

#66
JUN 2018

clefs

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



LES VOIX
DE LA RECHERCHE

RÉVOLUTIONS

QUANTIQUES

CONTEXTE – TECHNOLOGIES – DOMAINES D'APPLICATION – PERSPECTIVES

Péripéties quantiques

par Jérôme Ferrari,
Écrivain et prix Goncourt 2012, enseignant.



© Siddharth Siva

« En lisant Heisenberg, je compris à quel point la célèbre affirmation de Heidegger, “la science ne pense pas”, était non seulement erronée, quelle que soit l’interprétation qu’on en donne, mais d’une ridicule condescendance. »

constituait pas un progrès. Je dus attendre 1993 et la parution de Regards sur la matière, co-signé par Étienne Klein et Bernard d’Espagnat, livre dont je pense encore aujourd’hui qu’il est un modèle de pédagogie, pour saisir un peu mieux ce qui se jouait avec la physique quantique, et à quelle profondeur. Il me paraît toujours inconcevable de discourir sur la nature ultime de la réalité, comme on est évidemment amené à le faire en métaphysique, sans écouter ce que la science a à en dire depuis qu’au début du XX^e siècle, en pénétrant dans le monde de l’atome, elle a bouleversé la façon même dont le problème se pose. Cela exige évidemment des efforts, surtout quand on est contraint, comme moi, de s’arrêter là où commence le formalisme mathématique, c’est-à-dire sans doute l’essentiel. Mais la saisie, fût-elle imparfaite et uniquement qualitative, des concepts fondamentaux de la théorie suffit à nous faire prendre conscience qu’on vient d’être plongé dans un enfer ontologique duquel on n’a paradoxalement aucune envie de s’échapper.

Tous les ans, à l’occasion du cours sur la raison et le réel, j’ai essayé de donner à mes élèves un aperçu de ce paysage infernal dans l’espoir de leur en faire comprendre l’importance et éventuellement la beauté. Mes tentatives, il faut le dire, n’ont guère été couronnées de succès. Quand je présentais l’expérience des fentes de Young, y compris devant une classe de terminale scientifique, je ne récoltais que des regards incrédules. Les élèves me soupçonnaient de raconter n’importe quoi et je dois uniquement au soutien de mes collègues de physique de ne pas être passé pour tout à fait dérangé. Pourtant, cette expérience n’est pas difficile à comprendre : ses résultats, quand elle est menée avec des électrons, sont simplement invraisemblables et scandaleux. C’est sans doute parce qu’elle fait voler en éclats nos intuitions les plus spontanées que la physique quantique est si difficile à vulgariser efficacement – en dehors, bien sûr, des innombrables délires qui la prennent pour prétexte. J’ai toujours l’espoir que cette situation évoluera et que ceux qui, comme moi, ne sont pas des physiciens, pourront se familiariser avec une théorie si féconde et stimulante, élaborée de surcroît au terme d’un parcours intellectuel aussi passionnant qu’un grand roman. ■

Si, tout au long de mes études secondaires, j’ai voué aux mathématiques un amour dont je dois avouer qu’il ne fut pas payé de retour, la physique, en revanche, m’a dès le début profondément rebuté. C’est donc sans plaisir que j’ai dû me résigner à la fréquenter à nouveau en cours d’épistémologie quand je me suis inscrit en licence de philosophie après deux années passées en classe préparatoire. Dans la bibliographie qui nous fut remise, figurait Physique et philosophie de Werner Heisenberg. En le lisant, je compris à quel point la célèbre affirmation de Heidegger, « la science ne pense pas », était non seulement erronée, quelle que soit l’interprétation qu’on en donne, mais d’une ridicule condescendance.

Et ce fut à peu près tout ce que je compris.

Car, pour la première fois, je me trouvais confronté à une prose dont la dangereuse élégance et les fulgurances poétiques ne pouvaient dissimuler les difficultés monstrueuses qu’elle recelait. J’étais alors convaincu que l’atomisme contemporain avait globalement validé, au moins sur le plan conceptuel, les conjectures matérialistes de Lucrèce et d’Épicure. Que pouvait donc vouloir dire Heisenberg quand il parlait des particules élémentaires comme de choses situées quelque part « entre le possible et le réel » ?

Non, je ne comprenais rien. Mais j’étais absolument fasciné.

J’essayais donc d’échapper à ma frustration en me procurant les textes que les pères fondateurs avaient rédigés à l’intention des non-spécialistes ainsi que des ouvrages de vulgarisation. À l’issue de ces lectures, j’avais cessé de ne rien comprendre pour tout comprendre de travers, ce qui, on en conviendra, ne

DANS CE NUMÉRO

RÉVOLUTIONS QUANTIQUES

LE POINT DE VUE DE JÉRÔME FERRARI	2
SOMMAIRE	3
LE MONDE QUANTIQUE ET NOUS	4



UNE NOUVELLE RÉVOLUTION QUANTIQUE

Aucune théorie n’a jamais été aussi fructueuse en termes de compréhension de l’Univers qui nous entoure et d’applications. Notre société, celle de l’information et de la communication, est l’enfant de la mécanique quantique.

NOTRE REGARD SUR LA MÉCANIQUE QUANTIQUE A CHANGÉ	9
LA 2 ^e RÉVOLUTION QUANTIQUE	11

L’INGÉNIERIE QUANTIQUE 2.0

La deuxième révolution de l’ingénierie quantique concerne des recherches visant à concevoir et réaliser des dispositifs innovants, voire en rupture. C’est un domaine en pleine expansion, avec de très forts enjeux scientifiques et technologiques.

INTRODUCTION	15
Panorama des technologies quantiques	16
COMMUNICATION	19
Enjeux et perspectives	19
Générer et détecter le photon unique	22
MÉTROLOGIE & SENSEURS	25
Enjeux et perspectives	25
Détecter les spins	28
CALCUL	32
Enjeux et perspectives	32
À la recherche du qubit intégrable	36
Les bénéfices du calcul quantique	40
Demain, l’informatique quantique ?	43

45

PERSPECTIVES

TOUT EST QUANTIQUE DANS L’UNIVERS

45



•
PAR
ÉTIENNE KLEIN

(Direction de la recherche fondamentale)



Étienne Klein est physicien et chef du Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA).

La première révolution quantique

Au cours des années 1920, la physique quantique se mettait sur pied afin de rendre compte du comportement bizarre (au regard des lois de la physique classique) des atomes et des particules. Des concepts radicalement neufs furent alors inventés, qui conduisirent les physiciens à penser autrement la matière et ses interactions. Au bout du compte, une décennie d'effervescence créatrice et d'intense labeur suffit pour qu'un petit nombre d'entre eux (Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Dirac...), dispersés aux quatre coins de l'Europe, fondent l'une des plus belles constructions intellectuelles de tous les temps.

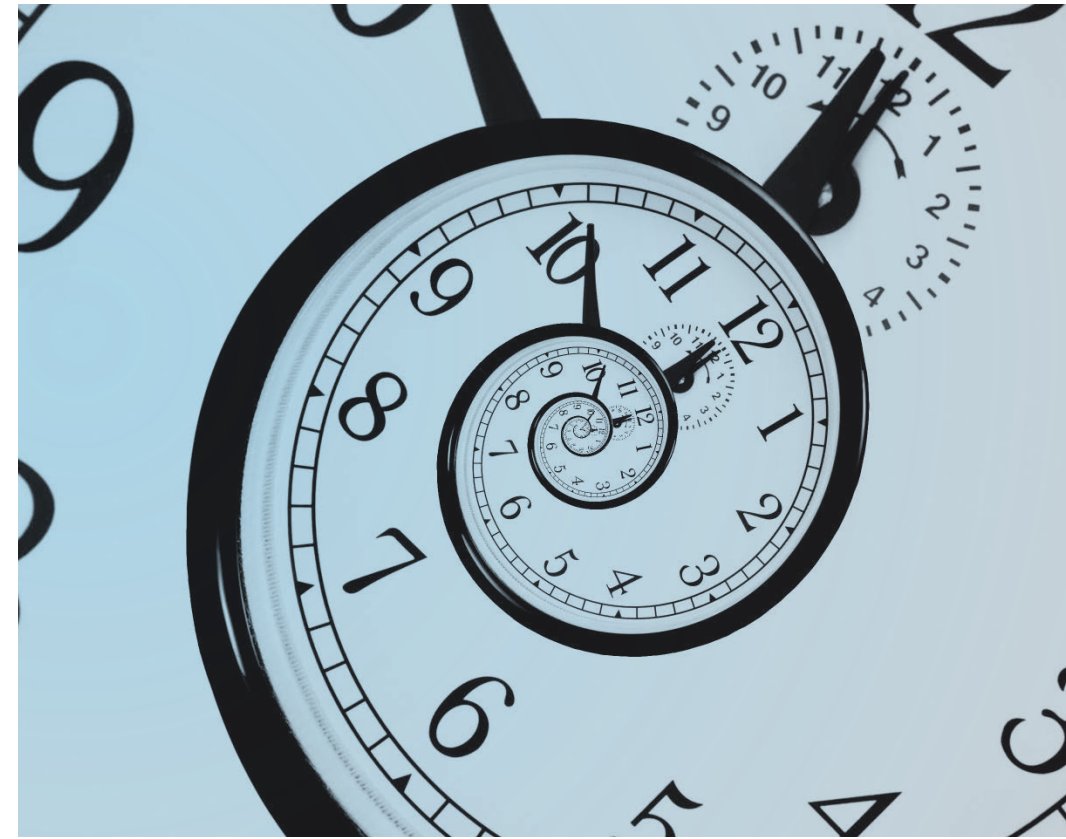


De gauche à droite

Erwin Schrödinger
Paul Dirac
Wolfgang Pauli
Werner Heisenberg

La physique quantique repose sur un arsenal mathématique rigoureux et complexe (ce qu'on appelle un « formalisme »), dont le principe fondamental est toutefois simple à énoncer. Nous savons d'expérience qu'il existe plusieurs types d'ondes (acoustiques, électromagnétiques...) et, aussi, que toutes possèdent une propriété qui leur est commune, indépendamment de la matière de leur support : elles sont capables de s'ajouter entre elles, au sens où la somme de deux ondes d'un certain type est encore une onde du même type. C'est ce principe dit « de superposition », caractéristique du concept d'onde, que la physique quantique a repris pour en généraliser la portée. Voyons comment.

Toute particule se définit par un certain nombre de caractéristiques qui sont identiques pour toutes les particules du même type. C'est ainsi que tous les électrons, où qu'ils soient et dans quelque environnement qu'ils se trouvent, ont rigoureusement la même masse et la même charge électrique. Mais, en plus de ces caractéristiques universelles, les électrons se voient attribuer des quantités qui, elles, peuvent varier de l'un à l'autre, par exemple la position ou la vitesse. L'ensemble de ces quantités forme en physique classique « l'état » de la particule. Comment le représente-t-on en physique quantique ? Réponse : par des entités, notées a , b , c ..., dont on exige simplement qu'elles obéissent au principe de superposition. Autrement



dit, si a et b sont deux états possibles d'un certain système, alors l'état $(a + b)$ doit être lui aussi un état possible de ce système. Ainsi, le principe de superposition s'applique non plus seulement aux ondes, mais aussi à n'importe quel système physique. La règle de l'addition devient en somme universelle, au sens où on fait comme si tout était ondes, alors même qu'expérimentalement ce n'est pas vrai : quand un électron est envoyé sur une plaque couverte d'un produit chimique qui blanchit à son contact, il se manifeste par un impact ponctuel, non comme une onde qui occuperait tout l'espace...

En mathématiques, les entités qui satisfont à cette propriété de pouvoir s'ajouter entre elles sont des « vecteurs » et l'ensemble qu'ils forment constitue un « espace vectoriel ». C'est pourquoi les entités a , b , c représentant les divers états possibles des systèmes physiques sont appelées des « vecteurs d'état ». Ceux-ci sont, bien sûr, fonctions de l'espace et du temps.

Cette description des états physiques par des vecteurs d'état (ou, si on préfère, l'affirmation équivalente que le principe de superposition leur est applicable) est donc l'idée fondamentale de la physique quantique. Il est remarquable qu'un postulat aussi simple, immergé au fin fond d'un formalisme par ailleurs labyrinthique, ait conduit à des progrès aussi considérables dans le domaine de la physique. Grâce à lui, de très nombreux phénomènes incompréhensibles en physique classique ont pu être décrits de façon

élégante et synthétique. Par exemple, si la liaison chimique existe, c'est (pour dire les choses rapidement) parce qu'un électron peut être localisé à la fois sur plusieurs atomes, comme « suspendu » entre plusieurs positions, conformément à ce qu'exige le principe de superposition, de même que dans une molécule diatomique, certains électrons, dit de valence, sont à la fois du côté gauche et du côté droit de la molécule, même si cette possibilité semble a priori saugrenue. Par ailleurs, d'innombrables instruments aujourd'hui devenus banals doivent leur existence à la compréhension de cette loi quantique : les transistors, les lasers, les LED...

Tout aussi singulier est le fait que ce sont les conséquences philosophiques du principe de superposition qui ont suscité les difficultés d'interprétation de la physique quantique. On devine leur origine. Le formalisme de la physique quantique opère au sein d'espaces vectoriels abstraits qui sont fort éloignés de l'espace physique où ont lieu les événements que ce formalisme décrit. Cette émancipation vis-à-vis de l'espace physique ordinaire instaure donc une distance entre la représentation des phénomènes et les phénomènes eux-mêmes, distance au sein de laquelle viennent s'engouffrer toutes sortes de questionnements inédits : comment le formalisme quantique se relie-t-il concrètement aux expériences ? Selon quelles règles l'utiliser ? Quels types de discours sur la réalité cette nouvelle physique autorise-t-elle ? ■



« Cette émancipation vis-à-vis de l'espace physique ordinaire instaure donc une distance entre la représentation des phénomènes et les phénomènes eux-mêmes, distance au sein de laquelle viennent s'engouffrer toutes sortes de questionnements inédits. »



Le chat des possibles

• **PAR VINCENT BONTEMS**

(Direction de la recherche fondamentale)



Vincent Bontems est philosophe des sciences au Laboratoire des recherches sur les sciences de la matière (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA).

Du chat de Schrödinger aux pigeons de Tollaksen, en passant par le poisson de Dirac ou la mouche et le tigre de Gamov, les métaphores animales abondent en mécanique quantique. À la différence d'autres domaines, elles n'ont pas été inventées par des vulgarisateurs mais par les scientifiques eux-mêmes. À quoi servent ces métaphores ? Que nous apprend la « zoologie quantique » ?

