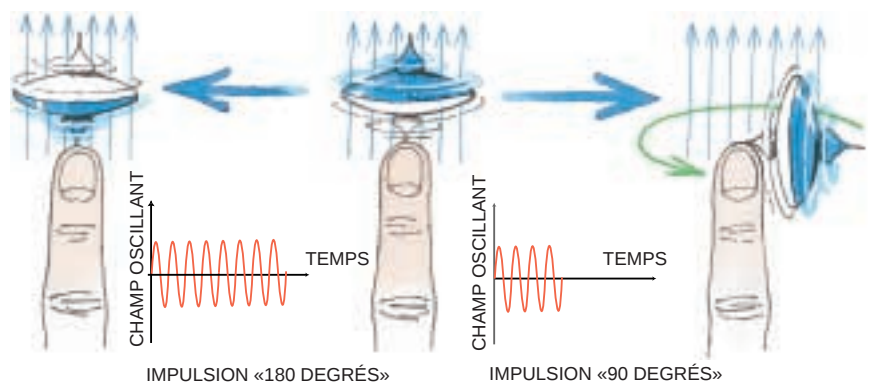


tion du champ variable, lequel est habituellement perpendiculaire au champ magnétique constant. En moyenne, le spin bascule d'un angle α par rapport à l'axe du champ constant, angle qui dépend de la durée d'application du champ tournant. Si cette durée correspond à un angle α de 180 degrés, l'excès de noyaux magnétiques antérieurement parallèles au champ fixe pointe alors dans la direction opposée, antiparallèle au champ fixe. Une impulsion deux fois plus brève laisse les particules avec une probabilité égale d'être parallèles ou antiparallèles au champ fixe ; le spin a alors basculé en moyenne de 90 degrés, et pointe perpendiculairement au champ fixe. Puis, comme une toupie d'enfant très inclinée par rapport à l'axe vertical de la gravitation, le spin effectue un mouvement de rotation, ou précession, autour du champ fixe, avec une fréquence caractéristique. Les particules effectuant une telle précession émettent un faible signal radio, détectable par le dispositif de RMN.

En fait, lors d'une expérience de RMN, les particules ne subissent pas uniquement l'action des champs extérieurs appliqués, car chaque noyau atomique modifie le champ magnétique dans son voisinage. Dans un liquide, l'agitation constante des molécules neutralise la plupart de ces perturbations magnétiques locales. En revanche, dans une même molécule, un noyau magnétique peut influencer ses voisins en perturbant les électrons qui sont en orbite autour d'eux.

Plutôt qu'une gêne, cette interaction au sein d'une molécule est un atout. On construit facilement, grâce à elle, une «porte» logique (l'unité de base d'un calcul) à l'aide de deux spins nucléaires. Pour nos expériences à deux spins, nous avons utilisé du chloroforme (CHCl_3) afin de tirer profit de l'interaction des spins des noyaux d'hydrogène et de carbone. Le noyau du carbone ordinaire, le carbone 12, ayant un spin nul, nous avons utilisé du chloroforme enrichi en atomes de carbone pourvus d'un neutron supplémentaire, qui possèdent ainsi un spin nucléaire non nul.

Supposons que le spin de l'hydrogène soit dirigé, soit vers le haut, soit vers le bas, parallèlement ou antiparallèlement à un champ magnétique vertical, tandis que le spin du carbone pointe uniquement vers le



3. ANALOGIE ENTRE UN NOYAU MAGNÉTIQUE (objet quantique) et une toupie (classique). En présence d'un champ magnétique constant, le spin nucléaire s'aligne dans la direction du champ (au centre). Si on applique ensuite un champ oscillant à la fréquence appropriée, ce spin prend une autre orientation. Les courbes en rouge représentent la composante de ce champ tournant selon une direction perpendiculaire à celle du champ magnétique constant, en fonction du temps. Par exemple, une impulsion «180 degrés» (à gauche) inverse totalement le spin ; une impulsion «90 degrés» le bascule perpendiculairement à la direction du champ magnétique (flèches verticales). Après avoir basculé, le spin tourne autour de la direction du champ magnétique, comme le fait une toupie d'enfant.

haut, parallèlement à ce champ magnétique fixe. Une impulsion radio bien choisie réoriente le spin du carbone dans un plan horizontal (perpendiculaire au champ fixe). Le noyau de carbone commence alors un mouvement de précession autour du champ magnétique constant, avec une vitesse de rotation qui dépend de l'orientation, parallèle ou antiparallèle au champ magnétique constant, du noyau d'hydrogène de la molécule. Après un certain temps, le spin du carbone pointe selon une certaine direction, soit dans un sens, soit dans le sens opposé, selon que le spin de l'hydrogène voisin pointe vers le haut ou vers le bas. À cet instant, l'application d'une autre impulsion radio fait tourner le noyau de carbone de 90 degrés supplémentaires. Il s'oriente alors soit vers le bas, soit vers le haut, selon que l'hydrogène adjacent pointe, respectivement, vers le haut ou vers le bas.

