



HAL
open science

Interactions quantiques sous contrôle

Mazyar Mirrahimi

► **To cite this version:**

Mazyar Mirrahimi. Interactions quantiques sous contrôle. Les Cahiers de l'INRIA - La Recherche, 2010, 40 ans de sciences, 441 mai 2010. inria-00511364

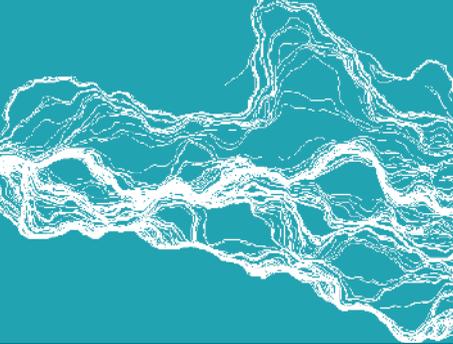
HAL Id: inria-00511364

<https://inria.hal.science/inria-00511364>

Submitted on 24 Aug 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AUTOMATIQUE QUANTIQUE

Interactions quantiques sous contrôle

L'étude d'objets quantiques particuliers et de leur contrôle par des techniques d'automatique restent encore du domaine de la recherche fondamentale.

Les résultats n'en formeront pas moins le socle sur lequel, à terme, s'appuiera la technologie de l'ordinateur quantique.

Tout le monde, au quotidien, utilise sans le savoir des applications de l'automatique, et en particulier du contrôle des systèmes dynamiques. Le moindre régulateur de température, de vitesse... est en effet un instrument de contrôle. Un exemple parmi d'autres : les régulateurs de vitesse équipant les véhicules de tourisme qui permettent de rouler à vitesse constante en toutes circonstances. Mais quel contrôle peut-on exercer dans le monde quantique ? Est-il possible de contrôler des états quantiques, donc gouvernés par les lois de la physique quantique, et comment ? C'est à cette question qu'un certain nombre de physiciens tente de répondre, en collaboration avec des automati-

ciens. Selon les réponses apportées, elles permettront, ou pas, de franchir une étape vers l'ordinateur quantique.

Les hypothèses pionnières en la matière datent d'une vingtaine d'années. En 1982, le physicien américain Richard Feynman (1918-1988), lauréat du prix Nobel de physique en 1965, proposait en effet pour la première fois l'idée d'un processeur utilisant les effets particuliers de la physique quantique. Dans un tel processeur, l'information serait portée par des objets quantiques (atomes, particules, photons...). Elle serait alors traitée par des portes logiques elles-mêmes fondées sur des phénomènes quantiques. Très vite, il s'est avéré qu'un tel processeur pourrait résoudre dans des temps courts des problèmes d'algorithmique hors de portée d'un processeur classique, aussi puissant fût-il.

C'est dans ce contexte que les informaticiens, avant même la construction d'un tel processeur, se sont mis à réfléchir à des algorithmes de calcul s'appuyant sur cette logique quantique. En témoigne par exemple le travail du mathématicien américain Peter Shor⁽¹⁾, du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), qui en 1997 a publié un algorithme quantique pour la factorisation rapide de grands nombres. Parallèlement à ces aspects liés au calcul quantique, les applications potentielles du traitement de l'information quantique concernent la communication et la cryptographie quantiques.

Reste qu'en dépit d'avancées théoriques significatives, un certain nombre de verrous physiques reste à surmonter pour réussir un traitement robuste (fiable dans la durée) de l'information. L'un d'entre eux est directement lié à la difficulté de contrôler des objets quantiques, qu'il s'agisse de les amener dans des états particuliers ou de les stabiliser dans ces états. À cet égard, les outils de l'automatique peuvent jouer un rôle déterminant : de la même manière qu'ils permettent de contrôler des systèmes macroscopiques, comme évoqué plus haut, ils pourraient servir à préparer et à stabiliser des états particuliers

Dans les années 1960, le physicien britannique John Stewart Bell, que l'on voit ici dans les locaux de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), avait proposé une méthode pour répondre aux objections de Einstein, Podolsky et Rosen sur l'existence possible de certains états quantiques.