Le 8 août 1935, Albert Einstein écrivit une lettre à Erwin Schrödinger où il attirait son attention sur le caractère contre-intuitif de certaines conséquences de l'équation auquel ce dernier avait donné son nom. En effet, il découle de la structure de la fonction d'onde qu'une particule peut se trouver dans un état « superposé », c'est-à-dire la somme d'un état A et de l'état non-A. Cet état paradoxal nourrissait le scepticisme d'Einstein à l'égard de la complétude du formalisme quantique. Pour Schrödinger, cela montrait plutôt que la « particule » était un concept caduc à l'échelle quantique.

Dans sa lettre, pour exagérer l'étrangeté de la superposition, Einstein invente un stratagème qui la transpose jusqu'à notre échelle. Il imagine un baril de poudre métastable (prêt à exploser à la moindre

étincelle) et, dans ce baril, un atome radioactif possédant une demi-période d'un an : « Initialement, la fonction ψ du système caractérise un état macroscopique assez bien défini. Mais ton équation se charge de faire qu'au bout d'un an cela ne soit pas le cas. La fonction ψ décrit alors plutôt une sorte de mélange contenant le système qui n'a pas encore explosé et le système qui a déjà explosé. » [1]

C'est dans sa réponse du 19 août que Schrödinger imagine une expérience de pensée similaire où un chat est enfermé dans une boîte avec un atome radioactif. En cas de désintégration, un ingénieux système de détection déclenche la brisure d'une ampoule contenant un gaz mortel : tant qu'on n'a pas ouvert la boîte, le système qu'elle forme avec l'atome, le mécanisme et le chat, est décrit par un vecteur d'état qui est la superposition d'un état où

la désintégration a eu lieu et d'un état où elle n'a pas eu lieu, donc d'un état où le chat est mort et d'un autre où il est vivant. Contrairement à ce que véhicule la culture demi-savante, Schrödinger n'entend pas suggérer la possibilité d'un tel état de superposition macroscopique, il l'estime impossible et s'appuie sur le fait que nous ne l'avons jamais observé pour remettre en question la notion de particule en état superposé.

Dans son commentaire de cet échange épistolaire, Étienne Klein a justement souligné que, d'un point de vue épistémologique, le passage du baril d'Einstein au chat de Schrödinger n'ajoute rien à l'expérience de pensée. La métaphore féline lui paraît superficielle et arbitraire : « N'importe quel animal ferait aussi bien l'affaire : un paradoxe de la poule, de l'oie ou de la truie de Schrödinger aurait eu, du strict point de vue heuristique, exactement la même portée que celui du chat. » [2] Pourtant, c'est bien l'image du chat mort et vivant qui en a assuré la popularité et, même si Schrödinger ne donne aucune indication à ce sujet, on peut s'interroger sur les raisons du choix de cet animal.

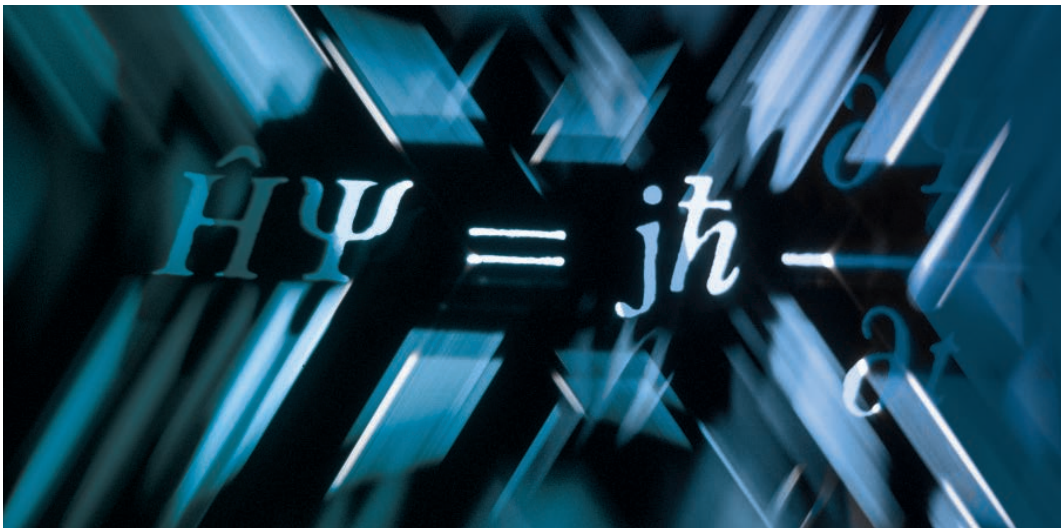
Une expérience de pensée est toujours, conjointement, un raisonnement basé sur des conditions irréalisables (des hypothèses a priori contrefactuelles même si on découvre parfois au terme du raisonnement qu'elles sont réelles) et un récit supposant une suspension de l'incrédulité à l'égard d'un autre « monde possible ». En général, Einstein expérimentait sur lui-même, chevauchant un photon ou chutant dans le vide. Contrairement à Galilée, il n'aurait jamais jeté un animal dans le vide, même par la pensée ! Dans ses expériences de pensée aboutissant à un résultat positif, il était attaché à restituer sa propre prise de conscience, à mettre en scène la réflexivité. Avec le baril, on sent qu'il reste à distance : même s'il dramatise le suspense lié à l'explosion, il

manque quelque chose ; l'image ne nous implique pas.

En mettant en jeu la vie d'un animal, Schrödinger accentue l'implication affective. Encore fallait-il que l'animal ne soit pas de ceux dont la mort nous indiffère comme les moustiques ou que certains d'entre nous mangent (poulet, porc...). Ce qui singularise la métaphore féline est qu'elle possède des résonances imaginaires particulières : le chat est à la fois domestique et indépendant, dedans et dehors, il est l'animal qui possède neuf vies et dont les prunelles sont un mystère insondable pour le poète. Chez Lewis Carroll, il soulevait même déjà l'énigme de la présence superposée à l'absence (le chat du Cheshire deviendra lui aussi le support d'une expérience de pensée quantique).

Ainsi, la métaphore était peut-être trop bien trouvée ! Alors que Schrödinger cherchait à rendre problématique l'application de son équation au concept de particule, la métaphore lui échappa pour devenir l'emblème de multiples réinterprétations de plus en plus réalistes de la superposition. De nos jours, des « chatons de Schrödinger » sont produits dans les expériences bien réelles de Serge Haroche. Du coup, la métaphore fait obstacle à la compréhension. Le chat de Schrödinger est l'exemple parfait d'une expérience de pensée dans un état superposé de réussite exemplaire et d'échec piteux.

Si les chercheurs recourent à des métaphores animales dans le contexte quantique, c'est peut-être pour apprivoiser une difficulté conceptuelle plus que pour la résoudre, c'est-à-dire pour fournir une représentation fictive des équations là où une représentation réaliste classique fait défaut. Nous ne pouvons mettre ici à l'épreuve cette hypothèse sur d'autres exemples, mais la zoologie quantique est sans doute destinée à surprendre plus qu'à apprendre. ■



« N'importe quel animal ferait aussi bien l'affaire : un paradoxe de la poule, de l'oie ou de la truie de Schrödinger aurait eu, du strict point de vue heuristique, exactement la même portée que celui du chat. »

[1] Lettre citée par Françoise Balibar, « La correspondance entre Einstein et Schrödinger » in Michel Bitbol et Olivier Darrigol (dir.), Erwin Schrödinger. Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics, Paris, éditions Frontières, 1992, p. 312

[2] Etienne Klein, Il était sept fois la révolution. Paris, Flammarion, 2005, p. 231

UNE NOUVELLE RÉVOLUTION QUANTIQUE

Aucune théorie n'a jamais été aussi fructueuse en termes de compréhension de l'Univers qui nous entoure et d'applications. Notre société, celle de l'information et de la communication, est l'enfant de la mécanique quantique.

Notre regard sur la mécanique quantique a changé

9

La deuxième révolution quantique

11



Notre regard sur la mécanique quantique a changé

Les manuels de mécanique quantique du XX^e siècle ne sont plus tout à fait à jour. Or, que notre regard sur cette théorie évolue ne va pas de soi.

En 1958, par exemple, Freeman Dyson, éminent physicien anglo-américain, se disait persuadé que la mécanique quantique deviendrait une forme naturelle de pensée parce que les scientifiques y seraient habitués. Il était apparemment convaincu que les problèmes conceptuels se résoudraient d'eux-mêmes avec le temps. Il n'en fut rien. Bien au contraire, différentes façons d'appréhender la mécanique quantique ont profondément modifié son « langage ». Le nouveau vocabulaire conceptuel et mathématique, qui commence à émerger à la fin des années 1980, est celui de l'information quantique. Aujourd'hui, dans le monde technologique comme parmi les théoriciens, la manière la plus intuitive de concevoir la mécanique

quantique passe par l'utilisation de « ressources » non classiques. La physique quantique met ainsi à notre disposition la « non-localité » quantique, ou sa « contextualité », ou encore une « discorde » entre les mondes classique et quantique. Arrêtons-nous sur le premier concept : on sait aujourd'hui qu'une large partie de la spécificité de la théorie quantique réside dans sa description, non d'un système physique isolé, mais de la règle de composition des systèmes.

La ressource de non-localité existe en vertu d'un phénomène qu'on appelle « intrication quantique », mesuré par des inégalités que nous devons à John Bell. Leur violation fut expérimentalement démontrée par Alain Aspect (voir p. 11). Toujours sur le plan

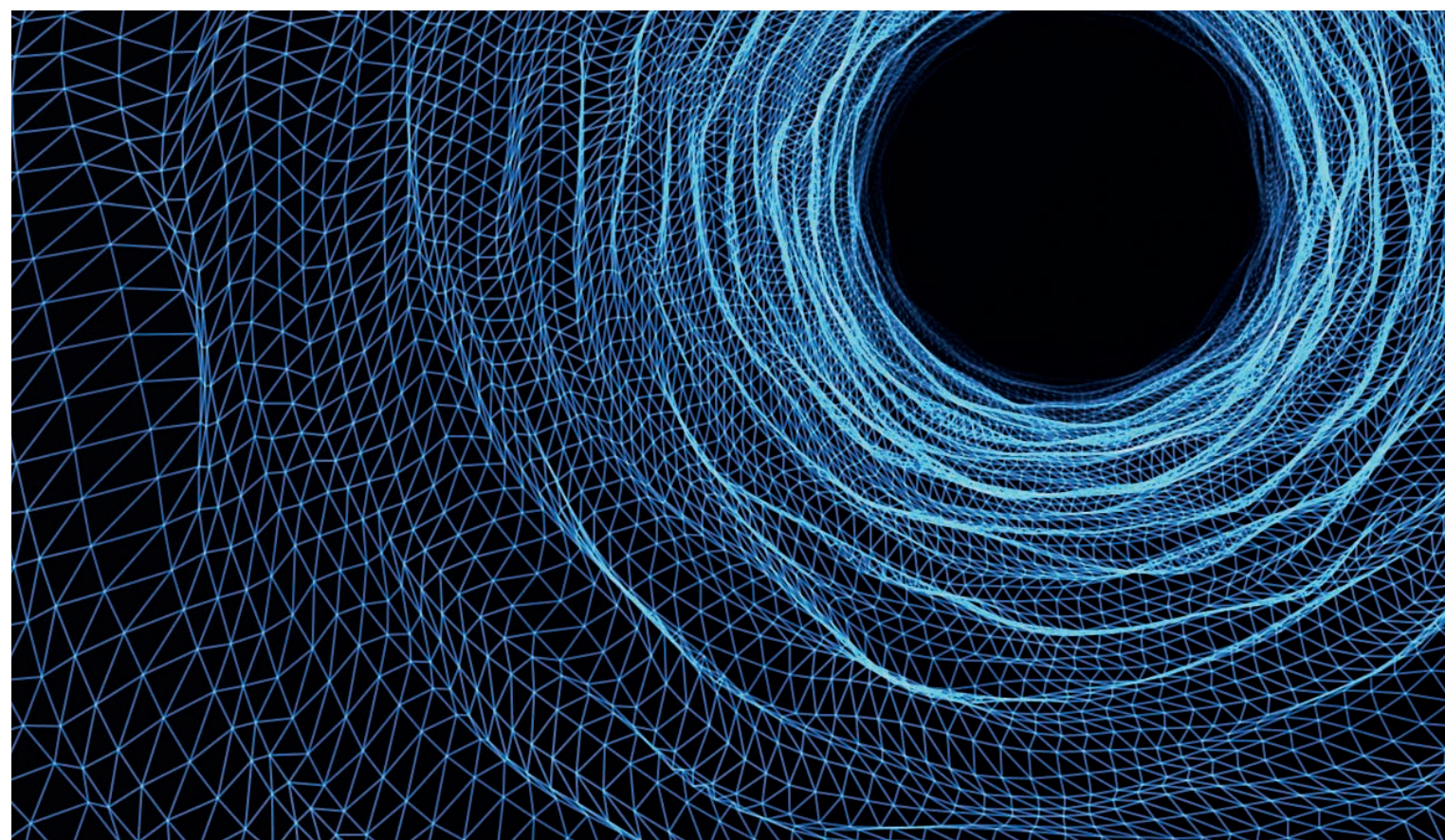
•
**PAR
ALEXEI GRINBAUM**

(Direction de la recherche fondamentale)



Alexei Grinbaum est physicien et philosophe. Il travaille au Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA).

« On sait aujourd'hui qu'une large partie de la spécificité de la théorie quantique réside dans sa description, non d'un système physique isolé, mais de la règle de composition des systèmes. »



« Avec ces nouveaux outils, on pose des questions fondamentales laissées jusqu'alors à la seule spéculation métaphysique : qu'est-ce qu'un système ? Qu'est-ce qu'un observateur ? »

expérimental, celui qui dispose dans son laboratoire d'une paire de particules quantiques aura la possibilité de s'en servir pour accomplir une tâche classiquement impossible. Cependant, sur le plan théorique, il est concevable de développer une théorie générale de telles ressources, tout comme on peut élaborer une approche générale, par schèmes, à la conception d'un circuit électrique ou d'une machine à calculer.

L'énigme du chat de Schrödinger a donc vécu (voir p. 10). Cette métaphore correspond à la propriété de superposition quantique ; or, on ne considère habituellement pas la superposition comme une ressource. L'intrication, une autre propriété énigmatique de la mécanique quantique, l'est. Autant accompagner le mystère (que l'on ne dissipera jamais complètement) d'une caractéristique bien plus rassurante : son utilité.

Cette utilité n'est pas seulement technologique, elle est aussi théorique. Grâce à l'information quantique, on peut caractériser précisément la frontière entre les mondes classique et quantique. Dans le cas de la non-localité, la détermination d'une limite passe par l'évaluation quantitative des corrélations entre les sous-systèmes d'un système composé. Quel que soit le substrat matériel d'un tel système, les corrélations produites entre ses parties sont plus fortes que ce que prévoit la physique classique. Cette différence n'est donc pas une affaire d'échelle. On s'aperçoit aussi, en

suivant cette analyse, que « non classique » ne signifie pas nécessairement « quantique » et qu'il existe des modèles « plus-que-quantiques » qui sont utiles pour étudier les propriétés informationnelles de notre monde.

