

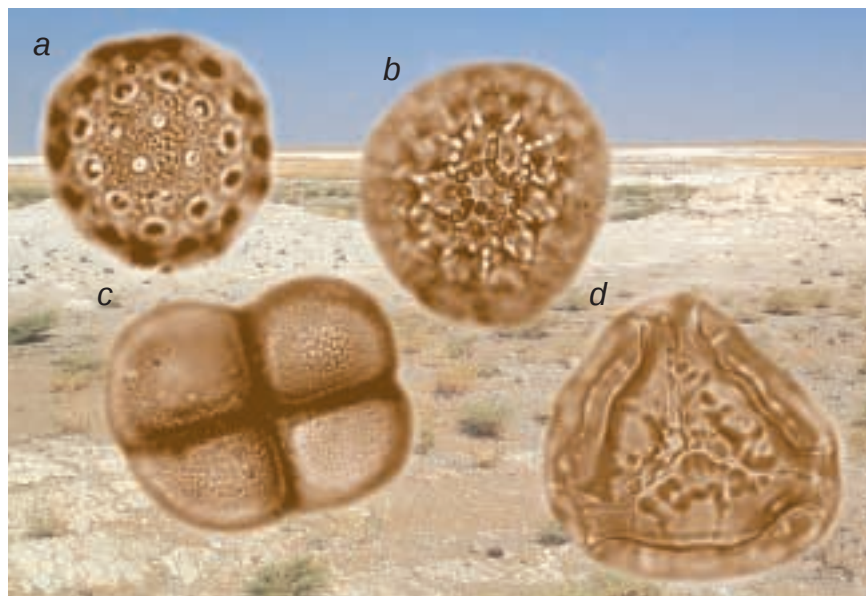
arabique d'Ouest en Est. Prenant naissance à l'Ouest du désert du Ramlat as-Sab'atayn, le Al-Jawf aurait formé un long fleuve unique avec l'Hadramawt, se jetant dans le golfe d'Aden. Aujourd'hui, ces deux fleuves sont séparés par le désert, mais des dépôts sédimentaires semblent indiquer qu'un tronçon de fleuve disparu les aurait reliés. Ce grand fleuve aurait été alimenté par tout le réseau des wâdîs venant des hauts plateaux voisins. La datation des sédiments fluviaux est difficile, car le fleuve entraîne des particules arrachées aux montagnes, dont on ne sait évaluer ni l'origine ni l'âge.

D'après les vestiges que nous avons retrouvés, les lacs semblent disparaître d'Arabie méridionale il y a environ 6 000 ans. Après cette date, l'aridité domine, interrompue seulement par quelques épisodes humides mineurs ou par de fortes pluies saisonnières. Pour repousser l'environnement désertique qui progressait, les habitants des royaumes Sud-arabiques ont élaboré d'importants dispositifs d'irrigation. Ils collectaient les eaux de ruissellement issues des pluies de mousson qui s'abattaient sur les hauts plateaux. La digue de Ma'rib illustre cet effort d'une société très élaborée, tournée vers l'agriculture et les échanges commerciaux.

La digue de Ma'rib

Cette digue de terre fut construite il y a environ 4 000 ans à la sortie d'un défilé ; elle était longue de 680 mètres. La retenue était alimentée par le wâdî Dhana et collectait les pluies d'un bassin versant d'environ 10 000 kilomètres carrés. Elle assurait l'irrigation d'une oasis, au Nord, de 4 300 hectares, et d'une autre, au Sud, de 5 300 hectares. L'eau s'élevait jusqu'au niveau du champ supérieur et irriguait d'un coup toute l'oasis ; le champ inférieur recevait l'excès d'eau du champ supérieur. Les champs étaient submergés d'une lame d'eau qui s'infiltrait lentement dans le sol. Un système d'écluses, de déversoirs et de canaux réglait les débits. De surcroît, la digue retenait les limons, de sorte que le sol était enrichi, et la production agricole améliorée. L'oasis de Ma'rib aurait nourri jusqu'à 50 000 personnes.