© CERN

d'un système quantique. La difficulté vient de ce que leur adaptation à un tel monde ne peut résulter d'une simple extrapolation. C'est sur ce problème qu'au sein de l'équipe-projet Sisyphé (Inria Paris-Rocquencourt), en collaboration avec le Centre automatique et systèmes (Mines Paristech, Paris), nous avons engagé des recherches depuis quelques années. Ces recherches se font évidemment en coopération étroite avec des physiciens, notamment avec l'équipe d'Électrodynamique quantique en cavité, du laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure. L'un de nos thèmes principaux consiste à concevoir avec eux un système de contrôle permettant de créer puis de maintenir des états dits intriqués.

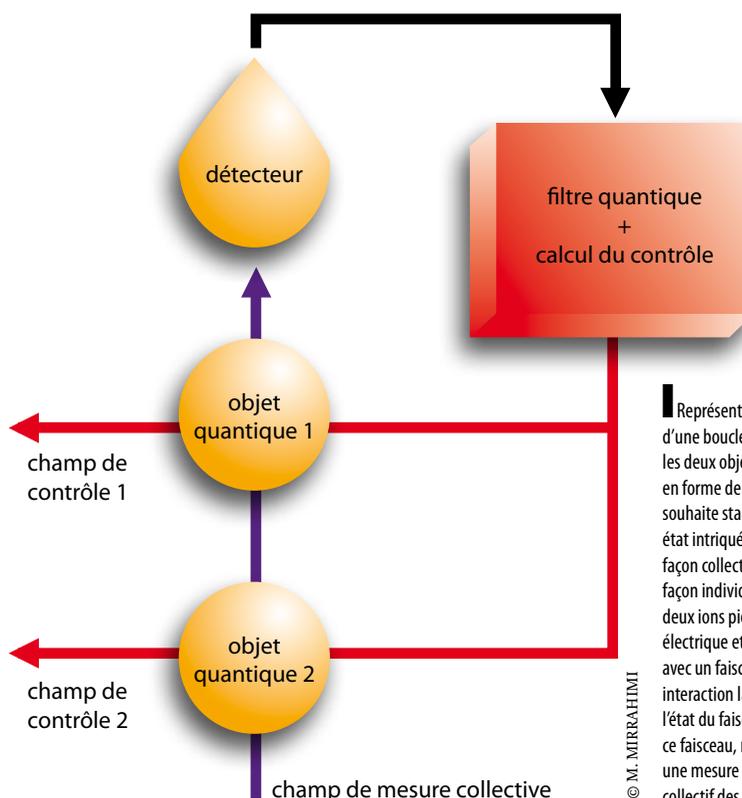
Le phénomène d'intrication est un phénomène clé de l'information quantique : deux objets quantiques distants, identiques ou différents, sont dits dans un état intriqué si le résultat de mesures sur l'un détermine le résultat de mesures sur l'autre. Ce phénomène est parfaitement contre-intuitif : dans le monde macroscopique, deux objets séparés dans l'espace ne peuvent en aucun cas s'influencer l'un l'autre. Il avait conduit Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen, en 1935, à formuler le paradoxe dit EPR (acronyme à partir des trois noms).

A leurs yeux en effet, l'existence de tels états défait les lois de la physique, en particulier celles dictées par la théorie de la relativité : une information pouvait donc être transmise de manière instantanée, c'est-à-dire à une vitesse plus élevée que celle de la lumière... Ce sont les expériences menées au début des années 1980, en particulier au sein du laboratoire Charles-Fabry de l'Institut d'optique (LCFIO, CNRS-Institut d'optique, Palaiseau) qui ont permis de valider le phénomène d'intrication quantique, sur la base des travaux théoriques de John S. Bell (voir page ci-contre).