Avec ces nouveaux outils, on pose des questions fondamentales laissées jusqu'alors à la seule spéculation métaphysique : qu'est-ce qu'un système ? Qu'est-ce qu'un observateur ? Et d'autres encore, plus contre-intuitives : qu'est-ce qu'une causalité « quantique » ? Car, si chaque sous-système d'un système composé est mesuré dans un laboratoire isolé, il est concevable que l'ordre causal des observations au sein des laboratoires ne se décrive pas comme « L1 est avant L2 » ou « L2 est avant L1 ». Cet ordre peut, lui-même, être indéterminé. Son indétermination ne procède pas de la simple ignorance : elle est fondamentale, due à la superposition quantique. Si on apprend à l'utiliser en tant que ressource, elle pourrait nous offrir une approche totalement nouvelle à la compréhension de l'espace-temps physique.

L'espoir est alors que l'analyse informationnelle, aux conclusions souvent inattendues, aboutira à des applications technologiques et industrielles et bien plus : à une nouvelle manière de définir les fondements des théories physiques qui décrivent notre monde. ■

La deuxième révolution quantique

Il a fallu près d'un demi-siècle aux physiciens pour ouvrir la voie à la deuxième révolution quantique, porteuse de nombreuses applications dans différents domaines tels que le calcul, la simulation ou encore la métrologie.

Le développement de la physique quantique, pendant la première moitié du XX^e siècle, est l'une des aventures intellectuelles les plus extraordinaires de toute l'histoire humaine. Cette théorie physique, qui a modifié de fond en comble notre conception du monde, a permis de rendre compte des propriétés de la matière, de la lumière, et de leurs interactions. Et elle a tout autant bouleversé notre mode de vie puisque ses applications sont innombrables : lasers, transistors, circuits intégrés, qui sont les composants de base des technologies de l'information et de la communication...

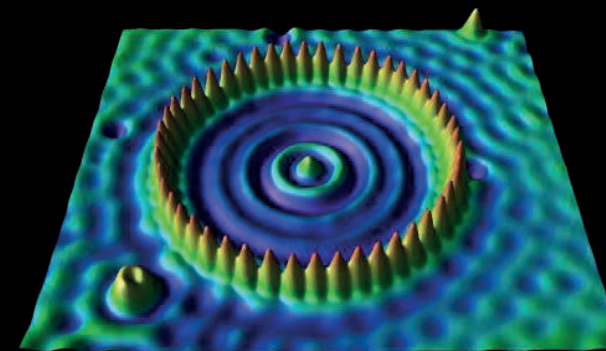
Une telle accumulation de succès aurait pu laisser craindre un épuisement du domaine : il n'en est rien. Qu'il s'agisse du comportement des électrons dans les solides, de l'interaction lumière-matière, ou des fluides quantiques ultra froids, pour ne citer que quelques exemples, on voit apparaître des phéno-

mènes, certes descriptibles dans le cadre de la physique quantique, mais tellement nouveaux et inattendus que l'intérêt rebondit sans cesse, ponctué par l'attribution de nombreux prix Nobel.

De façon sans doute encore plus imprévue, tant était grand le sentiment que « les pères fondateurs » (Niels Bohr et ses élèves) avaient totalement clarifié le sujet (essentiellement en répondant aux objections d'Einstein), c'est au niveau du cœur conceptuel de la théorie quantique qu'une nouvelle phase de progrès majeurs a débuté en 1960 avec les travaux de John Bell, suivis d'expériences de plus en plus fines. La violation des inégalités de Bell a apporté l'évidence irréfutable de la réalité de l'intrication quantique, propriété extraordinaire d'une paire d'objets qui se comportent comme un système quantique unique, même éloignés l'un de l'autre.

Fig. 0 : Corral atomique.

Cette image au microscope à effet tunnel montre un « corral atomique » réalisé à l'aide d'atomes de fer déposés sur une surface de cuivre. Les atomes se manifestent par des pics de densité électronique. Les vagues visualisent la fonction d'onde des électrons du cuivre qui sont réfléchis par les atomes de fer. La possibilité d'observer et de contrôler les objets quantiques individuels est un ingrédient essentiel de la deuxième révolution quantique.



PAR
ALAIN ASPECT

(Université Paris Saclay)



Alain Aspect est physicien à l'Institut d'optique Graduate School. Médaille d'or du CNRS en 2005, il est également le seul lauréat français de la médaille Niels Bohr (2013).



De haut en bas
Niels Bohr et John Bell

« La mécanique quantique n'a pu se construire qu'au prix de révisions radicales et douloureuses des concepts qui s'étaient imposés en physique classique. »

C'est à partir de la même époque qu'on a appris à manipuler un par un des électrons, des ions, des atomes ou des photons (Fig. 0). On sait aujourd'hui que la mécanique quantique s'applique avec succès aux objets uniques, et pas seulement de façon statistique à de grands nombres d'objets identiques comme les atomes d'un gaz. Et on a vu apparaître de nouvelles méthodes de calcul, dites de « Monte-Carlo quantique », bien adaptées à la description du comportement de ces objets quantiques élémentaires individuels.

Il n'est sans doute pas exagéré de dire que ces deux avancées conceptuelles de la fin du XX^e siècle - la prise de conscience de l'importance des états intriqués, la compréhension de la dynamique des objets quantiques individuels - ont marqué le début d'une nouvelle révolution quantique. Et il n'est pas interdit d'imaginer qu'au-delà des progrès en physique fondamentale dont nous n'avons sans doute observé que les prémices, et des questions conceptuelles qui restent plus ouvertes que jamais, cette nouvelle révolution quantique pourrait à son tour bouleverser notre société en débouchant sur une nouvelle révolution technologique, la révolution de l'information et de la métrologie quantiques...

Du débat Bohr-Einstein aux tests des inégalités de Bell : l'intrication mise en évidence

La mécanique quantique n'a pu se construire qu'au prix de révisions profondes des concepts qui s'étaient imposés en physique classique. Les renoncements étaient si radicaux que plusieurs physiciens, dont Einstein et de Broglie, et dans une certaine mesure Schrödinger, n'admettaient pas leur caractère définitif, à la différence de Bohr qui en avait fait la clef de voûte de l'interprétation de la nouvelle théorie connue sous le nom « d'interprétation de Copenhague ». Einstein ne remettait pas en cause le formalisme mathématique de la mécanique quantique, ni ses prévisions, mais il semblait penser que les renoncements préconisés par Bohr traduisaient l'état d'inachèvement de la théorie quantique. Cette position allait donner lieu à des débats homériques entre eux, en particulier celui qui débuta avec la publication, en 1935, de l'article d'Einstein, Podolsky et Rosen (EPR), dont le titre pose la question : « La description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée comme complète ? ».

Dans cet article, Einstein et ses coauteurs montrent que le formalisme quantique autorise l'existence d'états particuliers de deux objets quantiques, pour lesquels certaines observables sont fortement corrélées, même lorsque les objets sont éloignés (Fig. 1). Einstein en conclut que, pour chaque objet d'une paire, ces observables ont, avant leur mesure, une valeur précise alors que ce n'est pas le cas dans la description quantique. C'est donc, conclut Einstein, que la mécanique quantique ne rend pas compte de la totalité de la réalité physique.

Niels Bohr fut, semble-t-il, bouleversé par cet argument qui s'appuie sur le formalisme quantique lui-même pour en montrer le caractère incomplet, provisoire. Ses écrits montrent la conviction profonde que si le raisonnement EPR était correct, c'est toute la physique quantique qui serait remise en cause. Il contesta donc immédiatement le raisonnement EPR, en affirmant que dans un état quantique de ce type, on ne peut parler des propriétés individuelles de chaque objet et cela, même s'ils sont très éloignés l'un de l'autre. Avec Schrödinger, qui découvre au même moment le caractère extraordinaire de ces états, on parlera désormais d'état « intriqué » pour indiquer que les deux objets sont indissolublement enchevêtrés, qu'ils forment un objet unique quelle que soit leur distance de séparation.

On pourrait penser que ce débat entre deux géants de la physique du XX^e siècle eut un immense écho chez les physiciens. En fait, lorsque l'article EPR parut en 1935, la mécanique quantique allait de succès en succès et, mis à part Bohr, la plupart des physiciens ignorèrent ce débat qui leur paraissait se situer hors du champ de la science des laboratoires : il semblait que l'adhésion à l'une ou l'autre des positions fût une affaire de goût personnel (ou de position épistémologique), sans aucune conséquence pratique sur la mise en œuvre du formalisme quantique, ce qu'Einstein lui-même ne semblait pas contester. Il fallut attendre près de trente ans pour voir paraître un démenti cinglant à cette position relativement consensuelle.

C'est en 1964 que John Bell, physicien théoricien irlandais travaillant au CERN à Genève, publia un court article qui allait modifier radicalement la situation. En quelques lignes de calcul, il montre que si on prend au sérieux l'argument EPR, et qu'on complète le formalisme quantique dans l'esprit des idées d'Einstein, on aboutit à une contradiction avec certaines prédictions quantiques. Les idées d'Einstein sont on ne peut plus naturelles : elles sont l'équivalent de l'explication des similitudes entre jumeaux par des patrimoines génétiques identiques. Qu'il faille rejeter une explication de ce type dans le domaine des objets quantiques ne laisse pas de nous étonner mais, grâce au théorème de Bell, on peut recourir à l'expérience pour savoir s'il existe, dans la nature, des corrélations aussi fortes que celles prévues par le formalisme quantique et qui violent les célèbres « inégalités de Bell ». Ces inégalités s'appliquent à toutes les corrélations qui pourraient s'expliquer dans le point de vue d'Einstein, qui devra donc être abandonné si on observe leur violation.

© A. Aspect et G. Roger, Institut d'Optique

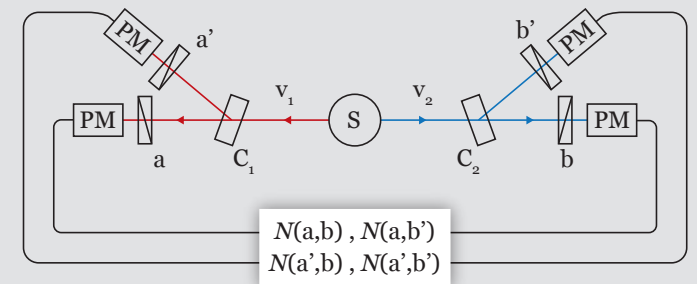
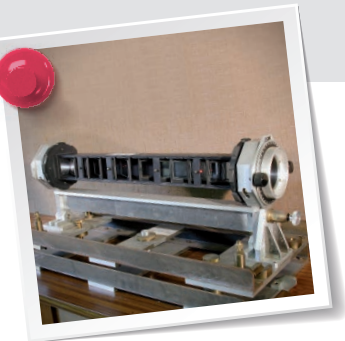


Fig. 2 : expérience de l'Institut d'optique d'Orsay (1982). Après les expériences pionnières des années 1970 réalisées à Berkeley, Harvard puis à Texas A&M, l'utilisation de nouveaux lasers a permis le développement d'une source efficace de paires de photons intriqués, au sein d'une enceinte à vide. Des mesures de polarisation ont établi l'existence de corrélations violant les inégalités de Bell, prouvant ainsi la non-séparabilité des photons de chaque paire, même lorsqu'ils sont éloignés l'un de l'autre. Dans cette expérience, les deux photons étaient éloignés de 12 m au moment des mesures, et les orientations des polariseurs étaient modifiées pendant la propagation des photons entre source et détecteurs, ce qui garantissait une séparation relativiste des mesures, qui ne pouvaient pas être connectées par un signal voyageant à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière.

Ce polariseur constitué de 10 lames à faces parallèles de qualité optique inclinées à l'angle de Brewster, a été construit pour le test des inégalités de Bell.



© Institut d'optique Graduate School

En 1964, il n'existait aucun résultat expérimental permettant de conclure. Les expérimentateurs se mirent donc au travail pour construire une expérience « sensible », dans une des rares situations où la mécanique quantique prédit une violation des inégalités de Bell. Les expériences les plus convaincantes furent réalisées avec des paires de photons intriqués sur lesquels on effectue des mesures de polarisation. Après une première génération d'expériences pionnières réalisées aux États-Unis au début des années 1970, une nouvelle série d'expériences conduites à l'Institut d'optique à Orsay au début des années 1980 (Fig. 2), suivant des schémas de plus en plus proches de « l'expérience de pensée idéale », donnèrent des résultats incontestables, en excellent accord avec la mécanique quantique et violant nettement les inégalités de Bell. Une troisième génération d'expériences publiées à partir de la fin des années 1990 et couronnées par deux expériences de 2015 à Vienne et Boulder, est venue conforter ces résultats [1]. Il faut se rendre à l'évidence : les photons intriqués jumeaux ne sont pas deux systèmes distincts portant deux copies identiques d'un même ensemble de paramètres. Une paire de photons intriqués doit en fait être considérée comme un système unique, inséparable, décrit par un état quantique global, impossible à décomposer en deux états relatifs à chacun des deux photons : les propriétés de la paire ne se résument pas à la réunion des propriétés des deux photons.

[1] En même temps, un schéma différent, mis en œuvre à Delft, permettait d'intriquer des atomes artificiels appelés « centres NV », et une première indication de violation des inégalités de Bell était obtenue avec ce système nouveau qui ouvre des possibilités remarquables pour l'information quantique.

Fig. 1 : l'expérience de pensée d'Einstein, Podolsky et Rosen (1935).

Dans un état quantique EPR, les deux particules 1 et 2 sont totalement corrélées en position et en vitesse. La mesure de position de la première particule peut donner un résultat quelconque ($M_1, M_1' \dots$) ; mais si on a trouvé M_1 , on trouve avec certitude la deuxième particule en M_2 , dont la position se déduit de M_1 par une translation fixe r_0 , et de même si on a trouvé M_1' pour la première on trouve M_2' se déduisant de M_1' par la même translation r_0 . Les mesures sur les vitesses sont elles aussi totalement corrélées. On trouve toujours des vitesses opposées : $V_2 = -V_1$ ou $V_2' = -V_1'$. On peut donc connaître avec certitude la valeur de la position de la particule 2, ou sa vitesse, en effectuant une mesure sur la particule 1. Comme une mesure sur la particule 1 ne saurait affecter instantanément la particule 2 éloignée, EPR concluent que la particule 2 possédait, avant les mesures, une valeur parfaitement déterminée de position et de vitesse, alors que l'état quantique ne peut pas spécifier simultanément ces grandeurs avec une incertitude nulle. EPR en concluent que la description quantique de cette situation est incomplète et qu'il faut s'attacher à chercher comment compléter le formalisme quantique. John Bell démontrera, trente ans plus tard, qu'il est impossible de compléter le formalisme quantique dans l'esprit des idées EPR, c'est-à-dire en conservant la notion de réalité physique d'un système (ensemble de paramètres qui déterminent les résultats de n'importe quelle mesure sur ce système) et la notion de localité relativiste, qui interdit toute influence se propageant plus vite que la lumière.