Ce système a fonctionné pendant plusieurs millénaires, avant d'être progressivement abandonné. Une des principales raisons de cet abandon



4. LES GRAINS DE POLLEN et les spores contenus dans les sédiments déposés au fond des lacs disparus du Yémen informent sur la flore passée. On y retrouve des grains de pollen de plantes herbacées poussant en milieu sec et salé, tels *Amaranthaceae* (a) et *Tribullus* (b), en milieu humide *Chenopodiaceae*/*Amaranthaceae* (près des étendues d'eau douce), tel le roseau *Typha* (c). On trouve également des spores de fougères (d).

est l'accumulation des limons : en 1 000 ans, le niveau des champs s'était élevé de 10 mètres. La pression des limons faisait régulièrement céder la digue, qui fut reconstruite sans relâche jusqu'à la fin du VI^e siècle. Le Coran relate ainsi la destruction définitive du barrage, vers 580 : « Certes, les Sabâ' dans leur habitat, avaient un signe. [C'était] deux jardins à dextre et senestre. "Mangez de l'attribution de votre Seigneur et soyez-lui reconnaissants ! [Ce pays est] un pays délicieux. [Allah] est un seigneur absolu." Les Sabâ' se détournèrent [cependant de nous]... Nous déchaînâmes contre eux l'inondation d'al-'Arim et, au lieu de leurs deux jardins, Nous leur donnâmes deux jardins poussant [des végétaux aux] fruits amers, des tamaris et de rares baies de jujubier. Cela, Nous leur avons donné en prix de ce qu'ils furent incrédules » (Sourate 34, 15-17).

Peu d'équipes multidisciplinaires regroupant archéologues, géologues spécialistes des milieux lacustres, de l'environnement et du climat du passé travaillent au Yémen, surtout dans son désert intérieur, le Ramlat as-Sab'atayn. Les études menées sur le site d'al-Hawa montrent à quelles difficultés les habitants ont été – et sont encore – confrontés pour pratiquer l'agriculture et l'élevage dans un écosystème aride. Différentes civilisations se sont succédé et ont évolué en fonction de leur capacité à maîtriser et à gérer les pluies et l'irrigation.

L'histoire de la civilisation disparue du Yémen soulève la question de l'adaptation de l'homme aux changements du climat et nous permettra de déterminer dans quelle mesure ces changements ont influé sur la prospérité, puis sur la décadence des civilisations. Enfin, les recherches menées sur les écosystèmes d'Arabie, parce qu'elles nous permettent de reconstituer les climats et les écosystèmes du passé, nous seront utiles pour valider les modèles du climat global de demain.

Anne-Marie LÉZINE est directeur de recherche au CNRS, dans le Laboratoire de paléontologie et stratigraphie de l'Université Paris VI.

A.-M. LÉZINE, *West African Paleoclimats during the Last Climatic Cycle from Atlantic Deep Sea Pollen Record*, in *Quaternary Research*, vol. 35, pp. 456-463, 1991.

A.-M. LÉZINE, J. CASANOVA, *Correlated Oceanic and Continental Records Demonstrate the Past Climate and Hydrology of North Africa (0-140Kyr)*, in *Geology*, vol 19, pp. 307-310, 1991.

A.-M. LÉZINE et al., *Holocene Lakes from Ramlat As-Sab'atayn (Yemen) Illustrate the Impact of Monsoon Activity in Southern Arabia*, in *Quaternary Research*, sous presse.

M.-L. INIZAN et al., *Paléolacs et peuplements holocènes du Yémen : le Ramlat as-Sabatayn*, in *Paléorient*, sous presse.

Calcul quantique avec des molécules

NEIL GERSHENFELD • ISAAC CHUANG

Les techniques de résonance magnétique nucléaire transforment les molécules des liquides en ordinateurs aux performances hors du commun.