Pour nous automaticiens, le défi est donc de proposer aux physiciens un mécanisme de contrôle adéquat pour créer et maintenir ces intrications. Pour ce faire, nous nous sommes orientés vers le contrôle par rétroaction (ou *feedback*) d'état, largement utilisé en ingénierie classique. Le principe est simple *a priori* : des mesures en temps réel sur le dispositif à contrôler, recueillies par des capteurs, servent à estimer son état, à partir de quoi des lois de contrôle permettent, en retour (rétroaction), de commander des actions sur ce système *via* des actionneurs. Dans le monde quantique, les choses se compliquent. Ce type de contrôle nécessitant la connaissance en temps réel de l'état du système considéré, sur quelles mesures s'appuyer pour estimer cet état ? En effet, l'opération même de mesure d'un système quantique perturbe son état, cette perturbation pouvant être assez importante. Il s'agit d'une rétroaction parasite (ou *back-action*), d'une tout autre nature que celle habituellement étudiée par les automaticiens. Elle induit des sauts de nature aléatoire appelés sauts quantiques : il faut donc considérer le système quantique mesuré comme un système dynamique de

caractère aléatoire. S'ajoutent à cela les conséquences du principe d'incertitude de Heisenberg, selon lequel toute mesure quantique est intrinsèquement incomplète : on ne peut mesurer à la fois la position et la vitesse d'une particule.

Le contrôle d'objets quantiques par rétroaction d'état doit donc



Représentation schématique d'une boucle de rétroaction : les deux objets quantiques (ici en forme de sphères), que l'on souhaite stabiliser dans un état intriqué, sont mesurés de façon collective et contrôlés de façon individuelle. Ce peut être deux ions piégés par un champ électrique et qui interagissent avec un faisceau lumineux. Cette interaction laisse une trace sur l'état du faisceau. En détectant ce faisceau, nous parvenons à une mesure partielle sur l'état collectif des deux particules. Cette information est ensuite traitée par un filtre quantique, celui-ci permettant d'estimer de manière optimale l'état collectif des particules. Il est alors possible de mettre en place des lois de contrôle pour agir en retour (rétroaction) sur les deux particules, *via* deux champs électromagnétiques indépendants.

© M. MIRRAHIMI

tenir compte de ces deux spécificités de la mesure quantique. L'une des solutions proposées, et sur laquelle nous travaillons, consiste à construire des filtres quantiques : le filtrage des informations sur l'état du système, telles qu'elles sont reçues par un détecteur (voir le schéma), doit nous permettre d'estimer cet état de manière optimale. Les premiers résultats en la matière datent des années 1980 et sont le fait du mathématicien britannique Viacheslav Belavkin⁽²⁾ (université de Nottingham). Il s'agit pour nous d'étendre ces résultats pour les appliquer aux expériences menées par nos partenaires physiciens et surtout de concevoir les lois de contrôle associées^(3,4).

A ce jour, nous avons mis au point un certain nombre de solutions théoriques. Reste l'épreuve des faits : les expériences nous permettront de les modifier et/ou de les affiner. Si, dans le cadre de notre collaboration entre physiciens et automaticiens, nous parvenons à créer des états intriqués et à les stabiliser, ce sera déjà un progrès significatif vers la levée d'un des principaux verrous dans le domaine du traitement de l'information quantique.

Mazyar Mirrahimi est chercheur à l'Inria Paris-Rocquencourt (équipe-projet Sisyphé). Mathématicien appliqué, il travaille sur les problèmes de modélisation, d'identification et de contrôle pour les systèmes quantiques.

⁽¹⁾ P. Shor, *SIAM J.Sci.Statist. Comput.* 26, p. 1484, 1997

⁽²⁾ V. P. Belavkin, *J. Multivariate Anal.*, 42, pp. 171-201, 1992

⁽³⁾ M. Mirrahimi et R. Van Handel, *SIAM Journal on Control and Optimization*, 46 (2), pp. 445-467, 2007

⁽⁴⁾ I. Dotsenko et al., *Physical Review A*, 80, pp. 013805-013813, 2009