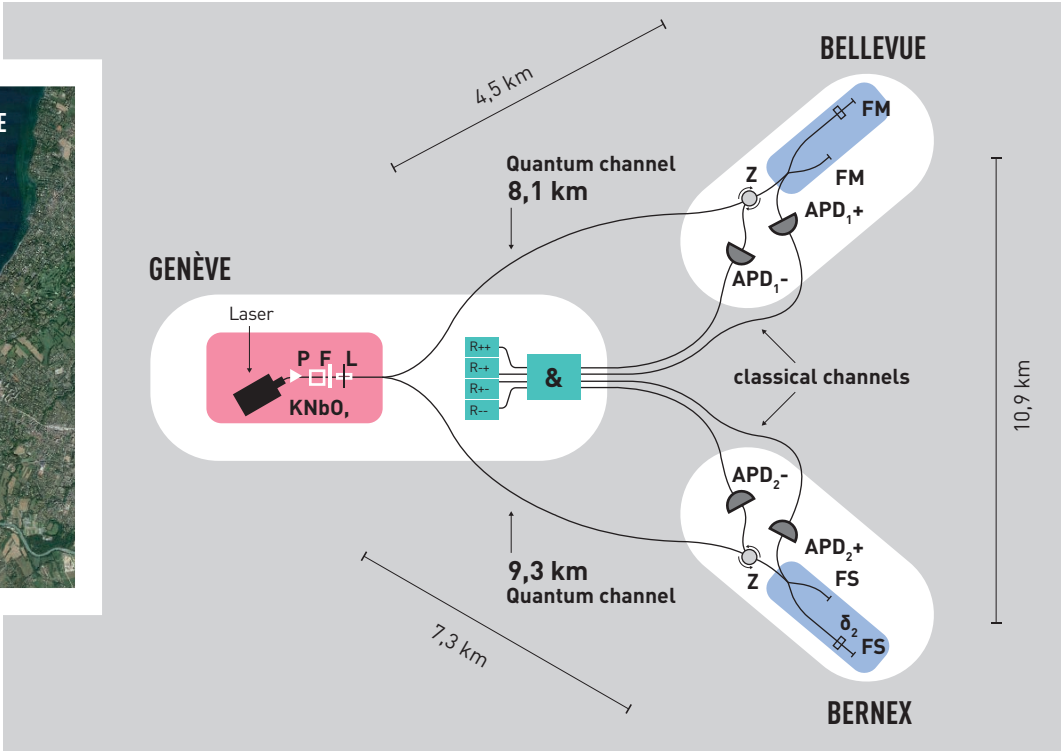


Fig. 3 : expérience de Genève (1998).

Cette expérience utilise les fibres optiques du réseau commercial de télécommunication. La source (située à Cornavin) est à plus de dix kilomètres des détecteurs (Bellevue et Bernex). Cette expérience a permis de montrer que l'intrication continue à exister pour deux photons séparés de plus de dix kilomètres. Dans une expérience analogue réalisée à Innsbruck, on met à profit le temps de propagation dans les fibres pour choisir aléatoirement l'orientation des appareils de mesure (polariseurs) pendant les quelques microsecondes qui s'écoulent entre l'émission des photons et leur observation. On a aujourd'hui montré que l'intrication survit à des centaines de kilomètres, notamment grâce à une source de photons intriqués installée sur un satellite chinois.

L'intrication entre objets quantiques individuels à la base des technologies quantiques

L'inséparabilité quantique se manifeste même si aucune interaction n'a le temps de se propager entre les deux photons éloignés (sauf à une vitesse supérieure à celle de la lumière, ce qui est exclu par la relativité). Dans les expériences de 1982 (Fig. 2), les photons intriqués étaient séparés d'une dizaine de mètres au moment de la mesure, ce qui suffisait déjà à établir la séparation relativiste. Dans les expériences plus récentes, des sources d'un nouveau type permettent d'injecter les photons intriqués dans deux fibres optiques partant dans des directions opposées (Fig. 3) voire même de les émettre depuis un satellite artificiel vers des stations éloignées. L'inséparabilité a pu être vérifiée à des distances de plusieurs centaines de kilomètres. Même à de pareilles distances, tout se passe donc comme si les deux photons restaient toujours en contact et que le résultat de la mesure effectuée sur l'un affectait instantanément l'autre. C'est ce que l'on appelle parfois « la non localité quantique ». Il ne faut pourtant pas en conclure que la non-séparabilité quantique permet la « télégraphie supra-luminale » chère aux auteurs de science-fiction, cela à cause du caractère fondamentalement aléatoire des résultats individuels de mesure. Cela ne l'empêche pas d'avoir des applications radicalement nouvelles dans le domaine de la communication quantique, notamment pour de nouvelles méthodes de cryptographie quantique parfaitement sûres, à la différence des méthodes de

cryptographie classique qui pourraient être cassées en cas de progrès mathématique (hypothétique) ou avec la puissance des ordinateurs (probable).

Les promesses d'application de l'intrication dans les technologies quantiques vont bien au-delà de la communication quantique. En codant l'information sur des bits quantiques portés par des objets quantiques individuels - atomes, photons, ions, microcircuits supraconducteurs - et en intriquant ces qubits pour réaliser un ordinateur quantique, on pourrait développer des méthodes de calcul exponentiellement plus puissantes que les méthodes mises en œuvre sur les ordinateurs classiques. Personne ne sait aujourd'hui s'il sera possible un jour d'intriquer un nombre suffisamment grand de qubits pour profiter de cet avantage exponentiel. Aucune loi physique fondamentale ne l'interdit mais le saut technologique à accomplir semble immense, puisqu'il faudrait passer de la vingtaine de qubits intriqués actuellement disponibles à des centaines de milliers de qubits physiques équivalents à une centaine de qubits logiques idéaux. Le déficit est formidable mais pour ne pas perdre espoir, souvenons-nous que la situation était analogue, il y a trente ans, en ce qui concerne la détection des ondes gravitationnelles. Aurons-nous un authentique ordinateur quantique universel dans trente ans ? Même si ce n'est pas le cas, on peut parier qu'il y aura de nombreuses applications « de niche » des technologies quantiques, que ce soit dans le domaine du calcul, de la simulation ou de la métrologie quantiques. Et sur le plan fondamental, en cas d'échec, ne peut-on rêver qu'on ait alors identifié l'insaisissable frontière entre monde quantique et monde classique ? ■

L'INGÉNIERIE QUANTIQUE 2.0

La deuxième révolution de l'ingénierie quantique concerne des recherches visant à concevoir et réaliser des dispositifs innovants, voire en rupture. C'est un domaine en pleine expansion, avec de très forts enjeux scientifiques et technologiques.

Introduction	16
Communication	19
Métrologie & senseurs	25
Calcul	32

NOTE
Ce texte utilise un certain nombre d'éléments publiés précédemment par le même auteur dans Demain la Physique, Odile Jacob, 2005.

Panorama des technologies quantiques

PAR
PHILIPPE CHOMAZ
ET DANIEL ESTÈVE

(Direction de la recherche fondamentale)



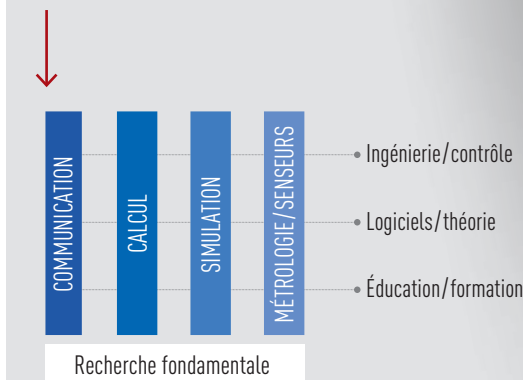
Philippe Chomaz est directeur scientifique exécutif de la Direction de la recherche fondamentale du CEA.

© Alain Porcher CEA/IRFU



Daniel Estève est directeur de recherche et chef du groupe Quantronique dans le Service de physique de l'état condensé (Institut rayonnement-matière de Saclay) au CEA.

Les quatre piliers du programme européen sur les technologies quantiques.



© Quantum Manifesto

Depuis sa création, le CEA s'est intéressé à de nombreux domaines de pointe en recherche fondamentale ou technologique qui sont ou peuvent se révéler importants pour l'accomplissement de ses missions régaliennes et la souveraineté de la France. Alain Aspect aime ainsi à rappeler l'histoire des équipes de la rue d'Ulm venant au CEA/Saclay dans la 2 CV de Claude Cohen-Tannoudji pour apprendre la mécanique quantique grâce aux cours d'Albert Messiah, jeune théoricien tout juste rentré des États-Unis où il avait été le disciple de deux piliers du Manhattan Project : Niels Bohr et Robert Oppenheimer. La mécanique quantique, science née dans les années 20, prenait alors son essor, bouleversant la science et la technologie. C'était le début de la première révolution quantique qui allait conduire à l'invention du laser, du transistor, des ordinateurs, des horloges atomiques et autres GPS ou téléphones portables.

Ainsi, dans de nombreux domaines, le CEA a été pionnier et est devenu une institution de référence. C'est notamment le cas pour ceux présentés dans ce numéro : la microélectronique, l'électronique quantique, les nanosciences et le calcul haute performance.

Dans les années 1980, de nouvelles idées iconoclastes ont été lancées par des physiciens comme Alain Aspect et son expérience historique sur l'intrication et la non-localité des photons, ou Richard Feynman et son article séminal « Simulating Physics with Computers », introduisant la notion de calculateur quantique. C'était le début de la deuxième révolution quantique (voir p. 11). Cette émergence n'est pas passée inaperçue de plusieurs équipes du CEA qui s'intéressaient alors déjà au transport électrique quantique dans les nanostructures et plus globalement aux circuits électriques en régime quantique. Elles sont ainsi devenues des pionnières de ce nouveau champ à la fois scientifique et technologique.

Quantum manifesto

Depuis une trentaine d'années, l'intérêt soulevé par les technologies quantiques n'a fait que croître. Cela a conduit toute la communauté scientifique à porter en 2016 un « Quantum Manifesto » auprès de la Commission Européenne pour que soit lancé un programme d'envergure. Un FET flagship (technologies futures et émergentes), doté d'un milliard d'euros sur dix ans, a alors été décidé par Bruxelles. Les premiers appels à projets, réalisés dès 2017, sont actuellement en cours d'évaluation. Un premier aperçu des technologies quantiques est donné ici, en suivant le découpage standard en quatre domaines d'activité que le flagship a adopté.

Le premier pilier porte sur les communications quantiques

La démonstration théorique, puis expérimentale dès les années 1980, de protocoles de cryptographie dont l'invulnérabilité est garantie par les lois de la physique quantique a ouvert un nouveau champ de recherche en cryptographie (voir p. 19). Dans l'un de ces protocoles assez directement inspiré des expériences ayant caractérisé les propriétés de l'intrication quantique, on transmet en deux lieux éloignés les photons de paires dont les polarisations sont intriquées. Toute tentative de mesure de ces photons par une partie adverse détruit l'intrication quantique présente, ne fournit aucune information utile et devient même détectable. Les systèmes de cryptographie quantique commerciaux comme ceux de la compagnie suisse ID-Quantique permettent déjà de transmettre des messages, mais pas d'encoder des communications à grande échelle car le débit de transmission de bits sécurisés reste encore faible. La mise au point de protocoles permettant un fort débit est donc un enjeu important. De plus, les pertes de photons dans les fibres limitent la portée des transmissions à une distance dépendant du protocole, mais au plus de quelques dizaines de kilomètres sur fibre télécom. La route pour réaliser des réseaux à grand débit passe donc par la mise au point de protocoles optimisés associés à des répéteurs quantiques fidèles capables de transmettre l'information quantique en dépit des pertes sur les fibres. Les recherches effectuées au CEA en photonique quantique (voir p. 23) se rattachent notamment à ce pilier, mais pas seulement.

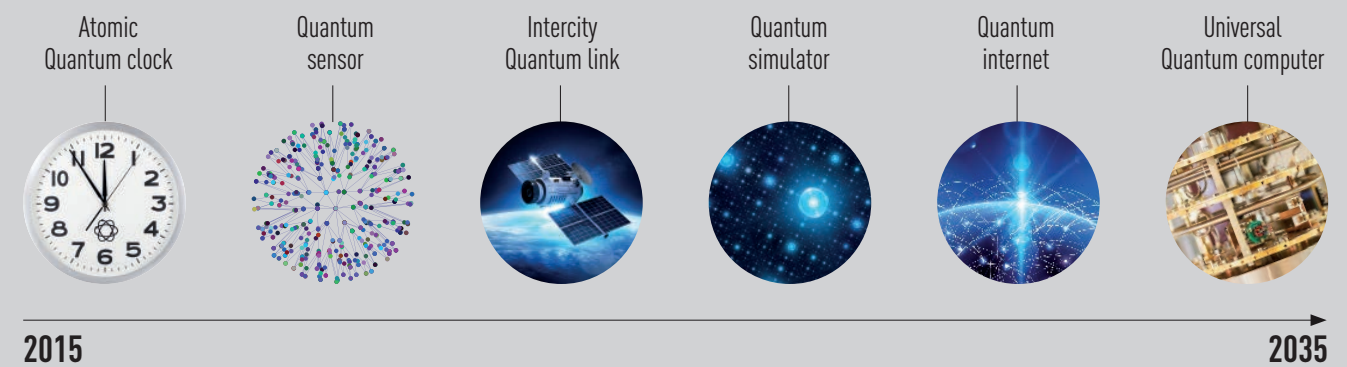
Le deuxième pilier concerne le calcul quantique

Richard Feynman avait fait remarquer dès 1982 que l'évolution d'un système quantique est un problème rendu très difficile par la croissance exponentielle avec sa taille de l'espace de Hilbert de ses états quantiques. Il en avait conclu que seul un autre système quantique contrôlable pourrait parvenir à la déterminer. Le nombre maximum de systèmes quantiques couplés les plus simples, soit les systèmes à deux niveaux, qu'on peut simuler avec le calculateur haute performance le plus puissant à ce jour n'est que de 46, ce qui donne entièrement raison à Richard Feynman ! Mais que la manipulation de l'état quantique d'un registre de bits quantiques en lieu et place d'un registre de bits classiques constitue une ressource puissante pour résoudre des problèmes difficiles fut une belle surprise. Tous les ordinateurs ne sont pas des machines de Turing plus ou moins rapides. Les classes de complexité des problèmes numériques établies pour les ordinateurs classiques ne s'appliquent pas aux ordinateurs quantiques, et, plus intéressant, certains problèmes inattaquables avec des ordinateurs classiques seraient à la portée d'un ordinateur quantique. L'invention par Peter Shor en 1994 d'un algorithme quantique de factorisation des nombres entiers, une tâche dont la difficulté est à la base des méthodes de cryptage universellement utilisées, a marqué les esprits. Un registre de N bits quantiques (qubits) a 2^N états de base correspondant aux 2^N valeurs du registre classique, et son état quantique peut être une superposition arbitraire de ces états.