P our trouver les diviseurs d'un nombre de 400 chiffres, exploiter nécessaire pour percer certains codes secrets, il faudrait, au plus rapide des ordinateurs actuels, des milliards d'années de calcul. En revanche, un nouveau type d'ordinateurs, utilisant des interactions quantiques, accomplirait cette décomposition en une année environ et mettrait en échec nombre de procédures cryptographiques. Aujourd'hui, les informations protégées sont encore en sécurité, car personne n'a réussi à construire un ordinateur quantique, mais la faisabilité d'un tel dispositif est établie. Loin de ressembler à la machine qui trône sur votre bureau, un tel ordinateur ressemblerait plutôt à la tasse de café posée à côté.

Des ordinateurs quantiques utilisant les molécules d'un liquide pourraient surpasser les limites des ordinateurs classiques. La miniaturisation de ces derniers finira inéluctablement par buter sur ses limites physiques fondamentales (notamment, la taille des transistors ou des connexions électriques ne peut être inférieure au diamètre d'un atome). Le perfectionnement des ordinateurs risque aussi d'être stoppé si la fabrication de microprocesseurs toujours plus puissants se révèle trop coûteuse.

La magie de la mécanique quantique pourrait résoudre ces deux problèmes.

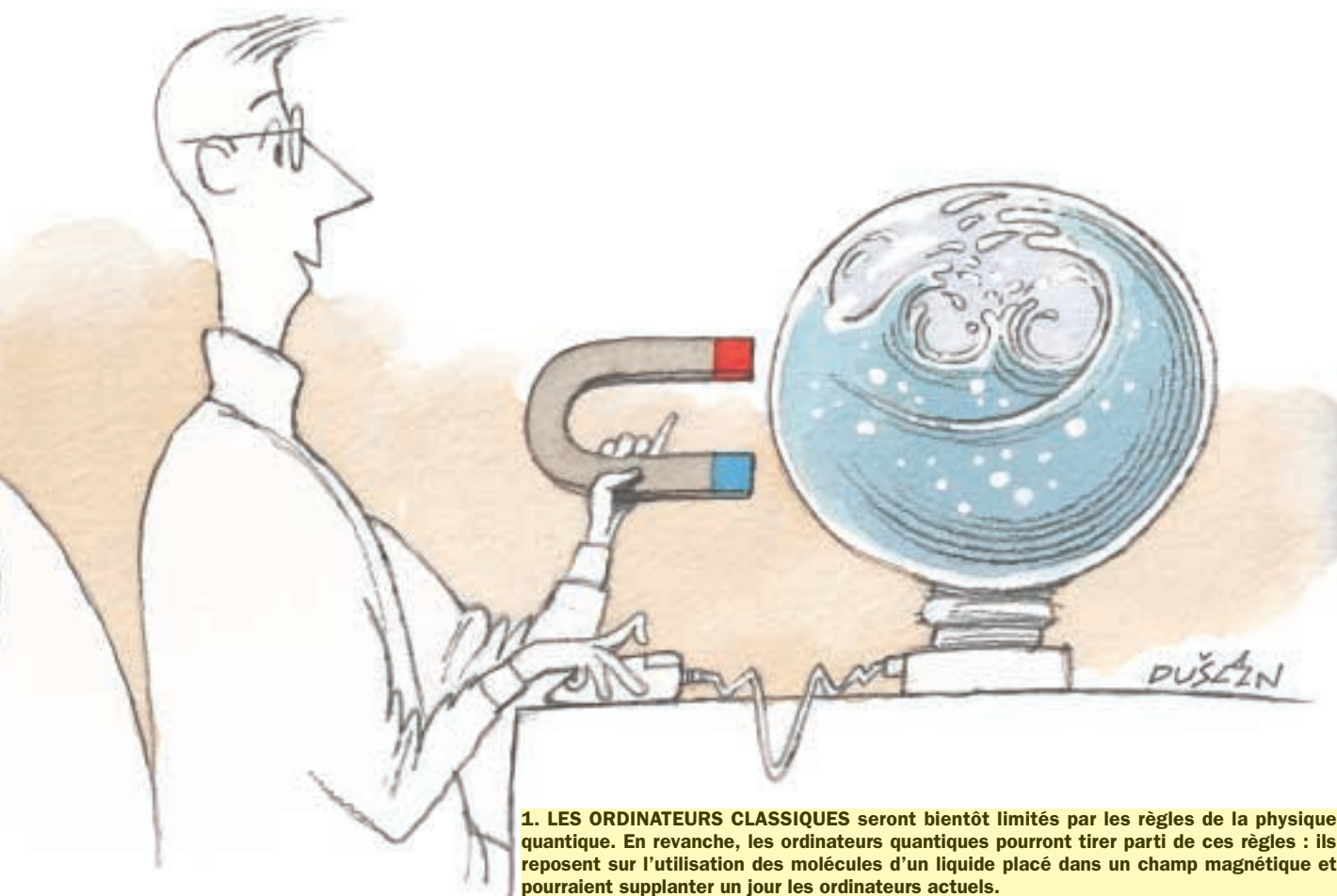
La supériorité des ordinateurs quantiques réside dans leur mode de codage du bit, l'unité fondamentale d'information. Dans les ordinateurs, les données sont codées par des mots binaires, c'est-à-dire des groupes de chiffres binaires, ou bits, 0 ou 1. Dans les ordinateurs classiques, ces valeurs 0 ou 1 sont associées à des tensions électriques des transistors. Un bit quantique, ou «qubit», peut être codé par un atome occupant l'un de deux états différents que l'on peut également désigner par 0 et 1. À l'instar de deux bits classiques, deux qubits peuvent occuper quatre états différents et bien définis (0 et 0, 0 et 1, 1 et 0, ou 1 et 1).

