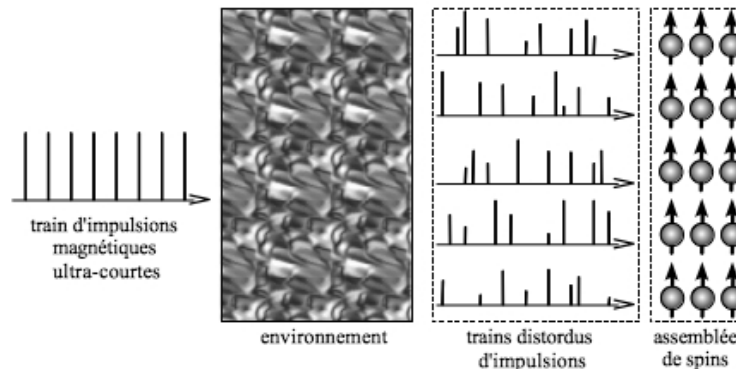


Un chat de Schrödinger frappé par un chat d'Arnold

Une étudiante et un chercheur de l'institut UTINAM ont étudié le comportement d'une assemblée de spins frappés chaotiquement par des trains d'impulsions magnétiques ultra-brèves. Les résultats de cette étude ouvrent la possibilité de contrôler de tels systèmes dans l'optique de la réalisation d'ordinateurs quantiques ou de l'amélioration des techniques d'imagerie par résonance magnétique.

Un spin est une sorte de boussole microscopique attachée à certaines particules. Les électrons et les noyaux atomiques qui constituent la matière sont tous équipés de spins. Les interactions de ces spins avec un champ magnétique externe peuvent être utilisées pour sonder la matière; comme on le fait en imagerie par résonance magnétique nucléaire (dont les IRM médicaux sont une application). On peut également essayer de contrôler l'orientation de ces spins à l'aide d'un champ magnétique externe. Le but d'un tel contrôle peut être: l'augmentation du contraste en imagerie magnétique; l'utilisation d'un assemblage de spins comme un composant électronique de taille nanométrique (on parle de spintronique car les spins y remplaceraient les électrons du courant électrique); ou l'utilisation d'un ensemble de spins comme un calculateur informatique (on parle d'ordinateurs quantiques car les spins qui remplaceraient les bits des ordinateurs classiques se comportent suivant les lois particulières de l'infinitement petit – les lois de la mécanique quantique –).

Une méthode prometteuse pour contrôler des spins et de le faire en les frappant par des trains d'impulsions magnétiques ultra-brèves. Pour les applications souhaitées du contrôle, il serait nécessaire que tous les spins voisins d'un système soient frappés de la même façon afin que ceux-ci réagissent de manière coordonnée. Mais en pratique, ces spins seraient plongés dans un environnement complexe (le matériau qui leur sert de support en particulier). Celui-ci pourrait distordre de façon différente pour chaque spin le train d'impulsions (par atténuation de l'intensité et retardement des impulsions). Le risque est que chaque spin réagisse très différemment des autres de sorte qu'il n'y ait plus de réponse cohérente de l'assemblée de spins.



Représentation schématique de la distorsion du train d'impulsion de contrôle des spins

L'une des propriétés quantiques les plus importantes pour les applications, la superposition d'états, est très sensible à ce phénomène de décohérence. La superposition d'états est la possibilité pour un objet quantique d'être dans une superposition d'états classiquement incompatibles. Elle est souvent évoquée par la parabole du chat de Schrödinger, qui héritant au cours d'une expérience des propriétés quantiques d'un atome d'uranium, se retrouve à la fois mort et vivant. Comme le chat de Schrödinger qui peut être dans une superposition de vie et de mort, un spin peut être dans une superposition de "pointant vers le haut" et de "pointant vers le bas".

C'est à travers un modèle mathématique et des simulations numériques, qu'un chercheur en physique mathématique et son étudiante ont étudié le comportement d'une assemblée de spins soumise à des trains distordus d'impulsions ultra-brèves. Dans le cas où l'environnement induit des distorsions purement aléatoires, la cohérence de l'assemblée chute immédiatement, rapidement et de façon irréversible. Une situation qui est peu propice à un contrôle efficace. Le but des travaux qui viennent d'être réalisés était l'étude d'un autre type d'environnement qui induit des distorsions chaotiques. Un système chaotique est très différent d'un système aléatoire car il est déterministe (si on connaît parfaitement l'état du système à un instant donné, on peut prévoir parfaitement l'état du système à n'importe quel instant futur). Mais là où le bât blesse, c'est dans la nécessité de connaître *parfaitement* l'état du système. En effet pour un système chaotique, une petite déviation par rapport à l'état idéal, même infinitésimale, finira toujours par s'amplifier au point qu'après un certain temps, l'état du système sera radicalement différent de celui attendu. C'est ce qui a fait dire à Edward Lorenz à propos du comportement chaotique de l'atmosphère, que la déviation induite par la non prise en compte du battement d'ailes d'un papillon au Brésil, pouvaient conduire à ne pas prédire un ouragan s'abattant sur le Texas. Néanmoins, l'effet du chaos n'est pas immédiat, et il existe une durée sur laquelle la déviation n'est pas trop amplifiée. On l'appelle l'horizon de prédictibilité. Les distorsions du train d'impulsions de contrôle des spins, constituent autant de déviations par rapport au contrôle idéal.

Pour modéliser un processus de distorsions chaotiques par atténuation et retard des impulsions, les chercheurs de l'institut UTINAM ont utilisé un "générateur de chaos" bien connu des mathématiques, que l'on appelle "l'application du chat d'Arnold". La référence à un chat vient ici de l'acronyme anglais "cat" (qui peut littéralement se traduire par "chat") pour "continuous automorphisms of the torus" (automorphismes continus sur le tore). Les résultats montrent que dans le cas où une assemblée de spins est frappée chaotiquement, la cohérence est conservée sur une relativement longue période avant de s'effondrer soudainement à une vitesse comparable aux cas des frappes aléatoires. Cet "horizon de cohérence" s'avère

être plus long que l'horizon de prédictibilité du chaos. Ce résultat inattendu a été interprété comme le fait que le désordre des impulsions induit par le chaos, ne se traduisait en désordre dans l'assemblée de spins qu'avec un retard. En étudiant l'entropie du système (c'est à dire la mesure physique du désordre), il a été montré qu'il fallait que l'entropie cumulée de l'ensemble des impulsions atteigne un certain seuil, pour que l'entropie des spins commencent à augmenter, retardant ainsi le début de la décohérence.

Ce résultat montre que dans le cas où l'environnement agit de façon chaotique sur le train d'impulsions, la durée sur laquelle on peut espérer maintenir un contrôle cohérent de l'assemblée de spins pourrait être suffisamment longue pour les applications. L'étape suivante de ces travaux consiste à étudier des modélisations plus réalistes d'environnements chaotiques et d'étudier les cas où l'environnement n'agit pas que sur les impulsions de contrôle, mais aussi directement sur les spins eux-mêmes. Si des tests expérimentaux de ces résultats en informatique quantique et en spintronique sont encore hors de portée à l'heure actuelle, des expériences en imagerie magnétique pourraient être réalisées par la suite.

D. Viennot & L. Aubourg, *Decoherence, relaxation and chaos in a kicked-spin ensemble*, Physical Review E **87**, 062903 (2013).