Un algorithme quantique consiste en l'application d'une succession de portes logiques quantiques qui implémente l'évolution voulue par l'algorithme. À ce stade, la linéarité intrinsèque de la mécanique quantique permet d'appliquer ces phases d'évolution à une superposition arbitraire des états de base, voire à leur somme complète. Comme la lecture du registre ne fournit qu'une valeur 0 ou 1 pour chaque bit, soit un des états de base du registre, tout l'art de l'algorithme quantique consiste à concentrer l'évolution vers les états donnant une/la solution du problème cherché. Cet art est difficile, et un ordinateur quantique n'est pas une machine universelle qui résoudrait tous les problèmes plus rapidement qu'un ordinateur

EN DATA

Quantum Technologies Timeline



© Quantum Manifesto

conventionnel, mais plutôt une machine capable de résoudre efficacement certains problèmes hors de portée des machines conventionnelles (voir p. 40). Mais quels problèmes intéressants peut-on aborder avec le calcul quantique ? Certains problèmes d'algèbre linéaire comme l'inversion de matrices creuses, les problèmes d'apprentissage quantique ou d'optimisation sont notamment explorés. La détermination des énergies de molécules suscite aussi un grand intérêt, car la présence ou l'absence d'un électron sur une orbitale moléculaire se décrit naturellement par l'état d'un bit quantique. L'optimisation de la configuration électronique de molécules à deux ou trois atomes a ainsi été effectuée récemment mais il faudrait une centaine de bits quantiques parfaits pour s'attaquer à un problème intéressant, ce qui nous conduit au problème de la montée en taille.

Mais augmenter le nombre de qubits ne sert que si la cohérence quantique est maintenue malgré les inévitables processus de décohérence. L'enjeu principal du calcul quantique basé sur l'évolution d'un registre pour monter en taille consiste donc à réaliser cette correction quantique d'erreur qui est rendue difficile par l'impossibilité de faire des copies des bits quantiques à protéger, une opération interdite en physique quantique ! La mise au point de bits quantiques intrinsèquement plus robustes et plus faciles à corriger que ceux d'aujourd'hui et/ou d'une architecture intégrable compatible avec la correction d'erreur quantique, sont les grands enjeux du domaine. Les recherches en cours au CEA suivent ces deux stratégies (voir p. 32). À Saclay, on s'intéresse à de nouveaux types de bits quantiques à la cohérence quantique meilleure que celle des bits quantiques supraconducteurs utilisés auparavant. À Grenoble, le CEA développe avec le consortium « Quantum Silicon » des bits quantiques fabriqués avec les techniques de la microélectronique sur silicium, ce qui devrait assurer, une fois les briques élémentaires au point, une intégration à grande échelle compatible avec les ressources énormes exigées pour la correction d'erreur quantique (voir p. 36).

Le troisième pilier s'intéresse à l'évolution d'un système quantique

Il s'agit de le résoudre en faisant de la simulation quantique « à la Feynman » avec un autre système quantique. Il faut, pour cela, trouver une bonne adéquation entre des problèmes quantiques intéressants et des systèmes physiques plus facilement réalisables, ajustables, contrôlables et mesurables. La simulation d'hamiltoniens importants de la matière condensée, comme celui d'Hubbard décrivant la dynamique d'électrons en interaction sur un réseau, peut ainsi s'effectuer avec des atomes ultra-froids sur réseau optique. Il n'y a pas encore de problème quantique pour lequel la simulation a apporté des informations inconnues auparavant mais cela pourrait arriver prochainement. Un grand intérêt de la simulation est de donner accès à l'échelle la plus intime d'un phénomène quantique, ce qui est en général impossible sur le système d'origine.

Le quatrième pilier est baptisé « métrologie et senseurs quantiques »

Il vise à exploiter un ensemble de phénomènes quantiques connus mais restés encore peu exploités pour réaliser des mesures plus précises, tout comme l'était l'intrication quantique avant la prise de conscience de son intérêt pour l'information quantique. Considérons l'exemple des horloges atomiques. Dans une horloge atomique, des atomes suivant des trajectoires dans un interféromètre sont interrogés par des impulsions optiques induisant des transitions entre niveaux atomiques et le signal d'interférence obtenu permet de caler la fréquence d'excitation sur celle d'une raie atomique extrêmement fine, même très précisément sur son sommet. L'utilisation d'états quantiques collectifs d'ensembles d'atomes à la place d'états d'atomes indépendants ouvre déjà des perspectives pour améliorer la sensibilité des horloges atomiques (voir p. 25). Par ailleurs, dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles comme LIGO et VIRGO, l'utilisation de faisceaux de lumière dont le bruit sur la phase de mesure des interférences optiques est comprimé aux dépens du bruit sur l'autre phase améliore maintenant la sensibilité des détecteurs et devrait augmenter d'un facteur 4 le volume effectif de détection dans l'univers de signaux gravitationnels. La compression du bruit sur la phase de mesure d'un signal est ainsi une technologie quantique qui améliore le rapport signal à bruit d'une mesure électromagnétique.

Les recherches menées au CEA dans le domaine des senseurs quantiques portent notamment sur la résonance magnétique pour laquelle des progrès spectaculaires ont été réalisés (voir p. 28). Cela pourrait à terme révolutionner les mesures en chimie et biologie en allant vers des sensibilités ultimes, détection de molécule unique ou résolution accrue. ■

Conclusion

Ces quatre piliers, associés à un effort accru en physique fondamentale, forment le nouveau génie quantique, un mélange interdisciplinaire de recherche et d'ingénierie. Cette deuxième révolution quantique ouvre des possibilités immenses mais gardons-nous de trop promettre trop vite, car les verrous conceptuels et technologiques sont nombreux et difficiles. Mais c'est bien pour relever de tels défis qu'on compte sur un organisme de recherche comme le CEA, avec ses ingénieurs-chercheurs (statut unique) et sa culture qui va de la recherche fondamentale à l'industrie du futur.

Richard Feynman

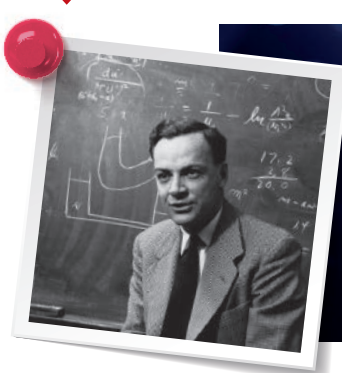


Fig. 1 : vue d'artiste d'un réseau Internet quantique « mondial » hybridant liens fibre optique et satellitaires.

Les nœuds (« points brillants ») correspondent à des stations sol ou en orbite de génération, de stockage ou de mesure de qubits codés sur des photons ou dans des atomes. Les liens entre les nœuds matérialisent les canaux de distributions des qubits photoniques fait de fibres optiques (terrestre) ou d'espace libre (spatial).

ENJEUX ET PERSPECTIVES

Les progrès de la cryptographie quantique

Des liens de communication quantique commencent à être déployés, aussi bien terrestres que satellitaires. Objectif : la transmission ultra-sécurisée de l'information en réponse à la menace de l'ordinateur et des algorithmes quantiques capables de mettre à mal les techniques de chiffrement classiques. La communication quantique prendra véritablement son essor lorsqu'on sera parvenu à assembler les briques élémentaires qui permettent de générer, véhiculer, stocker et synchroniser l'information quantique entre sites distants.

De la communication classique à la cryptographie quantique

Les modes de communication et de traitement de l'information classique ont révolutionné la société au cours des dernières décennies : les cinq continents sont reliés par des câbles optiques sous-marins, les territoires sont maillés par de nombreuses liaisons terrestres ou satellitaires, permettant de véhiculer et router l'information sans perte et à très haut débit sur des distances quasi illimitées.

Toutefois, une limitation forte existe lorsqu'il s'agit de communiquer l'information de façon ultra-sécurisée. En effet, la sécurisation des données intervient à chaque instant dans de très nombreux domaines de

la vie privée ou publique et représente un enjeu stratégique pour les entreprises, les grands groupes industriels, les banques ou l'État. Aujourd'hui, les protocoles utilisés pour le chiffrement et le déchiffrement des messages utilisent des codes mathématiques de plus en plus complexes avec des clefs publiques de plus en plus longues, à mesure qu'augmente la puissance des ordinateurs (classiques) capables de les casser. Cependant, avec les algorithmes classiques, la confidentialité des messages ne peut pas être garantie pour l'éternité. Une stratégie plus efficace et plus pérenne est donc nécessaire : la physique quantique intervient alors pour garantir l'invulnérabilité des communications à distance et sur le long terme, apportant des solutions à l'établissement de clés de chiffrement privées et parfaitement confidentielles [1].

•
**PAR
ELENI DIAMANTI ET
SÉBASTIEN TANZILLI**
(CNRS)



Eleni Diamanti est chargée de recherche au Laboratoire d'informatique de Paris 6 (LIP6) et membre du GDR Ingénierie Quantique, Aspects Fondamentaux & Applications (IQFA).

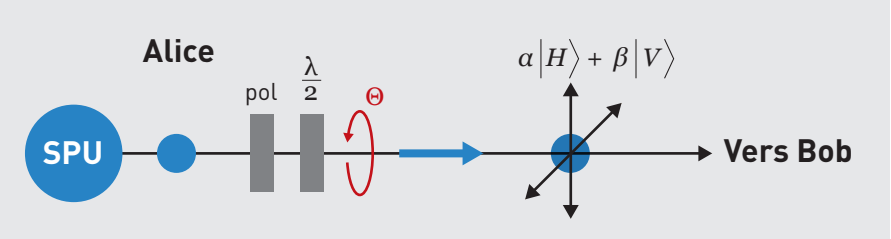


Sébastien Tanzilli est directeur de recherche. Il anime l'équipe Information quantique avec la lumière & la matière (QILM) à l'Université Côte d'Azur et dirige le GDR IQFA.

Fig. 2 : superposition cohérente d'états, qubits et intrication

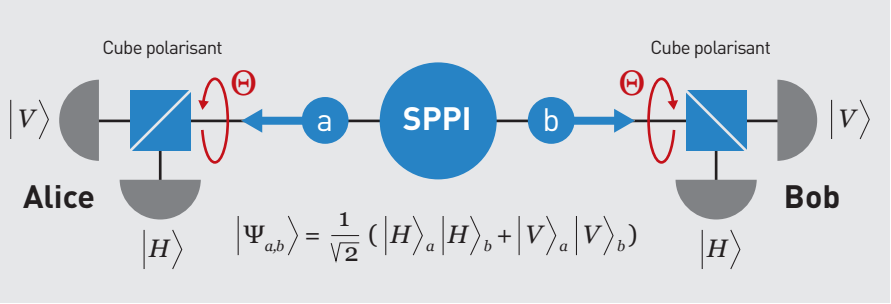
Le codage des qubits offre une infinité de possibilités grâce à l'ensemble des combinaisons données par la superposition cohérente de deux états de base $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Considérons un photon de polarisation horizontale après avoir traversé un polariseur (où SPU représente une source de photons uniques). Si on ajoute une lame demi-onde qu'on fait tourner d'un angle θ (indiqué en rouge ci-dessous), on obtient une superposition $\sin\theta |H\rangle + \cos\theta |V\rangle$ des états de polarisation horizontale $|H\rangle$ et verticale $|V\rangle$. Ceci se traduit par l'obtention d'un qubit sous la forme $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$, les poids relatifs α et β variant avec l'angle θ tout en respectant la règle de normalisation $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

Les qubits photoniques codés sur l'observable polarisation sont couramment utilisés pour la cryptographie quantique, au même titre que les observables temps et fréquence. Les photons qui les portent sont émis à partir de sources de photons uniques (SPU), située ici chez Alice qui code les qubits sur l'observable polarisation par le biais d'un polariseur (Pol) et d'une lame demi-onde. La flèche bleue indique la direction de propagation.



L'intrication représente la généralisation à deux ou plusieurs systèmes quantiques de la superposition cohérente d'états définis pour la constitution d'un qubit. Considérons une source qui émet des paires de photons intriqués (SPPI, voir ci-dessous). La façon la plus courante pour créer une telle source est d'utiliser un cristal non linéaire qui transforme un photon unique en une paire de photons d'énergie moitié (non représenté sur la figure). La paire de photons intriqués doit être considérée comme un système quantique, depuis son instant de création jusqu'aux instants où les photons sont détectés, même s'ils sont à grande distance l'un de l'autre. Lorsqu'une mesure est effectuée sur l'un des deux photons, le résultat de la mesure sur l'autre est immédiatement déterminé.

Ici, une source émet une paire de photons intriqués (SPPI), sur laquelle l'information quantique est codée sur l'observable polarisation. La paire de photons est alors préparée dans un état bien défini $|\Psi_{a,b}\rangle$, alors que les états des photons individuels ne le sont pas : on parle de qubits intriqués. Expérimentalement, les photons sont envoyés à deux utilisateurs distants, Alice et Bob, qui possèdent chacun un cube séparateur de polarisation suivi de deux détecteurs à 90° l'un de l'autre. Ceci leur permet de projeter l'état du photon reçu dans une base d'analyse, ici la base des polarisations horizontale et verticale. En tournant la lame demi-onde (flèche rouge) ils peuvent changer de base d'analyse. Le point crucial est que tant que Bob n'a pas fait de mesure, le photon d'Alice ne possède aucune polarisation définie, puisque seul l'état de la paire compte du point de vue de l'information. En exploitant cette stratégie, les deux interlocuteurs peuvent révéler des corrélations non locales ou établir des clés secrètes utiles aux opérations de cryptographie.