Mais, contrairement aux bits classiques, les qubits peuvent occuper simultanément les états 0 et 1, avec une probabilité d'occupation déterminée. La description d'un ordinateur quantique à deux qubits exige donc quatre coefficients : deux probabilités pour chaque qubit ; plus généralement, la description de n qubits néces-

site 2^n nombres, ce qui devient rapidement considérable. Par exemple, si n est égal à 50, la description des probabilités de tous les états accessibles exige environ 10^{15} nombres, ce qui dépasse la capacité du plus gros des ordinateurs classiques. Un ordinateur quantique offre des perspectives de puissance fantastiques : non seulement il occupera au même instant de multiples états (phénomène de «superposition»), mais il agira simultanément sur tous ces états. Autrement dit, une seule unité de traitement effectuera des myriades d'opérations en parallèle.

Une action à distance

Les qubits possèdent une autre propriété bien plus étrange et bien plus utile. Imaginons qu'un processus physique émette deux photons (des particules de lumière), l'un vers la droite, l'autre vers la gauche, et que les champs électriques oscillants associés à ces deux photons aient des orientations (nommées polarisations)



1. LES ORDINATEURS CLASSIQUES seront bientôt limités par les règles de la physique quantique. En revanche, les ordinateurs quantiques pourront tirer parti de ces règles : ils reposent sur l'utilisation des molécules d'un liquide placé dans un champ magnétique et pourraient supplanter un jour les ordinateurs actuels.

opposées. Tant qu'on ne les mesure pas, ces polarisations restent indéterminées ; mais, comme l'ont souligné Albert Einstein et quelques autres physiciens au début du siècle, la mesure de la polarisation d'un des deux photons détermine instantanément l'état de polarisation de l'autre, quelle que soit la distance entre les deux particules. Cette forte corrélation, aux allures surnaturelles, entre les particules connecte les qubits d'un ordinateur quantique.

En 1994, tirant profit de la corrélation et de la superposition quantiques, Peter Shor, des laboratoires AT&T, a conçu un algorithme grâce auquel, en théorie, un ordinateur quantique factoriserait un nombre bien plus rapidement que le plus puissant des ordinateurs classiques. Cette découverte eut un impact considérable : la sûreté des systèmes de cryptage, fondée sur la difficulté à factoriser les grands nombres, était soudain menacée. La découverte de P. Shor émut les milieux financiers, qui utilisent ce mode de cryptage pour

protéger le secret d'un grand nombre de transactions.

Personne n'avait imaginé qu'une telle percée viendrait d'une discipline étrangère à l'informatique ou à la théorie des nombres. Les informaticiens commencèrent à s'intéresser à la mécanique quantique, et certains physiciens à fureter du côté de l'informatique.

