

On sait désormais stocker les photons pendant une minute

Dans plusieurs Flash Infos, nous avons souligné l'enjeu qui s'attache à la mise au point d'architectures quantiques utilisant les propriétés des qubits, afin notamment de construire des ordinateurs quantiques dotés de performances très supérieures aux machines actuelles fondées sur le maniement de bits conventionnels.

Dans le numéro 2013-3 de la REE, nous avons présenté les progrès réalisés dans l'intrication spin-photon qui pourrait constituer une première étape dans la réalisation d'architectures extensibles d'ordinateurs quantiques reposant sur un réseau de boîtes quantiques (quantum dots) où se feraient certaines opérations élémentaires sur les qubits et sur des photons intriqués assurant la transmission de l'intrication entre les différents nœuds du réseau de boîtes quantiques.

Ces schémas reposent sur le fait que le photon peut voyager sur de relativement longues distances sans interagir significativement avec son environnement. On peut ainsi envisager de transmettre, pour des applications cryptographiques, des photons intriqués avec d'autres qubits

sur des distances très grandes dans des fibres optiques. Cependant, il restera nécessaire de développer des répéteurs quantiques capables de stocker les états quantiques des photons et de les restituer après amplification sans altération des propriétés d'intrication de ces photons. Se pose alors la question du développement de mémoires quantiques. Que ce soit à longue distance ou à courte distance, la mise au point de mémoires quantiques est un élément clé du développement de toute architecture quantique.

On sait depuis quelques années construire en laboratoire des dispositifs de mémoires quantiques fonctionnant en milieu gazeux. Plusieurs dispositifs utilisant des phénomènes d'optique non linéaire ont été proposés pour ralentir la lumière voire l'arrêter complètement pendant une durée très courte. L'inconvénient des dispositifs « classiques » de ralentissement de la lumière est le fort taux d'absorption qu'ils entraînent.

A partir de 2001, des expériences ont été menées en utilisant le phénomène optique de **transparence induite électromagnétiquement** (TIE). La TIE est un phénomène optique non linéaire qui apparaît lorsqu'un milieu excité par pompage optique reçoit un faisceau sonde. Il suppose que le milieu présente trois états possibles, par exemple

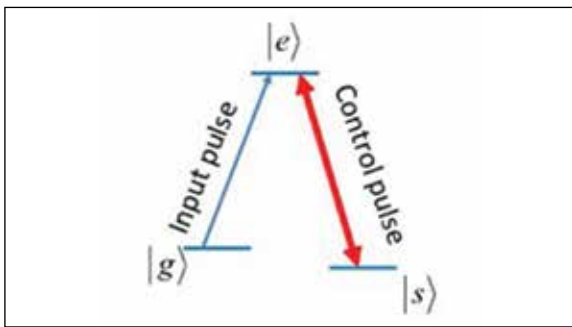


Figure 1 : Niveaux d'énergie dans un milieu donnant naissance à une transparence induite électromagnétiquement.

deux états de base $|g\rangle$ et $|s\rangle$ et un état excité $|e\rangle$, tels que référencés dans la figure 1.

L'état excité peut être atteint par des transitions optiques autorisées. Parmi celles-ci figurent la transition directe $|s\rangle \rightarrow |e\rangle$ et la transition indirecte $|s\rangle \rightarrow |e\rangle \rightarrow |g\rangle \rightarrow |e\rangle$. Ces transitions, sous certaines conditions, ont la même probabilité mais des amplitudes de probabilité de phases opposées. Elles interfèrent destructivement sous l'effet du faisceau de pompe et donne naissance, dans le spectre d'absorption du faisceau sonde, à une fenêtre de transparence lorsque le faisceau de pompe (ou faisceau de contrôle) est activé (figure 2).

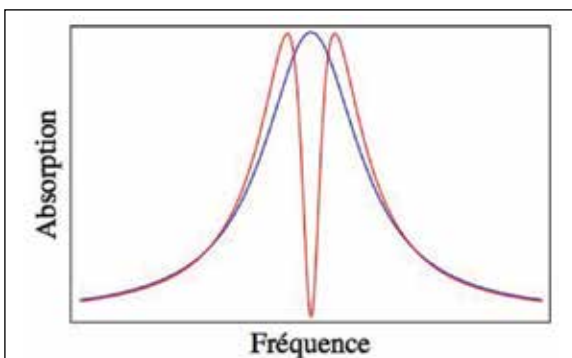


Figure 2 : Spectre d'absorption de la TIE. En rouge avec le faisceau de pompe et en bleu sans ce dernier. Source : Wikipedia.