Sur la genèse de la communication quantique

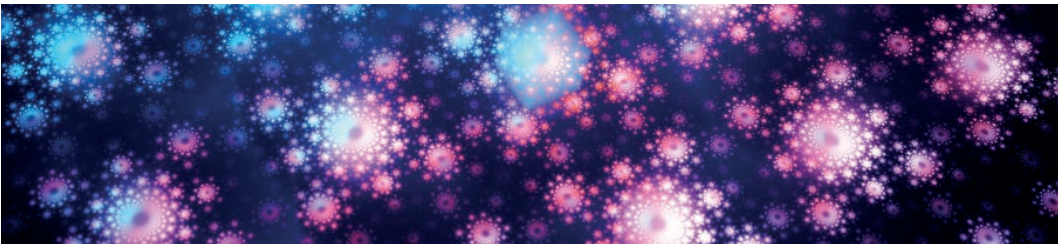
Les expériences du début des années 80 sur l'intrication photonique (voir page 11) ont profondément transformé le domaine de l'optique quantique et ont ouvert la voie à l'ère de l'information quantique. Du point de vue conceptuel, les physiciens ont réalisé que les propriétés intrinsèques à la théorie quantique peuvent servir à coder des bits quantiques d'information utiles à plusieurs protocoles d'échange d'information initialement regroupés sous le terme générique de communication quantique. On parle volontiers de qubit et de paires de qubits intriqués, par analogie avec les bits usuels (voir fig. 1). Du point de vue technologique, la rencontre, à la fin des années 1980, de l'optique quantique et de l'optique non-linéaire a permis le développement de nouvelles sources de photons uniques et intriqués, plus compactes, efficaces et simples d'utilisation (voir p. 22). D'autres techniques ont également vu le jour, autorisant la fabrication et l'exploitation d'émetteurs artificiels, tels que les boîtes quantiques semi-conductrices ou les centres colorés dans les cristaux de diamant.

L'heure est à la construction de véritables réseaux quantiques, permettant la génération, la distribution, la manipulation, le stockage et le traitement de l'information quantique, au même titre que ce qui se fait quotidiennement dans nos réseaux classiques. L'ère de l'Internet quantique promet de révolutionner la communication, via une sécurisation « absolue » des données.

Situation actuelle

La cryptographie quantique sert à établir des clés privées à distance, utilisées ensuite dans des protocoles de chiffrement classiques. Elle repose sur l'échange de bits générés aléatoirement, à ceci près que les bits 0 ou 1 deviennent des superpositions d'états (les qubits). Pour envoyer des qubits sur de grandes distances, le support privilégié est le photon, qui autorise l'encodage de l'information sur des observables telles que la polarisation de la lumière (voir fig. 1). Les photons sont émis un à un (centres colorés dans le diamant, boîtes quantiques) ou par paires (sources paramétriques en optique non-linéaire). Les protocoles variés d'établissement quantique de clés de chiffrement utilisent ainsi des qubits individuels, d'autres des paires de qubits intriqués [1].

C'est une technologie quantique déjà relativement mûre qui donne lieu à des systèmes développés et commercialisés par quelques petites entreprises. La société Suisse ID-Quantique l'a notamment utilisée à plusieurs reprises en situations réelles, par exemple pour le relevé des votes en ligne dans le



Canton de Genève. Ainsi, de véritables réseaux sont actuellement opérationnels dans plusieurs grandes villes du monde, comme c'est le cas à Tokyo depuis 2011 (environ 50 km). Un lien sécurisé sur plus de 300 km a récemment été démontré à Genève [2]. Pour sa part, la Chine vise une connexion quantique par fibre optique entre Pékin et Shanghai sur le long terme (environ 1200 km). Pourtant, la méthode ne peut fonctionner actuellement que sur des distances limitées à quelques centaines de kilomètres en l'absence de relais et de répéteurs sécurisés.

Toute une recherche se développe donc pour rendre les réseaux quantiques plus efficaces et repousser les distances de communication quantique. Il convient donc de concevoir de tels relais et répéteurs, permettant de téléporter et/ou stocker des états intriqués photoniques bipartites en deux endroits distants, puis de synchroniser la réémission des photons. Le principe est intuitif : plus le nombre de ressources impliquées dans un réseau augmente, plus le nombre de nœuds où il est possible de tester la présence de l'information quantique augmente lui aussi. Ces nœuds sont soit des stations de génération (sources de photons uniques ou de photons intriqués), soit des stations de mesure ou de stockage de l'information. Plus spécifiquement, les mémoires quantiques permettent de stocker les qubits sans révéler ni dégrader l'information qu'ils portent, et idéalement avec une très bonne efficacité d'écriture et de relecture. Ces dispositifs sont généralement basés sur un support matériel, par exemple des cristaux dopés aux ions de terre-rare, des vapeurs atomiques à température ambiante ou encore des ensembles d'atomes froids.

Parallèlement à ces recherches, la communication quantique vient de faire ses premiers pas dans l'espace : une source embarquée sur un satellite chinois a en effet permis de distribuer des photons intriqués

entre deux stations sol séparées par une distance record de 1200 km [3]. Une ère nouvelle, celle de la communication quantique intercontinentale, s'ouvre donc aux chercheurs et aux « ingénieurs quantiques » (voir fig. 1).

Perspectives

Afin d'augmenter les débits, la portée et la sécurité des liens de communication quantique, les recherches actuelles se tournent volontiers vers les dernières innovations technologiques en photonique et en micro-électronique [4,5]. Ceci devrait permettre la mise en place de véritable crypto-systèmes quantiques, allant du prototype au dispositif éprouvé. Ainsi, grâce aux récents progrès expérimentaux relatifs à la manipulation de l'intrication aux longueurs d'onde des télécommunications, les chercheurs envisagent aujourd'hui des protocoles quantiques de communication à grande échelle, que ce soit en termes de nombre d'utilisateurs connectés que de distances qui les séparent (voir fig. 1).

L'intrication devrait donc permettre le développement de crypto-systèmes certifiés ou, en d'autres termes, indépendants du matériel employé (sources et détecteurs). Par ailleurs, de nouvelles idées d'hybridation émergent sans cesse : certaines visent à introduire la cryptographie quantique dans les systèmes télécoms existants [6], d'autres envisagent des solutions post-quantiques à base de cryptographie classique actuellement non attaquables par l'ordinateur quantique. Enfin, du point de vue développement de systèmes, l'augmentation drastique de la portée des réseaux quantiques passera probablement par l'interconnexion entre les technologies qui relèvent des liens satellitaires pour les ponts point-à-point à grande échelle et liens fibre optique pour les ponts locaux multipoints. ■

Conclusion

Si des années de R&D sont encore nécessaires avant que le grand public dispose d'un Internet quantique universel, l'établissement des clés privées ultra-sécurisées entre sites distants est vu aujourd'hui comme la façon de contourner la menace de l'ordinateur quantique qui « pèse » sur les systèmes de chiffrement classique.

[1] V. Scarani et al., Rev. Mod. Phys. 9, 1301-1350 (2009).
[2] B. Korzh et al., Nat. Phot. 9, 163 (2015).
[3] J. Yin et al., Science 3456, 1140-1144 (2017).
[4] A. Martin et al., New J. Phys. 14, 025002 (2012).
[5] E. Diamanti et al., NPJ Quant. Inf. 2, 16025 (2016).
[6] D. Aktas et al., Laser & Photon. Rev. 10, 451-457 (2016).

« Grâce aux récents progrès expérimentaux relatifs à la manipulation de l'intrication aux longueurs d'onde des télécommunications, les chercheurs envisagent aujourd'hui des protocoles quantiques de communication à grande échelle. »



Pour aller plus loin

Site du Groupement de Recherche en « Ingénierie quantique, aspects fondamentaux & applications » du CNRS : <http://gdrifqa.cnrs.fr>

CONTRIBUTEURS

(Direction de la recherche fondamentale)



Jean-Michel Gérard est chef du Service de photonique, électronique et ingénierie quantique (PHELIQS) de l'Institut de Nanoscience et Cryogénie (INAC) à Grenoble.



Julien Claudon est chercheur dans le Service de photonique, électronique et ingénierie quantique (PHELIQS) de l'Institut de Nanoscience et Cryogénie (INAC) à Grenoble.

APPLICATIONS

Générer et détecter le photon unique

Sources de photons uniques et détecteurs à nanofil supraconducteur : des composants révolutionnaires pour répondre aux besoins des communications quantiques.

Les communications quantiques reposent sur la transmission d'impulsions lumineuses constituées d'un seul photon. C'est là une différence fondamentale par rapport aux protocoles de télécommunication sur fibre optique, pour lesquels un bit est porté par plusieurs milliers de photons ! Les besoins très spécifiques des communications quantiques ont ainsi stimulé le développement de composants optoélectroniques nouveaux, capables d'émettre ou de détecter un photon unique de façon presque parfaite.

On sait depuis les années 80 détecter un photon unique à l'aide de photodiodes à avalanche mais, aux longueurs d'onde adaptées à la transmission sur fibre optique (1,3 μm -1,6 μm), ces composants génèrent beaucoup de « coups de bruit » ou faux événements de détection. En pratique, ce défaut limite la portée des liaisons sécurisées par cryptographie quantique. Un détecteur nouveau, introduit en 2001, repose sur l'absorption de la lumière par un

nanofil supraconducteur. Un tel conducteur conduit habituellement sans résistance le courant, pour une température inférieure à sa température critique ($T_c \sim 10$ K pour NbN). Mais dans un nanofil, l'énergie apportée par l'absorption d'un photon unique suffit à détruire localement l'ordre supraconducteur. Le fil devient partiellement résistif et un saut de différence de potentiel est détecté à ses extrémités. Par essence, un tel détecteur ne peut fonctionner qu'à une température cryogénique, mais cet inconvénient est largement compensé par un ensemble d'atouts remarquables (large gamme spectrale englobant le visible et le proche infrarouge, bruit de l'ordre de quelques coups par secondes, résolution temporelle de l'ordre de la dizaine de picosecondes). Pour les détecteurs les plus simples, le film supraconducteur est trop mince pour absorber à coup sûr les photons et l'efficacité de détection est seulement de l'ordre de 20 à 30 %. Le CEA, en collaboration avec la start-up néerlandaise Single Quantum, a conçu et réalisé des détecteurs fibrés qui utilisent une microcavité

optique pour renforcer l'absorption, et présentent une efficacité de détection record, supérieure à 90 %. Le CEA explore par ailleurs l'intégration de détecteurs à nanofils supraconducteurs sur des circuits photoniques, pour tirer parti de leurs remarquables performances dans le domaine du calcul et des simulations quantiques.

Pistolet à photon

En l'an 2000, développer une source de photon unique pour les communications quantiques semblait encore une gageure, tant les contraintes à satisfaire sont fortes. Cette source, sorte de « pistolet à photon », doit émettre une impulsion lumineuse au moment choisi, être pure (pas d'impulsion multi-photonique) et efficace (peu d'impulsions sans photon). Dans la plupart des cas, elle doit être monomode, c'est-à-dire que les photons uniques émis successivement doivent être préparés dans le même état quantique (mode spatial, polarisation, paquet d'onde temporel...). Enfin, il est important qu'elle possède une certaine agilité spectrale, de façon à ce que des sources distinctes puissent fonctionner exactement à la même longueur d'onde dans des réseaux ou simulateurs quantiques. La diode laser, composant clef pour les communications optiques à haut débit, ne peut remplir cette nouvelle fonction. En effet, elle génère des états cohérents, pour lesquels le nombre de photons varie aléatoirement d'une impulsion à l'autre, en suivant la loi statistique de Poisson.

Conceptuellement, l'approche la plus simple et la plus élégante pour générer un photon unique consiste à exploiter l'émission spontanée d'un atome

isolé. Si on excite un atome de son état fondamental vers son premier état excité, par exemple à l'aide d'une impulsion laser, il relaxe spontanément vers son état fondamental en émettant un unique photon. Une variante de ce protocole a, par exemple, été mise en œuvre par Alain Aspect pour conduire ses fameuses expériences sur la violation des inégalités de Bell (voir p. 11). Il est bien sûr très délicat de manipuler des atomes individuels. En vue d'applications pratiques, il est plus commode d'utiliser des « atomes artificiels » solides, qui imitent leurs propriétés. Les boîtes quantiques de semi-conducteurs (voir encadré) jouent ici un rôle de premier plan.

Boîtes quantiques

Choisir un bon atome artificiel n'est cependant pas suffisant pour fabriquer une source efficace. En effet, de façon habituelle, l'émission spontanée tend à être rayonnée dans toutes les directions de l'espace. En vue d'une application pratique, il faut rendre le diagramme de rayonnement aussi directionnel que possible ou, mieux encore, canaliser toute l'émission dans un mode bien défini du champ électromagnétique. Ce point est particulièrement crucial pour les boîtes quantiques qui sont, du fait de leur mode de fabrication, intégrées au sein d'un matériau à fort indice de réfraction. Ainsi, une part prépondérante de l'émission de la boîte quantique reste piégée dans le matériau, par réflexion totale interne. Pour réaliser une source efficace et monomode, il est impératif de « modeler » l'émission spontanée.

Dans cet esprit, une approche aujourd'hui très employée consiste à placer la boîte quantique au cœur d'une microcavité optique (fig. 2), sorte de « cage à

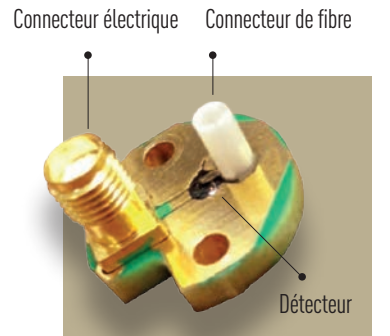
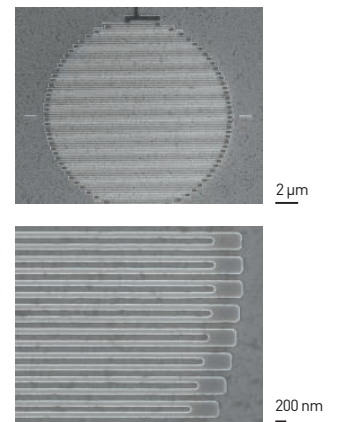


Fig. 1 : vue d'ensemble d'un détecteur de photon unique, avec l'accès pour la fibre optique et les contacts électriques.

En bas : vues, au microscope électronique, du nanofil supraconducteur qui constitue la zone active du dispositif (H. Machhadani, INAC 2017).



La boîte quantique, un atome artificiel

Une boîte quantique est constituée par une inclusion de taille nanométrique d'un matériau semi-conducteur au sein d'un autre semi-conducteur de plus grande bande interdite. On sait fabriquer assez facilement de telles nanostructures à l'aide de techniques de croissance de couches minces de semi-conducteurs. La mécanique quantique nous apprend qu'une boîte quantique possède un spectre discret d'états électroniques, comme un atome, du fait du confinement des électrons dans un volume très petit. Ces atomes artificiels présentent une palette d'atouts uniques, aujourd'hui bien établis : stabilité dans le temps, capacité à émettre aux longueurs d'onde télécom pour des boîtes de taille idoine, émission très pure de photons uniques, raie d'émission très fine, bien adaptée pour les expériences d'optique quantique. Il faut cependant noter que ces deux dernières propriétés sont obtenues au prix d'un fonctionnement à température cryogénique (1-50K).