Manipuler les spins

Les chercheurs qui se penchèrent sur l'algorithme de P. Shor conclurent que la construction d'un ordinateur quantique opérationnel serait d'une difficulté diabolique : quasiment toute interaction d'un système quantique avec son environnement (par exemple, un atome qui percute soit un autre atome, soit un photon égaré) constitue une mesure. La superposition des états quantiques du système se transforme alors en un état unique bien défini, celui détecté par l'observateur. Cet effet de «décohérence» empêche de poursuivre les calculs quantiques. Si l'on veut maintenir la cohérence

d'un ordinateur quantique, il faut isoler ses mécanismes internes de l'environnement. Cependant, ces mécanismes doivent rester accessibles, car on doit charger les programmes, les exécuter et extraire les résultats.

Par d'élégantes expériences, Christopher Monroe et David Wineland, de l'Institut américain des standards et de la technologie, et Jeff Kimble, de l'Institut de technologie de Californie, avaient tenté de résoudre ce problème en isolant soigneusement le cœur quantique de leurs ordinateurs : quelques particules chargées peuvent être piégées dans des champs électromagnétiques, puis refroidies en états purement quantiques. Toutefois, ces dispositifs n'effectuent que des opérations quantiques rudimentaires, car ils ne comportent que quelques bits et ils perdent très rapidement leur cohérence.

Comment exploiter un jour un ordinateur quantique s'il faut l'isoler à ce point de son environnement ? L'année dernière, nous avons compris qu'un liquide ordinaire pouvait effec-

tuer toutes les étapes d'un calcul quantique, à savoir enregistrer les conditions initiales, effectuer des opérations logiques sur l'ensemble des superpositions d'états quantiques (qui sont corrélées), et restituer le résultat final. Avec un autre groupe de l'Université Harvard et de l'Institut de technologie du Massachusetts, nous avons découvert comment utiliser les techniques de la résonance magnétique nucléaire (ou RMN, plus connue pour son application à l'imagerie médicale nommée IRM) pour manipuler des informations

quantiques dans des fluides. Les chimistes, qui utilisent la RMN depuis des décennies pour étudier des molécules complexes, font de l'informatique quantique sans le savoir !

Un tube à essai rempli d'un liquide composé de molécules appropriées contient non plus un seul, mais un nombre fantastique d'ordinateurs quantiques individuels et résout le problème de la perte de cohérence : puisque chaque qubit résulte d'un vaste ensemble de molécules, la perte de cohérence de certaines molécules, lorsqu'on