Dans cette fenêtre, la probabilité de transition entre l'un des deux états de base et l'état excité s'évanouit et avec elle l'absorption de la fréquence correspondante. Mais le changement dans l'absorption entraîne un changement extrêmement brutal dans l'indice de réfraction qui réduit la vitesse des pulses de lumière entrant, au point de l'annuler. En éliminant le faisceau de pompe quand la lumière de la sonde est dans le milieu, l'énergie des photons est convertie en excitation de spin des atomes (appelée vagues de spin) qui peut être conservée aussi longtemps que la cohérence entre les états de spins peut survivre. En rétablissant le faisceau de

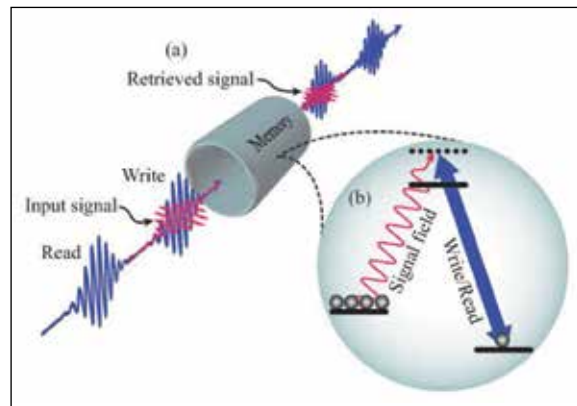


Figure 3 : Dans le système à vapeur de césium, une impulsion laser du faisceau de pompe (en bleu) amène le système dans un état où il arrête la lumière. Le signal porté par un deuxième faisceau laser (en rouge) est stoppé et le photon est converti en ondes de spin dans le matériau. Un deuxième pulse laser rétablit la transparence et le photon est réémis.

Source : Ian Walmsley & Al - University of Oxford.

contrôle, on « libère » la lumière qui est restituée avec ses propriétés quantiques (figure 3).

La durée pendant laquelle les photons peuvent être stockés dépend de la durée pendant laquelle peut être maintenue la cohérence des états de spin dans le milieu atomique. Cette durée est fonction des interactions entre les atomes et leur environnement. Dans un premier temps, les durées de stockage des photons ont été limitées à quelques μs . En 2011, une équipe anglaise, animée par Ian Walmsley de l'université d'Oxford, a proposé un système fonctionnant à température ambiante et utilisant un nuage de vapeur de césium, matériau utilisé dans les horloges atomiques. Au début de l'année 2013, une équipe du Georgia Institute of Technology a obtenu des temps de stockage de 16 s en plaçant les atomes dans un réseau optique limitant leurs mouvements et donc leur interaction avec le milieu environnant.

L'expérience relatée en juillet 2013 par Georg Heinz, Christian Hubrich et Thomas Halfmann, de l'université de Darmstadt (Phys. Rev. Lett. 111, 2013), apporte des éléments nouveaux dans plusieurs directions. Elle utilise un milieu solide, en l'occurrence un cristal de silicate d'yttrium dopé au praséodyme, $\text{Pr}^{3+} : \text{Y}_2\text{SiO}_5$. Il est clair que l'utilisation d'un milieu solide se prête mieux, a priori, à de futures applications industrielles. Par ailleurs, ce milieu présente des temps de relaxation de l'état excité (T_1) d'environ 100 s, ce qui est assez long. Ce temps de relaxation constitue la limite physique de la durée T_2 pendant laquelle la cohérence des états de spin peut être maintenue. Mais amener T_2 proche de T_1 posait de difficiles problèmes technologiques que l'université de Darmstadt

est parvenue à surmonter en contrebalançant les divers facteurs de décohérence par des champs magnétiques ajustés en tenant compte de la jungle hyperfine des états d'énergie des atomes.

In fine, les chercheurs de Darmstadt sont parvenus à stocker la lumière pendant une période d'une minute environ, avec, il est vrai, un rendement très faible (de l'ordre de 0,05 %). La mémoire étant spatialement multimode, les chercheurs ont pu stocker une image constituée de trois bandes horizontales de 100 μm chacune, pendant une minute (figure 4).

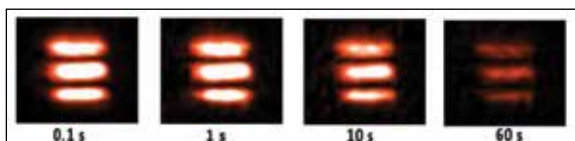


Figure 4 : Récupération d'une image constituée de trois bandes après un stockage de durée variable.

Source : G. Heinze & al - Darmstadt university 2013.

Ces résultats sont très encourageants et illustrent la dynamique de la recherche dans le monde sur le développement de composants et d'architectures quantiques. Ils constituent un bel exemple de la possibilité de contrôler les processus de décohérence et d'interaction entre les photons et la matière.

Cependant, de grosses difficultés restent à surmonter avant de pouvoir envisager de construire un Internet quantique avec des routeurs capables de stocker puis de restituer des paquets de photons. Il faut tout d'abord être capable de traiter les photons un par un et donc réduire suffisamment le bruit créé par les méthodes utilisées pour accroître la durée de cohérence T_2 . Il faut trouver des sources de lumière quantique très fines compatibles avec la TIE (largeur de bande < 1 MHz). Il faut enfin accroître considérablement le rendement du stockage et permettre le fonctionnement à température ambiante.

De nouveaux matériaux semblent constituer de bons candidats pour permettre un allongement très important du temps de stockage. Le silicate d'yttrium dopé à l'euprimum, $\text{Eu}^{3+} : \text{Y}_2\text{SiO}_7$, offre une durée de vie des états de spin de plusieurs jours et pourrait permettre d'atteindre des durées de stockage de 10 minutes. ■

JPH

¹ Voir le dossier « La nouvelle révolution de l'éclairage » dans le numéro 2012-4 de la REE.