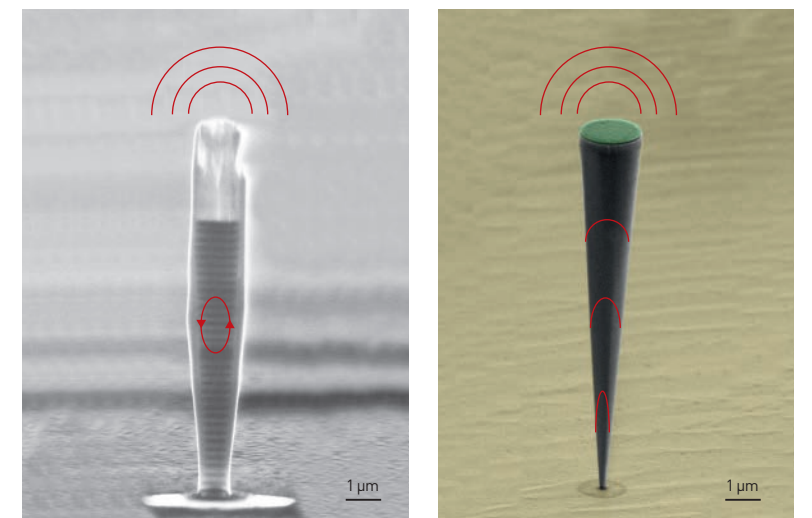


Fig. 2 : vues au microscope électronique de deux sources de photon unique, utilisant une microcavité optique à miroirs de Bragg (à gauche) ou une trompette photonique (à droite). La boîte quantique est placée au cœur de la cavité ou au sein du pied de la trompette. Les traits rouges schématisent la propagation du rayonnement émis par la boîte quantique.

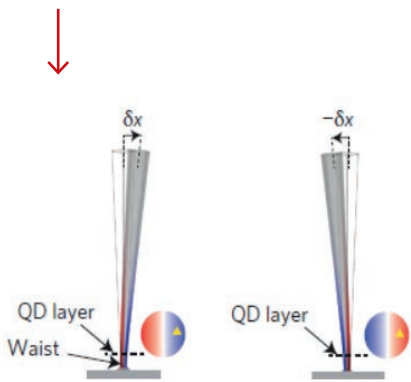


« Les communications quantiques reposent sur la transmission d'impulsions lumineuses constituées d'un seul photon. C'est là une différence fondamentale par rapport aux protocoles de télécommunication sur fibre optique, pour lesquels un bit est porté par plusieurs milliers de photons ! »

Fig. 3 : en haut, illustration du champ de contrainte induit dans une trompette photonique en flexion.

Les zones en compression sont figurées en rouge, celle en tension en bleu.

En bas, évolution temporelle de l'énergie des photons émis par une boîte quantique, dans une trompette en régime d'oscillation mécanique forcée. On observe une oscillation périodique en phase avec la vibration mécanique.



photons », capable de confiner la lumière dans toutes les directions, à une échelle spatiale de l'ordre de celle de sa longueur d'onde d'émission. Une telle cavité confine quelques modes du champ électromagnétique, bien séparés les uns des autres dans l'espace des fréquences. Si on fait coïncider la fréquence d'émission de la boîte quantique avec celle d'un mode de la microcavité optique, ses propriétés changent radicalement : l'émission spontanée d'un photon devient dix à cent fois plus rapide, et presque tous les photons sont injectés dans le mode. Cet effet est connu sous le nom « d'effet Purcell ». Ce concept a permis à l'un des auteurs de réaliser en 2001, au sein du Laboratoire de photonique et de nanostructures (LPN) du CNRS, la première source de photon unique monomode. Après une longue phase de maturation au LPN, cette source présente aujourd'hui des performances très attractives et est commercialisée depuis 2017 par la startup Quandela (Orsay).

Trompette photonique

Du fait de la contrainte d'accord spectral entre l'émetteur et le mode, les sources à microcavité ont cependant une plage d'accordabilité spectrale assez étroite. Pour contourner cette limitation, le CEA a

introduit en 2013 une nouvelle source, la trompette photonique (fig. 2). La boîte quantique est intégrée dans un nanofil en arséniure de gallium (GaAs), défini par gravure en salle blanche, qui forme un guide d'onde en forme de cône. GaAs, qui a un indice de réfraction bien supérieur à celui du vide, tend à capter toute l'émission de la boîte quantique. Plus précisément, des études théoriques montrent que 95% des photons émis sont injectés dans le mode guidé du fil photonique. Un miroir adapté est placé au pied de la trompette pour rediriger toute l'émission vers le haut. La forme évasée du fil photonique permet d'augmenter graduellement la taille latérale du mode guidé, pour obtenir un diagramme de rayonnement Gaussien faiblement divergent, bien adapté, par exemple, au couplage direct à une fibre optique en vue d'une application aux communications quantiques. Les trompettes photoniques ont déjà permis de réaliser des sources très pures et de haute efficacité (0.75 photon/impulsion). En outre, il est possible de modifier leur longueur d'onde d'émission sans dégrader leur efficacité (voir encadré). Prochain objectif : la réalisation de sources ultrabrillantes de paires de photons enchevêtrés, composant indispensable pour la réalisation de répéteurs quantiques ! ■

Effets de contrainte et mesures quantiques dans les trompettes photoniques

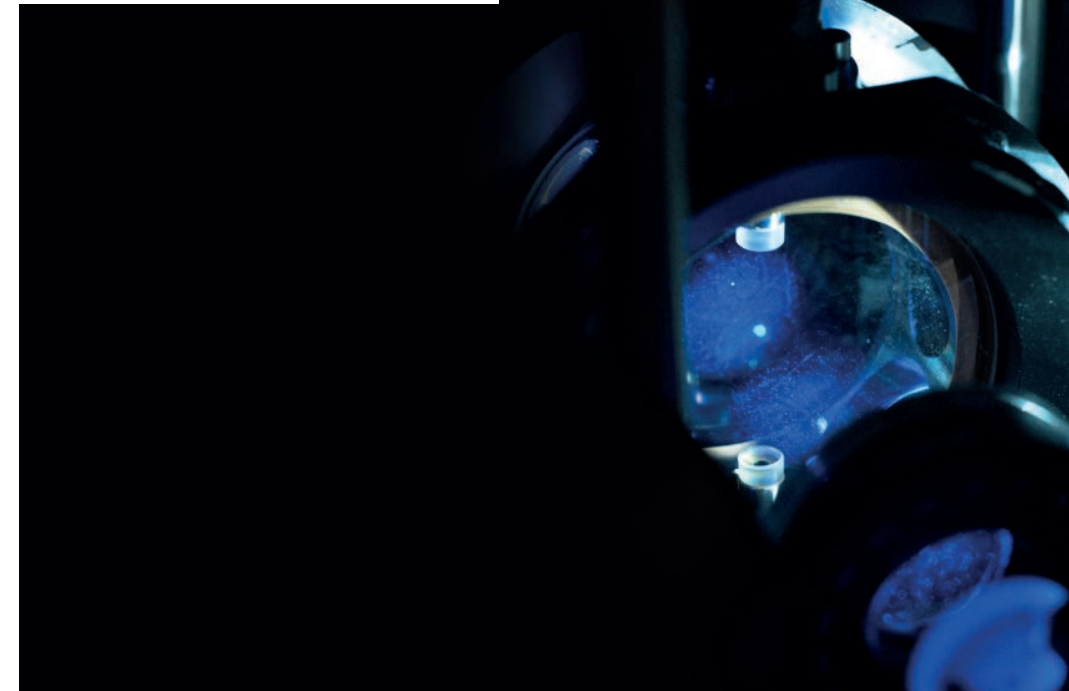
Par leur forme particulière, les trompettes photoniques (fig. 3) sont facilement déformables et ce degré de liberté ouvre de nombreuses opportunités. En fléchissant une trompette, on peut, par exemple, induire une contrainte mécanique localisée au voisinage de son pied et modifier la longueur d'onde d'émission de la boîte quantique. PHELIQS a ainsi obtenu, en collaboration avec l'institut Néel de Grenoble, une source de photon unique accordable sur une plage spectrale remarquablement large (25 nm). Cette propriété est cruciale pour les applications exploitant plusieurs sources de photons uniques car celles-ci doivent émettre à des longueurs d'ondes rigoureusement identiques.

Réciproquement, étudier le déplacement de la raie d'émission - très fine - de la boîte quantique, nous permet de sonder la position de la trompette avec une remarquable sensibilité. En collaboration avec des collègues de l'université de Bâle, nous avons ainsi pu détecter le mouvement Brownien de la trompette à la température de 4K, dont l'amplitude est seulement de l'ordre de 100 femtomètres ! Cette expérience récente, qui exploite pleinement la finesse de la raie d'émission de l'atome artificiel, ouvrira peut-être la voie au développement de capteurs quantiques de position, de force ou de température originaux.

RÉFÉRENCES

A highly efficient single-photon source based on a quantum dot in a photonic wire - J. Claudon, J. Bleuse, M. Bazin, N.S. Malik, P. Jaffrennou, N. Gregersen, C. Sauvan, P. Lalanne and J.M. Gérard - Nature Photon. 4, 174 (2010) ■ **Dielectric GaAs antenna ensuring an efficient broadband coupling between an InAs quantum-dot light emitter and a gaussian optical beam** - M. Munsch, N.S. Malik, E. Dupuy, A. Delga, J. Bleuse, J.M. Gérard, J. Claudon, N. Gregersen and J. Moerk - Phys. Rev. Lett. 110, 177402 (2013) ■ **Design of broadband high-efficiency superconducting-nanowire single photon detectors** - L. Redaelli, G. Bulgarini, S. Dobrovolskiy, S. N. Dorenbos, V. Zwiller, E. Monroy, J.M. Gérard - Supercond. Sci Tech 29, 065016 (2016)

Fig. 1 : Horloge à réseau optique de strontium. On distingue, au centre, l'échantillon d'atomes piégés et refroidis par laser.



© Rodolphe Le Targat (SYRTE)

ENJEUX ET PERSPECTIVES

Bientôt des capteurs quantiques

Un capteur quantique permet de mesurer une ou plusieurs grandeurs physiques en se fondant sur des systèmes ou des phénomènes quantiques. Déjà présents dans quelques applications, la gamme de capteurs et d'applications associées se développe rapidement.

Par leur nature même, les systèmes quantiques sont très reproductibles et permettent donc de réaliser des capteurs à la fois exacts et très sensibles. C'est le cas des capteurs qui reposent sur la spectroscopie de transitions atomiques dont les niveaux d'énergies sont définis par la nature. Un exemple connu est celui des horloges atomiques qui, dès les années 50, ont démontré l'intérêt de l'utilisation d'un système quantifié et parfaitement reproductible pour la réalisation des étalons de fréquence. Cette propriété a été à la base de la redéfinition de la seconde à partir d'une transition de l'atome de césium.

Aujourd'hui, les horloges atomiques ont des impacts sociétaux très importants en permettant de réaliser et de garder synchrones l'ensemble des échelles de temps réalisées à travers le monde. De nombreuses applications en dépendent directement : les télécommunications, les transports, la certification des transactions et bien sûr les systèmes de positionnement par satellite (GNSS). Un deuxième exemple emblématique est celui de la résonance magnétique nucléaire (RMN) avec en particulier son application à l'imagerie (IRM) qui nous permet de disposer de méthodes de diagnostic sans équivalent en médecine.

• **PAR ARNAUD LANDRAGIN** (CNRS)



Arnaud Landragin est directeur du Laboratoire systèmes de référence temps-espace (SYRTE), unité mixte de recherche Observatoire de Paris/CNRS/PSL/Sorbonne Université/LNE.

« Aujourd'hui, les horloges atomiques ont des impacts sociétaux très importants en permettant de réaliser et de garder synchrones l'ensemble des échelles de temps réalisées à travers le monde. »

« Les horloges atomiques, dès les années 50, ont démontré l'intérêt de l'utilisation d'un système quantifié et parfaitement reproductible pour la réalisation des étalons de fréquence. »



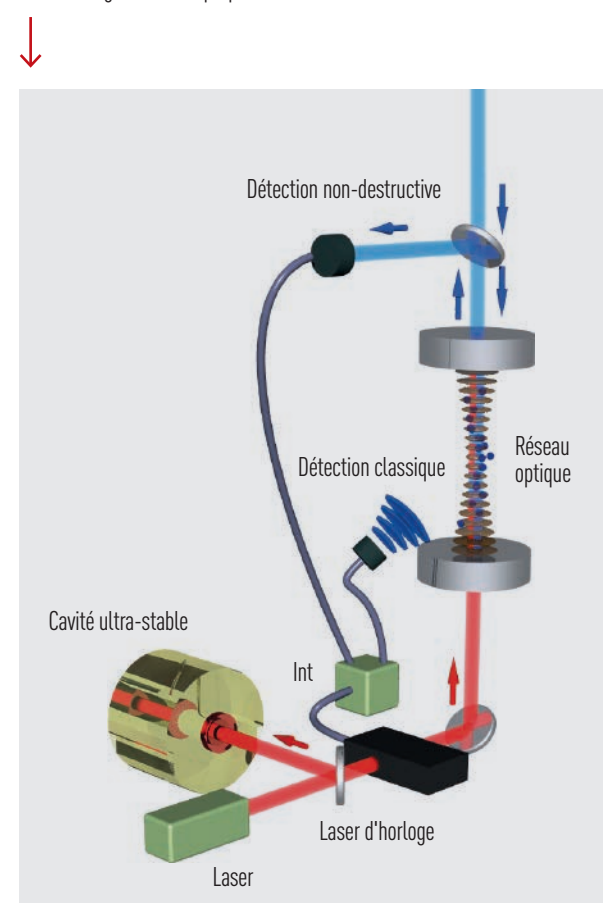
En savoir plus

Les horloges atomiques

Le principe d'une horloge atomique repose sur l'asservissement de la fréquence d'un oscillateur macroscopique (à quartz, laser...) sur la fréquence d'une transition atomique ou moléculaire. L'oscillateur délivre la fréquence de référence qui bénéficie des qualités intrinsèque de stabilité et d'exactitude de la référence atomique.

Dans une horloge à réseau optique (voir fig. 2), les atomes froids (points bleus) sont transférés dans un piège en réseau formé par une onde laser intense (marron). La transition atomique de référence est sondée par un laser ultra-stable (rouge). Bénéficiant d'un temps d'interrogation très long (piégeage) et d'une fréquence d'interrogation élevée (domaine optique), cette nouvelle génération d'horloge permet d'atteindre des performances record : 10^{-17} ou 10^{-18} en fréquence relative. Une nouvelle méthode de détection des atomes, non-destructive au sens quantique, va permettre de réaliser et d'utiliser des échantillons de 10 000 atomes intriqués. La stabilité de l'horloge pourra être améliorée au-delà de la limite quantique standard, ouvrant en particulier le champ de la géodésie chronométrique par mesure directe du potentiel gravitationnel.