Ces opérations correspondent à ce que les ingénieurs électroniciens nomment une porte logique «OU exclusif», qui serait mieux désignée sous le nom de porte «NON contrôlé» (car l'état d'une entrée détermine si le signal présenté à l'autre entrée est inversé à la sortie). Tandis que les ordinateurs classiques nécessitent des portes similaires à deux entrées et des portes NON à une entrée, un groupe de chercheurs a montré, en 1995, que l'on peut réaliser des calculs quantiques à l'aide de rotations opérant sur des spins individuels et de portes «NON contrôlé». En fait, les

portes logiques quantiques de ce type offrent plus de possibilités que leurs équivalents classiques, car les spins sur lesquels elles reposent peuvent être dans une superposition d'états parallèles et antiparallèles. Le calcul quantique peut donc opérer simultanément sur une combinaison d'entrées apparemment incompatibles.

Deux choses à la fois

En 1996, avec Mark Kubinec, de l'Université de Berkeley, nous avons entrepris la construction d'un ordinateur quantique à deux bits, à partir d'un dé à coudre de chloroforme. Même pour un ordinateur aussi modeste, la préparation de l'état initial exige un travail considérable. Une succession d'impulsions radio agit sur les noyaux contenus dans le fluide expérimental, faisant basculer une partie des spins parallèles en excès, ce qui donne les proportions voulues de spins parallèles et antiparallèles. Puis on modifie séquentiellement ces qubits. Contrairement aux bits d'un ordinateur électronique classique, qui traversent en bon ordre des rangées de portes logiques à mesure que se déroulent les calculs, ces qubits ne vont nulle part : les portes logiques viennent à eux grâce à diverses manipulations utilisant la RMN. En somme, le programme à exécuter est traduit en une série d'impulsions radio.

Notre premier test du calcul quantique porta sur un ingénieux algorithme de recherche élaboré par Lov

Grover, des Laboratoires Bell. Avec un algorithme classique, la recherche d'un élément dans un ensemble de n objets exige en moyenne $n/2$ tentatives. Étonnamment, l'algorithme de L. Grover localise l'objet en $\sqrt{n}$ tentatives environ. Nous avons illustré ce gain de temps avec notre ordinateur quantique à deux bits, qui retrouve en une seule étape un objet, dans une liste de quatre objets. L'approche classique revient à ouvrir un cadenas à deux bits (à deux chiffres, chacun étant 0 ou 1) : on trouve très rarement la bonne combinaison du premier coup ; en moyenne il faut deux à trois tentatives.

Une limitation fondamentale de l'ordinateur à chloroforme est son petit

nombre de qubits. On pourrait augmenter ce nombre, mais n ne peut être plus grand que le nombre d'atomes de la molécule utilisée. Avec les dispositifs de RMN actuels, les plus gros ordinateurs quantiques manipuleraient seulement une dizaine de qubits (parce que, à température ambiante, l'intensité du signal désiré décroît rapidement à mesure que le nombre de noyaux magnétiques de la molécule augmente). Un équipement de RMN particulier, construit pour une molécule bien adaptée, multiplierait probablement ce nombre par trois ou par quatre.

Pour créer des ordinateurs encore plus gros, il faudrait recourir à d'autres techniques, comme le pompage optique, pour «refroidir» les spins : la

