

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

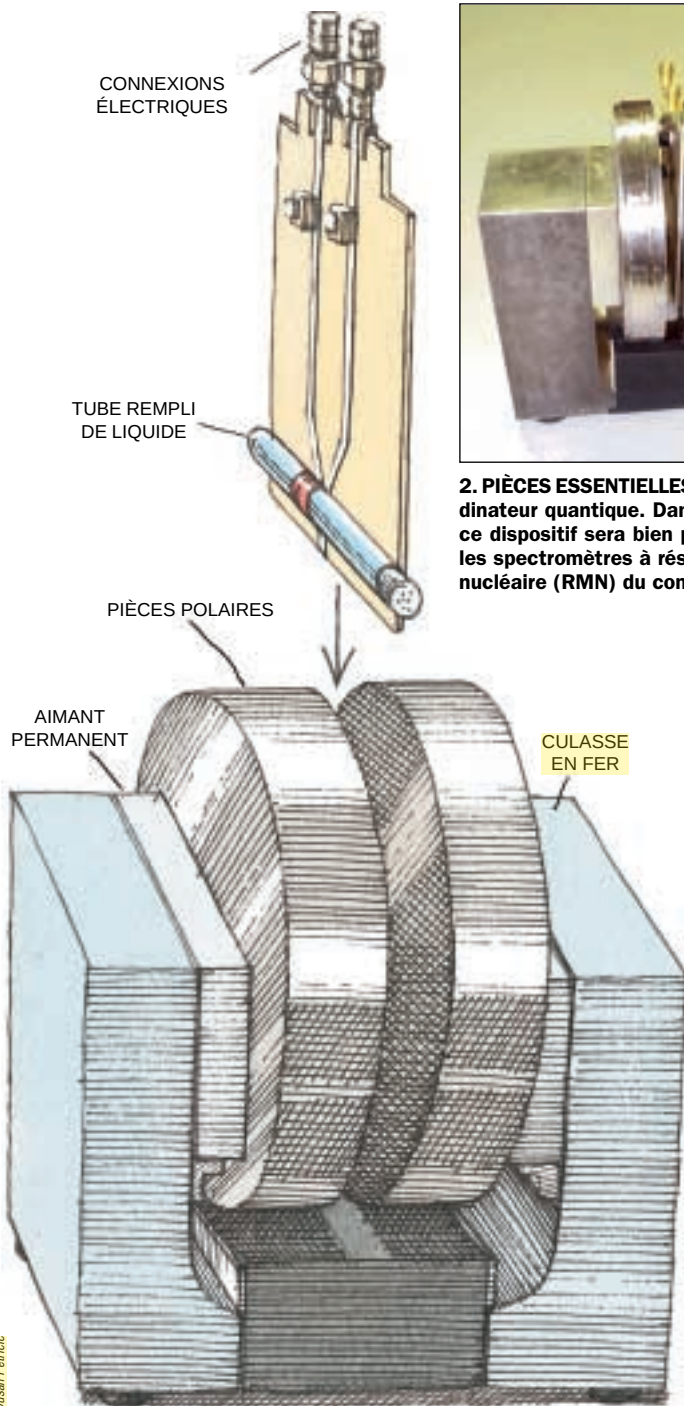
manipule le système ou que l'on mesure son état, n'a guère d'importance.

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

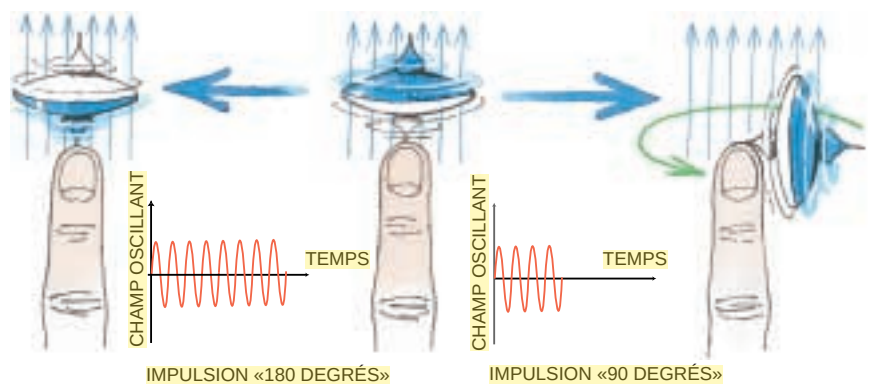
Dusan Petricic

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