

que pour tous ceux qui cherchent à exploiter l'intrication, par exemple pour construire des ordinateurs quantiques, le principal défi est la difficulté de préserver l'intrication.

En 2003, une expérience a prouvé que des systèmes de plus grande taille peuvent rester intriqués quand on peut limiter ou contrecarrer la fuite d'information. Gabriel Aeppli, de l'*University College* de Londres, et ses collègues ont placé un morceau de fluorure de lithium dans un champ magnétique. Dans ce champ, les spins des atomes de ce sel se comportent comme de petites aiguilles aimantées susceptibles de pivoter pour s'aligner le long des lignes de champ, une réaction nommée susceptibilité magnétique. En outre, les interactions des atomes produisent une sorte de pression collective qui pousse chacun des spins à s'aligner plus rapidement. En faisant varier l'intensité du champ magnétique, les expérimentateurs ont mesuré à quelle vitesse les atomes s'alignent. Ils ont constaté que les spins s'alignent bien plus vite que ne le laissait prévoir l'intensité de leurs interactions mutuelles. Selon les auteurs de la recherche, la seule explication possible est qu'un état intriqué macroscopique s'est formé à partir des états individuels de spins des quelque  $10^{20}$  atomes formant le morceau de sel...

Afin d'éviter les effets décohérents de l'agitation thermique, l'équipe de G. Aeppli a réalisé ses expériences à très basse température – quelques millikelvins

**IL MIGRE CHAQUE ANNÉE JUSQU'EN AFRIQUE ÉQUATORIALE, puis revient au printemps, un périple de 13 000 kilomètres qu'il effectue sans se perdre. Le rouge-gorge aurait une sorte de boussole interne et... quantique.**

seulement. Depuis, Alexandre Martins de Souza, du Centre brésilien de recherche en physique de Rio de Janeiro, et ses collègues ont mis en évidence au sein de matériaux tels que le carboxylate de cuivre la possibilité d'obtenir une intrication macroscopique à température ambiante, voire supérieure. Dans les systèmes qu'ils étudient, l'interaction entre spins est assez forte pour contrecarrer l'agitation thermique. Dans d'autres cas, il est possible d'obtenir une intrication macroscopique au moyen d'une force extérieure qui annule les effets de l'agitation thermique. Les physiciens ont ainsi créé de l'intrication au sein de systèmes toujours plus grands et

## EXPÉRIENCES D'INTRICATION : ÇA CHAUFFE

**Les effets quantiques ne se limitent pas aux particules subatomiques. Ils apparaissent également dans des expériences sur des systèmes plus grands et plus chauds. Ci-dessous, quelques exemples sont proposés.**

Observation d'une figure d'interférences entre fullerènes, montrant pour la première fois que les molécules, comme les particules subatomiques, se comportent comme des ondes.

Observation d'une susceptibilité magnétique très élevée au sein de carboxylates métalliques à une température de 290 kelvins, qui ne peut s'expliquer que par l'intrication de milliards d'atomes de ces sels.

Observation d'effets quantiques qui augmentent l'efficacité de la photosynthèse dans deux espèces d'algues marines.

Observation d'effets quantiques au sein de molécules géantes, dont une en forme de pieuvre contenant 430 atomes.

Intrication de trois bits quantiques au sein d'un circuit supraconducteur. La procédure utilisée pourrait servir à obtenir des systèmes quantiques de toute taille.

Mise en vibration d'une microplaque de 40 micromètres de long (presque visible à l'œil nu) à deux fréquences en même temps.

Intrication de chaînes de huit ions de calcium maintenus dans un piège à ions. Aujourd'hui, les chercheurs sont capables de le faire sur des chaînes de 14 ions de calcium.

Intrication des mouvements vibratoires (plutôt que du spin ou d'autres propriétés internes) d'ions de béryllium et de magnésium.

à des températures de plus en plus élevées; cela va d'ions piégés par des champs électromagnétiques jusqu'à des atomes ultrafroids disposés en réseau, en passant par des bits quantiques supraconducteurs (voir l'encadré ci-dessous).

**l'atome. Par exemple, on peut faire en sorte que si l'électron est proche du noyau, l'atome se déplace à gauche, et que si l'électron est plus loin du noyau, l'atome se déplace à droite. Ainsi, l'état électronique se trouve intriqué avec l'état de mouvement de l'atome, de la même façon que la désintégration radioactive est intriquée avec l'état du chat. On peut ainsi avoir un état intriqué avec des superpositions, où le félin à la fois vivant et mort est remplacé par un atome se déplaçant à la fois vers la gauche et vers la droite.**

D'autres expériences transposent à plus grande échelle cette idée de base, de façon qu'un immense nombre d'atomes se retrouvent dans un état intriqué, impossible en physique classique. Or, si l'on peut conférer un état intriqué à des solides même lorsqu'ils sont grands et chauds, il n'y a qu'un pas à faire pour se demander si l'intrication pourrait aussi être présente dans les êtres vivants.

Un tel « organisme quantique » pourrait être *Erithacus rubecula*, un étonnant petit oiseau, qui migre chaque année entre la Scandinavie et l'Afrique équatoriale. Ce périple de 13 000 kilomètres, le rouge-gorge familial (son nom français) semble l'effec-

Ces systèmes sont analogues au chat de Schrödinger. Considérons un atome ou un ion: ses électrons peuvent se trouver près du noyau ou ailleurs, ou les deux à la fois. Un tel électron se comporte donc comme l'atome radioactif contenu dans la cage du chat de Schrödinger, qui est à la fois dans l'état désintégré et dans l'état non désintégré. Indépendamment de ce que fait l'électron, l'atome peut par ailleurs bouger, par exemple vers la gauche ou vers la droite. Ce mouvement joue le rôle du chat mort ou vivant. En manipulant l'atome à l'aide de lasers, les physiciens parviennent à coupler les états de position de l'électron et de mouvement de