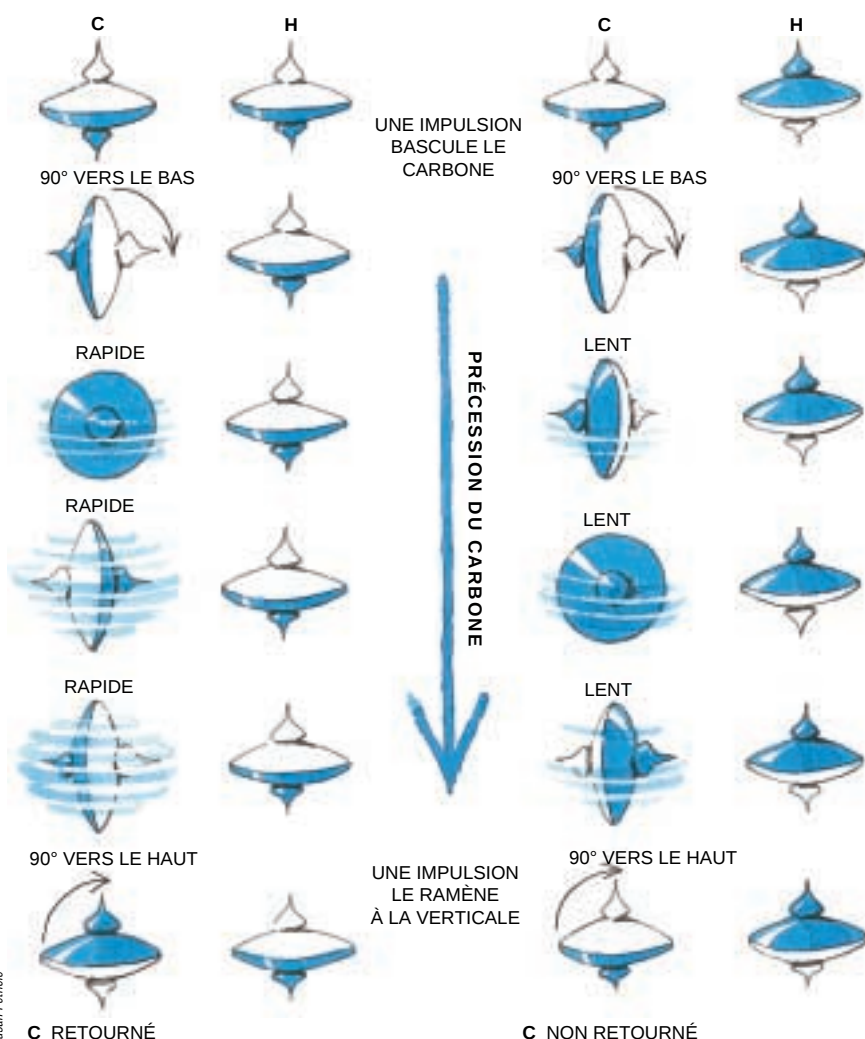
lumière émise par un laser orienterait presque tous les noyaux dans un même sens, sans qu'on ait besoin de geler le liquide (ce qui détruirait les grands temps de cohérence entre molécules).

La construction d'ordinateurs quantiques plus gros ne semble donc pas insurmontable. Quelle serait leur rapidité ? La durée d'un cycle dans un ordinateur quantique est déterminée par la plus petite vitesse d'inversion des spins. Celle-ci dépend à son tour des interactions entre les spins ; elle est généralement comprise entre quelques hertz et quelques centaines de hertz. Cela paraît très lent par rapport aux mégahertz (millions de cycles par seconde) atteints par les ordinateurs classiques. Pourtant, un ordinateur quantique disposant de suffisamment de qubits présenterait un tel parallélisme qu'il factoriserait un nombre de 400 chiffres en une année environ.

Perspectives

Comment le construire, concrètement ? Trouver des molécules contenant suffisamment d'atomes ne pose pas de difficultés, mais, lorsque la taille des molécules augmente, les interactions entre les spins les plus distants deviennent trop faibles pour être utilisées comme portes logiques. Pourtant, tout n'est pas perdu : Seth Lloyd, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a montré que l'on pouvait en théorie construire de puissants ordinateurs quantiques, même si chaque atome n'interagit qu'avec ses plus proches voisins, à la manière des ordinateurs parallèles actuels. Ces ordinateurs quantiques pourraient utiliser de longues molécules hydrocarbonées et les techniques de la RMN. Les spins des nombreux noyaux atomiques, liés entre eux en longues chaînes, serviraient de qubits.

Un autre obstacle au calcul par RMN est la cohérence. Comme des nageurs synchronisés qui évolueraient sans repères, les noyaux d'un liquide perdent leur cohérence au bout de quelques secondes à quelques minutes, et les signaux de RMN qu'ils émettent se brouillent. Les plus grands temps de cohérence connus pour les fluides, comparés aux temps de cycle caractéristiques, suggèrent que les ordinateurs quantiques pourraient effectuer environ un millier d'opérations avant de perdre leur cohérence. Par chance, on peut repousser cette limite par l'ajout de



4. UNE PORTE LOGIQUE «NON CONTRÔLÉE» inverse l'une des deux entrées en fonction de l'état de la seconde entrée. Les auteurs ont fabriqué une porte «NON contrôlée» quantique en utilisant l'interaction entre les spins nucléaires de l'hydrogène et du carbone des molécules de chloroforme. Premièrement, une impulsion oscillante fait pivoter le noyau de carbone de 90 degrés. Ce noyau s'anime alors d'un mouvement de précession, qui est un peu plus rapide si l'hydrogène adjacent est dans un état que s'il est dans l'état opposé (sur la figure, on a noté «rapide» et «lent» pour simplifier). Après un laps de temps précis, une autre impulsion «90 degrés» provoque l'inversion du carbone (à gauche) ou le ramène dans sa position initiale (à droite), selon l'état de l'hydrogène voisin.