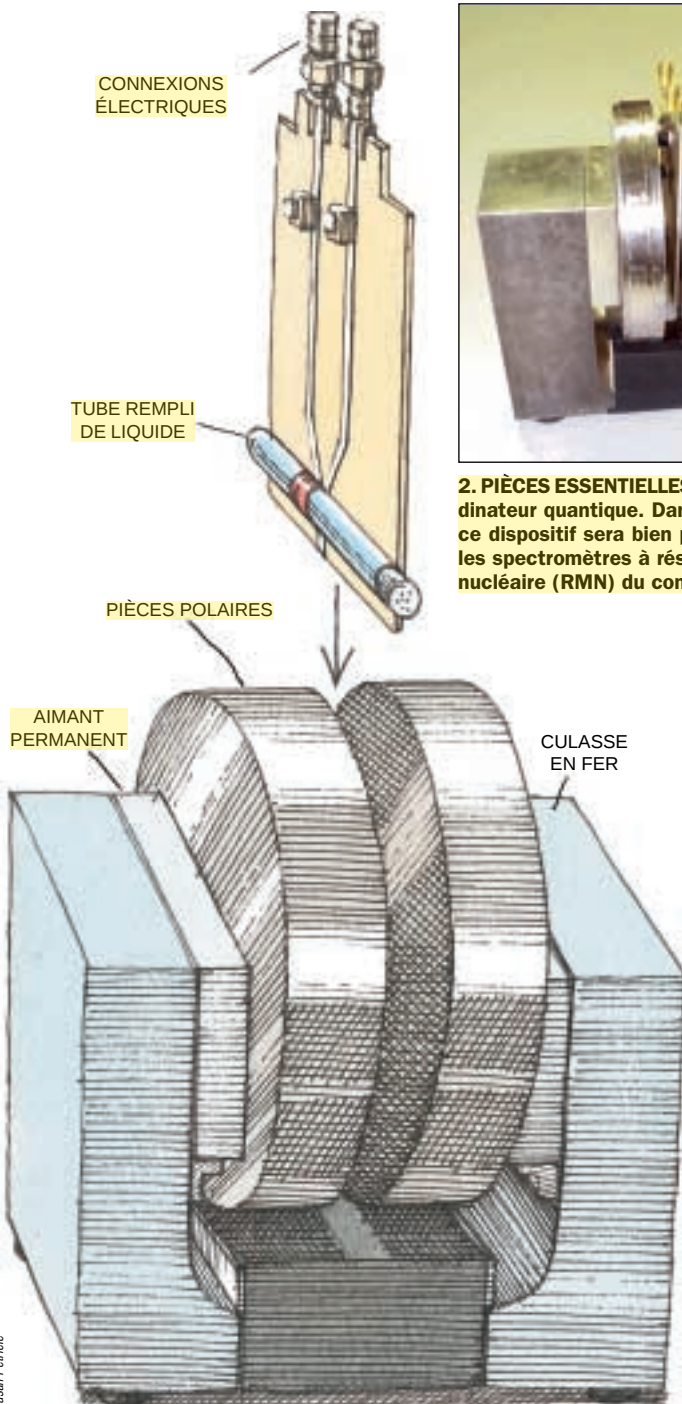
manipule le système ou que l'on mesure son état, n'a guère d'importance.

La résonance magnétique nucléaire agit sur les particules des noyaux atomiques composant les molécules du fluide. Les particules possédant un spin (le moment cinétique lié à leur rotation intrinsèque) se comportent, selon une analogie classique, comme de minuscules aimants. Placés dans un champ magnétique externe, ces «aimants» s'orientent dans la direction du champ. Quand on mesure la projection du spin dans cette direction, deux valeurs opposées sont possibles : dans le sens du champ (parallèle) ou dans le sens opposé (antiparallèle). Ces deux valeurs correspondent à deux états quantiques d'énergies différentes et constituent naturellement un qubit. On peut associer, par exemple, au spin parallèle le nombre 1 et au spin antiparallèle le nombre 0.

L'état de spin parallèle possède une énergie inférieure à celle de l'état antiparallèle (la différence entre ces deux énergies est proportionnelle à l'intensité du champ extérieur). Dans un champ magnétique nul, on mesurerait autant de spins dans un état que dans l'autre. Le champ appliqué favorise l'état parallèle, ce qui crée un léger déséquilibre entre les nombres de spins parallèles et antiparallèles : cette infime différence, de l'ordre de un millionième pour un champ de l'ordre de un tesla, est détectable par RMN.

La RMN fait intervenir, outre le champ magnétique constant, des champs électromagnétiques variables : l'application, pendant une courte durée, d'un champ magnétique tournant autour de l'axe du champ magnétique constant, à la bonne fréquence (déterminée par l'intensité du champ constant et par les propriétés intrinsèques de la particule mise en jeu), fait basculer une partie des spins entre les états parallèle et antiparallèle. On peut ainsi réorienter à volonté les spins des noyaux.

Par exemple, on modifie l'orientation de protons (qui, avec les neutrons, constituent les noyaux atomiques), placés dans un champ magnétique constant de 10 teslas, en appliquant un champ magnétique oscillant à 400 mégahertz (autrement dit, aux fréquences radio). Pendant la durée d'application du champ oscillant (typiquement quelques millièmes de seconde), les spins des noyaux tournent autour de la direc-



2. PIÈCES ESSENTIELLES d'un prototype d'ordinateur quantique. Dans quelques années, ce dispositif sera bien plus performant que les spectromètres à résonance magnétique nucléaire (RMN) du commerce.

Neil Gershenfeld et Yael Maguire

Dusan Petricic