques, c'est croire à la possibilité de la manipulation physique de nombres comportant une très grande quantité de décimales, et c'est donc presque croire à l'existence physique des nombres réels et à la capacité de placer dans un espace fini une quantité illimitée d'informations.

À propos de la mise en œuvre de l'algorithme de Shor, Leonid Levin écrivait: «Le problème majeur réside dans l'idée que les équations quantiques de base restent valides avec plusieurs centaines, voire plusieurs millions, de décimales, car c'est là que résident les chiffres significatifs des amplitudes quantiques pertinentes. Or nous n'avons jamais vu de loi physique valable sur plus d'une dizaine de décimales et, en physique, la prise en compte de nouvelles décimales supplémentaires exige en général de repenser en profondeur les concepts de base d'une théorie.»

Pablo Arrighi insiste au sujet de la mécanique quantique sur la séparation en deux du principe de densité finie d'information: il y a d'un côté l'idée qu'il serait impossible que trop de qubits (bits quantiques) soient présents dans un même dispositif contenu dans un volume fini, et il y a de l'autre l'affirmation des limites aux nombres de décimales des nombres réels utilisés par nos théories (y compris la mécanique quantique).

Aujourd'hui, la réalisation d'ordinateurs quantiques progresse et on réussit avec eux à factoriser des entiers de 7 chiffres. Le nombre 56153 a ainsi été factorisé par un système quantique, avec pour résultat 233×241 . Le record atteint en 2018 semble être $4088459 = 2017 \times 2027$. Reste que les ordinateurs classiques sont pour l'instant bien supérieurs aux ordinateurs quantiques; par exemple, ils factorisent assez facilement des entiers de 100 chiffres. Les lents progrès du côté quantique ne font guère craindre pour la cryptographie dans l'immédiat. Un rapport de l'Académie des sciences des États-Unis paru en 2019 (voir la bibliographie) décrit la situation des recherches en calcul quantique; il est venu refroidir l'enthousiasme excessif des médias en indiquant par exemple qu'il n'y a rien à craindre en cryptographie, au moins pour les dix années à venir.

Même si l'on ne peut pas statuer sur l'objection de Leonid Levin, peut-être faut-il s'interroger sur le principe de densité finie d'information: concerne-t-il la mécanique quantique et sous quelle forme précisément?

Puisque les nombres réels utilisés en physique sont dangereux et sources d'illusions, comment les éviter?

Du côté des mathématiques, plusieurs options se présentent. Plutôt que d'utiliser les nombres réels, on pourrait n'utiliser que les nombres rationnels (nombres quotients de deux

entiers). Il serait gênant cependant de ne plus avoir le nombre $\sqrt{2}$!

On pourrait agrandir un peu cet ensemble de nombres en y ajoutant tous les nombres algébriques, qui sont les solutions d'équations polynomiales à coefficients entiers. Notre $\sqrt{2}$ serait alors un nombre acceptable... mais pas le nombre π qui est non algébrique (transcendant). On pourrait considérer tous les nombres calculables, c'est-à-dire définissables par algorithmes. Cette fois, π serait dans le corps de ces nombres calculables, qui est dénombrable: il a autant d'éléments qu'il y a de nombres entiers. Le corps des nombres calculables a d'assez bonnes propriétés et on a étudié sérieusement l'idée d'en faire une base pour la physique, par exemple dans le livre *Computability in Analysis and Physics*, de Marian Pour-El et Ian Richards (Cambridge University Press, 1989 et 2017).

Hélas, avec ces approches, il reste vrai qu'entre deux nombres, il y en a toujours une infinité d'autres. Il n'y a pas non plus de limite à la quantité d'informations contenue dans ces nombres. De plus, l'analyse mathématique que l'on construit avec eux est sensiblement plus compliquée que l'analyse classique. D'où un faible intérêt de la part des physiciens.

LIMITER L'USAGE DES NOMBRES RÉELS?

Du côté des physiciens, diverses approches qui limitent l'usage des nombres réels ont été tentées. La plus importante est sans doute la théorie de la gravitation quantique à boucles, dont Carlo Rovelli, à l'université de Marseille, est un promoteur (voir Pour la Science de juin 2019). La théorie résulte de la volonté de concilier la notion d'espace-temps de la relativité générale et la mécanique quantique. Elle propose avec sérieux l'idée d'un espace discret. Le formalisme mathématique des réseaux de spin, des graphes portant localement une information finie et dont les nœuds forment l'espace, évite en un sens les volumes finis ayant une densité infinie d'information. Il constitue donc un bon début de réponse aux problèmes évoqués, même si ce n'est pas le but principal de la théorie.

Une conséquence de cette conception de l'espace est qu'en se contractant, les trous noirs finiraient, à cause de la non-divisibilité infinie de l'espace, par rebondir et devenir des trous blancs (voir Pour la Science d'août 2019), que l'on tente aujourd'hui d'observer.

Disposerons-nous bientôt d'une théorie utilisable et efficace, proposant des outils mathématiques raisonnables pour modéliser la réalité physique et évitant les pièges des modèles à contenus excessifs d'informations? Nous l'ignorons, mais ce n'est pas impossible. Et dans ce cas, cela prouverait le bien-fondé des soucis que ressentent de nombreux physiciens et philosophes. ■

BIBLIOGRAPHIE

Quantum computing. Progress and prospects, National Academies Press, 2019 (<https://doi.org/10.17226/25196>)

N. Gisin, Indeterminism in physics, classical chaos and Bohmian mechanics. Are real numbers really real ?, David Bohm Centennial Symposium, London, Oct. 2017, 2019 (<https://arxiv.org/pdf/1803.06824.pdf>).

P. Arrighi et G. Dowek, The principle of a finite density of information, dans H. Zenil, Irreducibility and Computational Equivalence, Springer, pp. 127-134, 2015.

C. Rovelli et F. Vidotto, Covariant loop quantum gravity : An elementary introduction to quantum gravity and spinfoam theory, Cambridge University Press, 2014.

D. Ruelle, Are real numbers the same for physicists and mathematicians ?, 2012 (<https://bit.ly/31rJ3SW>).

L. Levin, Polynomial time and extravagant models, Problems of Information Transmission, vol. 39(1), pp. 92-103, 2003.

R. Penrose, L'esprit, l'ordinateur et les lois de la physique, Dunod, 1997.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

NOUS AURONS DES COQUELICOTS

Un jardin-mandala aux motifs inspirés des logos de compagnies agrochimiques met en valeur les «mauvaises herbes» devenues résistantes aux herbicides.

Fin octobre 2019, on apprenait que le nombre de requêtes visant le groupe allemand de chimie Bayer, *via* sa désormais filiale Monsanto, a explosé aux États-Unis. Près de 43 000 procédures contre le glyphosate, l'herbicide vedette de la firme, et ses possibles effets cancérigènes ont été recensées. Parallèlement, les appels à l'abandon de tous les pesticides de synthèse se multiplient et s'intensifient. Par exemple, près d'un million d'individus ont signé celui de l'association Nous voulons des coquelicots. Nécessité fera peut-être loi, tant les herbicides semblent perdre peu à peu leur raison d'être.

En effet, depuis le milieu des années 1970 et les débuts du recours intensif aux pesticides, le nombre de «mauvaises herbes» résistantes aux herbicides employés à leur rencontre ne cesse de croître, de façon exponentielle. En 2019, l'International Survey of Herbicide Resistant Weeds en comptait 505 dans le monde, dont 52 en France. De ces plantes, l'artiste allemande Eva-Maria Lopez a fait le matériau de l'œuvre qu'elle présente dans le cadre de l'exposition OuVert au Transpalette, à Bourges.

Sous la houlette des commissaires Jens Hauser, chercheur à l'université de Copenhague, et Aniara Rodado, chorégraphe et doctorante à l'École polytechnique, l'événement met en scène plusieurs dizaines d'artistes qui s'attaquent à la grande tendance actuelle, le *green washing*, cette volonté de tout «verdier» en espérant ainsi compenser les dégâts faits à la nature par notre civilisation. C'est un malentendu, car le vert ne correspond qu'aux longueurs d'onde inutiles au végétal puisque simplement réfléchies. Prudence donc avec le vert ! Ainsi,

Le jardin-mandala
We resist, composé
de plantes résistantes
aux herbicides et dont
les motifs sont la fusion
des logos de Bayer
et de Monsanto.

Adam Brown, maître de conférences à l'université d'État du Michigan, met au cœur de son installation le pigment «vert de Paris», toxique car à base d'arsenic, très prisé aux XVIII^e et XIX^e siècles dans les papiers peints (et même les bonbons !) pour retrouver un semblant de nature dans les intérieurs des citadins au moment de la révolution industrielle.

Le vert privilégié par Eva-Maria Lopez est aussi à manier avec précaution. Que fait-elle exactement ? Elle élabore des jardins-mandalas avec des plantes résistantes aux herbicides selon des motifs rappelant les différents logos des sociétés commercialisant ces produits. Celui





Croquis de l'un des jardins-mandalas du projet *I Never Promised You a Green Garden*, incluant les logos des sociétés Bayer, Monsanto, BASF, Syngenta...



installé à Bourges, nommé *We resist*, est une fusion des logos de Bayer et de Monsanto, en écho au rachat du second par le premier en juin 2018. La disposition du jardin, très symétrique, renvoie aux créations de l'architecte paysagiste français André Le Nôtre à qui l'on doit notamment le parc et les jardins de Versailles. Étonnamment, parmi les 14 espèces choisies, plusieurs ont des vertus médicinales. C'est le cas du bleuet *Centaurea cyanus*, de la camomille sauvage *Matricaria chamomilla*, du coquelicot *Papaver rhoeas*...

Toutes ces plantes ont acquis leur résistance dans des milieux fortement traités par des herbicides exerçant une

importante pression de sélection, comme des espaces urbains, des voies ferrées... Les cas de résistance, détectés aujourd'hui dans près de 70 pays, concernent 157 principes actifs appartenant à 23 des 26 classes d'herbicides reconnus. C'est dire l'ampleur du phénomène. L'ivraie raide *Lolium rigidum*, une graminée annuelle abondante en Australie, résisterait à douze classes d'herbicides, un record.

Le jardin *We resist* s'inscrit dans un projet plus vaste intitulé *I Never Promised You a Green Garden* («Je ne vous ai jamais promis un jardin vert»), où des jardins de plus grande ampleur, incluant les logos d'autres sociétés, seront plantés. L'idée

est de sensibiliser le public à l'importance d'une flore diversifiée et d'une agriculture plus saine, conformément à l'appel de Nous voulons des coquelicots. De toute façon, avec les phénomènes de résistance qui essaient, nous en aurons! ■

Exposition «OuVert», au Transpalette, à Bourges, jusqu'au 18 janvier 2020.
Programme complet: www.perspectivact.org



L'auteur a publié:
Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science...
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DES VOLANTS PLEINS D'ÉNERGIE

On utilise depuis longtemps des volants d'inertie pour stocker de l'énergie. Ces dispositifs constituent aujourd'hui des alternatives crédibles aux batteries.

Qu'y a-t-il de commun entre un tour de potier datant de 8000 ans, les machines à vapeur du XIX^e siècle et les derniers modèles de véhicules de formule 1 ? Ces machines comportent toutes un volant d'inertie, dispositif qui stocke de l'énergie sous la forme d'énergie cinétique de rotation. Aujourd'hui, les volants d'inertie sont capables de délivrer des puissances bien plus importantes que les batteries électriques. Et outre le stockage d'énergie, on les utilise aussi pour réguler des fluctuations de puissance mécanique ou électrique. Comment fonctionnent-ils et quelles sont leurs limitations ?

POUR FAIRE ROULER UN BUS OU UNE FORMULE 1

Commençons par un exemple, celui des Gyrobus. Ces véhicules, développés dans les années 1950 par la société suisse

Oerlikon, ont été utilisés pendant environ sept ans dans quelques villes à travers le monde. Entre deux arrêts, leur seule source d'énergie pour se propulser était un volant d'inertie de 1,6 mètre de diamètre et d'une masse de 1,5 tonne tournant autour de son axe à une vitesse de 3000 tours par minute.

L'énergie cinétique de cette masse en rotation est égale à la moitié du produit du « moment d'inertie » – qui caractérise la répartition et l'éloignement de la masse autour de l'axe – par le carré de la vitesse de rotation. Elle est ici de 23 mégajoules, soit l'énergie mécanique délivrée par un moteur diesel consommant 1,5 litre de gazole. Durant le trajet, l'énergie stockée dans le volant était convertie en énergie électrique pour alimenter le moteur électrique du bus, ce qui lui procurait une autonomie de 6 kilomètres, tout à fait adaptée au transport urbain.

En contrepartie, le volant ralentissait à mesure que le bus avançait. C'est

pourquoi, à certains arrêts, le bus se connectait à une borne électrique (déjà !) qui relançait le volant d'inertie jusqu'à sa vitesse maximale. La durée de la recharge (parfois de 3 à 4 minutes) et le danger potentiel que représentait cette roue massive tournant à grande vitesse ont conduit à l'abandon de ce système de propulsion.

En revanche, on retrouve de lourds volants d'inertie pour réguler les fluctuations rapides de production ou de consommation dans un réseau électrique. C'est par exemple le cas des centrales électriques construites par la société Beacon Power, aux États-Unis, qui