Fig. 2 : schéma de principe d'une horloge à réseau optique.



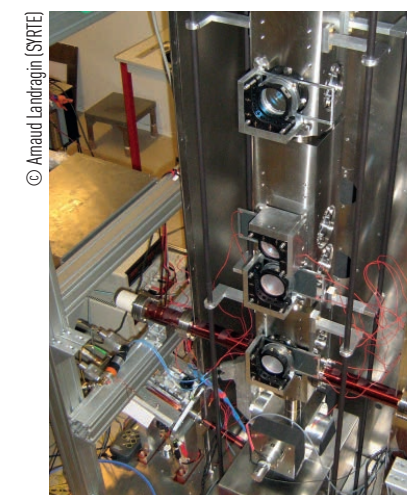
© Jérôme Lodewyck (SYRTE)

cohérence quantique. Par exemple, les défauts ponctuels dans le diamant (centre NV) qui réalisent des « atomes artificiels » permettent de sonder les champs magnétiques ou électriques en combinant très grande sensibilité et résolution spatiale. De même, les progrès de la micro-électronique associée à des méthodes de cryogénie, qui réduisent les sources de décohérence thermiques, permettent de développer des capteurs quantiques plus complexes : l'effet Josephson et l'effet Hall quantique sont devenues les méthodes de référence pour les étalonnages des grandeurs électriques ; les capteurs avec circuits supraconducteurs (SQUIDS), par RMN ou par résonance paramagnétique électronique (RPE) démontrent des sensibilités records aux champs électromagnétiques dans une très large gamme de fréquence (voir p. 28) ; les capteurs opto-mécaniques quantiques permettent des mesures de contraintes ou de forces extrêmement faibles et localisées.

Aspects fondamentaux

Le développement de ces capteurs quantiques relève d'aspects fondamentaux dans leur réalisation et leur contrôle, avec pour but d'atteindre leur limite ultime en utilisant le développement de protocoles d'ingénierie quantiques. Par exemple, nous pouvons considérer le cas des horloges atomiques dont la limite intrinsèque est liée au nombre fini d'atomes. Dans ce cas, comme dans celui de tous les capteurs utilisant un ensemble de spins en superposition quantique entre deux états, la limite standard classique est liée au bruit de projection quantique lors de la mesure de l'état de spin et s'améliore comme la racine du nombre de particules mesurées. L'utilisation de méthodes d'ingénierie quantique,

dites de compression de spin, permet de dépasser cette limite pour atteindre la limite fondamentale (limite d'Heisenberg) s'améliorant comme le nombre de particules. Pour atteindre ces régimes non standards, il est nécessaire de développer des technologies connexes spécifiques à chaque capteur, comme par exemple la lecture de l'état quantique au niveau de l'atome unique. La dernière étape complexe réside dans la fonctionnalisation de ces capteurs dans leur environnement d'application afin de dépasser l'étape des expériences de démonstration et d'en faire des instruments. Elle peut s'avérer particulièrement exigeante en particulier lorsque les applications sont hors des laboratoires de physique. Elle inclut à la fois des aspects technologiques mais également des aspects systèmes pour que le signal soit utilisable par un non spécialiste. ■



© Amaud Landragin (SYRTE)

Fig. 1 : gyromètre à atomes froids

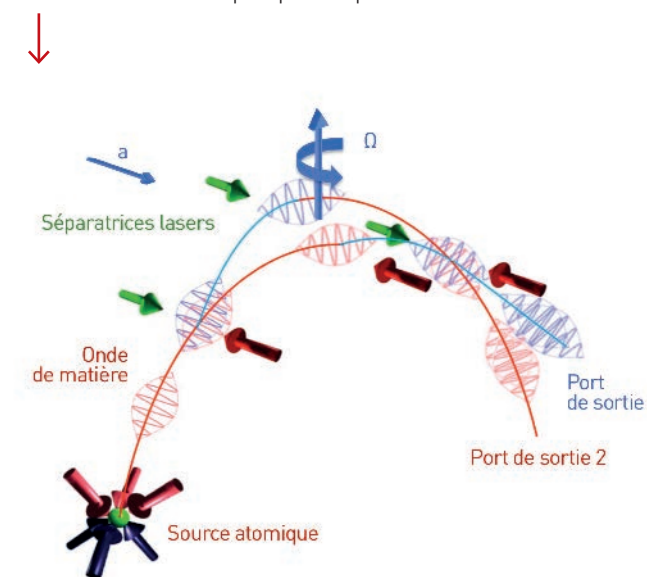


En savoir plus

Les capteurs inertiels par interférométrie atomique

Les interféromètres atomiques exploitent la dualité onde-corpuscule énoncée par de Broglie. Le paquet d'ondes atomiques est diffracté par l'application d'une brève impulsion d'une onde stationnaire optique et se retrouve dans une superposition cohérente de deux paquets d'ondes partiels, qui diffèrent par leur état d'impulsion, et qui vont se séparer spatialement (voir fig. 3). Dans sa version la plus simple, on peut réaliser un interféromètre à l'aide de trois impulsions et recombiner les deux ondes partielles à la troisième impulsion. La différence de phase accumulée suivant les deux bras est proportionnelle à l'accélération suivant la direction de séparation et à la rotation autour de la normale à l'aire orientée. L'utilisation d'atomes refroidis par laser donne accès à des temps d'interrogation importants (quelques 100 ms) avec des sensibilités record pour les gravimètres (accéléromètre vertical) et pour les gyromètres. De nombreuses applications en géoscience sol ou spatial ainsi qu'en navigation inertielle sont en cours de développement, que ce soit avec des atomes en chute libre comme ici ou des atomes piégés.

Fig. 3 : schéma d'un interféromètre atomique utilisant des atomes en chute libre manipulés par des séparatrices lasers.



Conclusion

Les capteurs sont les pièces maîtresses, souvent cachées, des développements de nouveaux domaines d'applications. Les capteurs quantiques ouvrent des champs d'applications très larges allant du domaine de l'équipement de haute performance pour la micro-électronique ou les sciences du vivant (mesures du champ électrique et magnétique émis par une cellule) à la navigation inertielle et aux sciences de la terre (mesures du champ magnétique, du champ de gravité ou même du potentiel gravitationnel par géodésie chronométrique).



Pour aller plus loin

Les horloges optiques :
<https://synte.obsmp.fr/spip/science/top/>

Les interféromètres atomiques :
<https://synte.obsmp.fr/spip/science/iaci/>

CONTRIBUTEURS

(Direction de la recherche fondamentale)



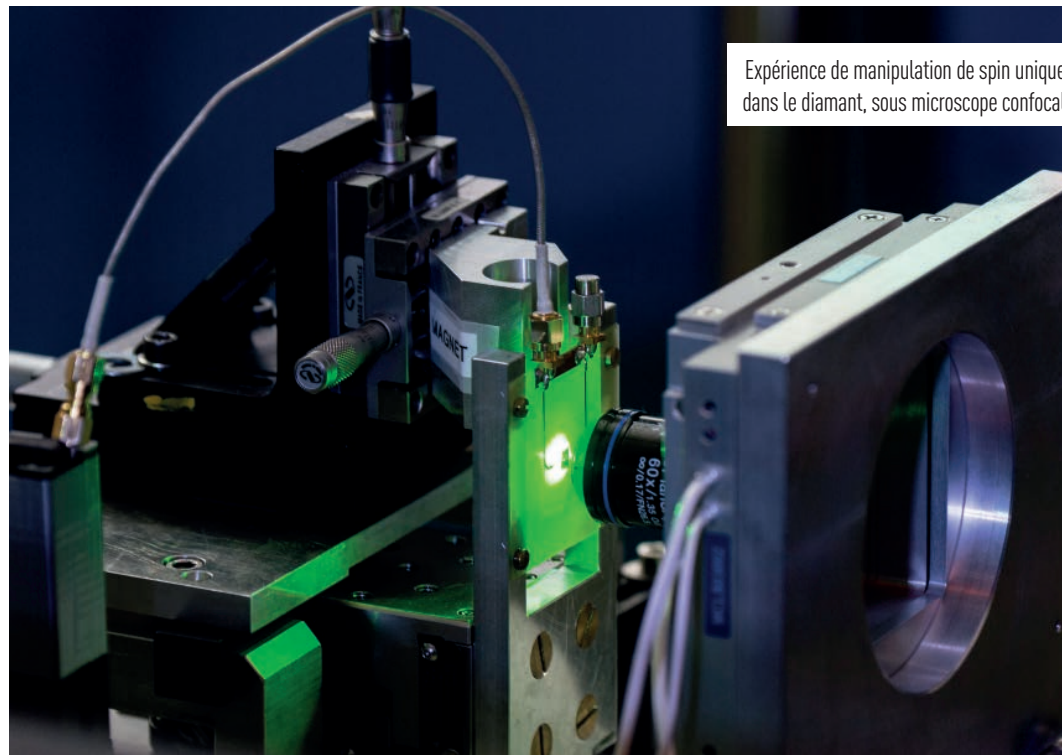
Patrice Bertet est chercheur dans le groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (Institut rayonnement-matière de Saclay) au CEA.



Denis Vion est chercheur dans le groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (Institut rayonnement-matière de Saclay) au CEA.



Daniel Estève est directeur de recherche et chef du groupe Quantronique dans le Service de physique de l'état condensé (Institut rayonnement-matière de Saclay) au CEA.



Expérience de manipulation de spin unique dans le diamant, sous microscope confocal

© P.Stroppa / CEA

APPLICATIONS

Détecter les spins

La spectroscopie de résonance de spins électroniques et nucléaires a de multiples applications dans divers domaines mais souffre d'une sensibilité limitée. L'emploi de circuits quantiques supraconducteurs à très basse température permet d'améliorer grandement cette sensibilité, jusqu'à la détection d'un tout petit nombre de spins.

La résonance magnétique a un impact important dans nos vies de tous les jours, de l'imagerie médicale au contrôle qualité dans la production de bière. Cette technique utilise de puissants aimants et des impulsions radiofréquences ou micro-ondes pour révéler de faibles concentrations de molécules dans une substance. Améliorer sa sensibilité - en augmentant le signal ou en réduisant le bruit - permet de mesurer de plus faibles quantités de matériel et constitue donc une quête incessante de la discipline.

Une piste générale est de s'appuyer sur les principes fondamentaux de la mécanique quantique pour réaliser des capteurs ultimes, c'est le domaine des « capteurs quantiques ». Depuis 2015, le groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (SPEC) à l'Institut rayonnement-matière de Saclay (IRAMIS), en collaboration avec des chercheurs de l'University College à Londres et de l'uni-

versité d'Aarhus au Danemark, applique les technologies quantiques des circuits supraconducteurs refroidis à ultra-basse température (10 millikelvins) à la résonance magnétique. Notre motivation principale est d'améliorer la sensibilité de la détection de spins électroniques de plusieurs ordres de grandeur. Comment est-ce possible ?

Tout d'abord, aux très basses températures T où nos expériences sont réalisées, l'énergie $k_B T$, caractéristique des fluctuations thermiques, est bien inférieure à l'énergie d'un seul photon, à la fréquence de résonance des spins (4-8 GHz). Cela implique qu'à l'équilibre thermique les spins sont complètement polarisés dans leur état de plus basse énergie, ce qui maximise le signal de résonance. En outre, le bruit thermique est aussi supprimé, ne laissant place qu'aux seules fluctuations quantiques du champ micro-onde (vide de photons).

Multiples opportunités

Par ailleurs, les circuits supraconducteurs quantiques offrent de multiples opportunités pour détecter avec une grande efficacité les faibles signaux micro-ondes émis par les spins. Un circuit essentiel est le micro-résonateur supraconducteur représenté schématiquement sur la figure 1. Comportant un condensateur C en parallèle avec une inductance L constituée d'un simple fil, il a une fréquence de résonance $\omega_o = 1/\sqrt{LC}$. Il fonctionne comme une antenne captant les signaux émis par les spins lorsque leur fréquence ω_s est accordée à celle du résonateur par un champ magnétique B_o , selon la relation $\omega_s(B_o) = \omega_o$. La particularité des résonateurs utilisés est que le fil servant d'inductance a une dimension transverse très petite, de l'ordre du micromètre ou même en-dessous ; grâce à cela, ces résonateurs sont extrêmement sensibles aux spins situés dans une « zone active » cylindrique d'environ $1\mu m$ de rayon autour du fil (Fig. 1). Par ailleurs, intégralement fabriqués dans un métal supraconducteur (l'aluminium dans nos expériences) ne présentant quasiment aucune perte aux fréquences micro-ondes, ces résonateurs ont un facteur de qualité très élevé (105 ou plus).

Détection à température ambiante

Le signal des spins, une fois recueilli par le résonateur, doit être amplifié avant de parvenir à l'électronique de détection à température ambiante. De manière générale, le processus d'amplification surajoute du bruit, ce qui réduit d'autant la sensibilité du spectromètre. Là encore, nous utilisons un outil fourni par les circuits supraconducteurs : l'amplificateur paramétrique Josephson (JPA). Il s'agit d'un amplificateur micro-onde à base de matériau supraconducteur et de jonctions Josephson, fonctionnant à très basse température (10mK), et ajoutant aussi peu de bruit au signal d'entrée que le permet la mécanique quantique.

→ Prototype de réfrigérateur à dilution portant à 30 mK des expériences d'électrodynamique quantique et de circuits quantiques supraconducteurs.

© P.Stroppa / CEA

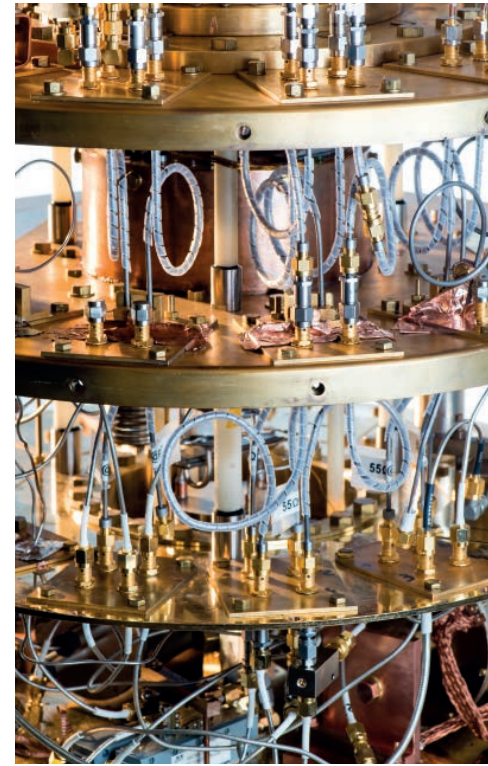
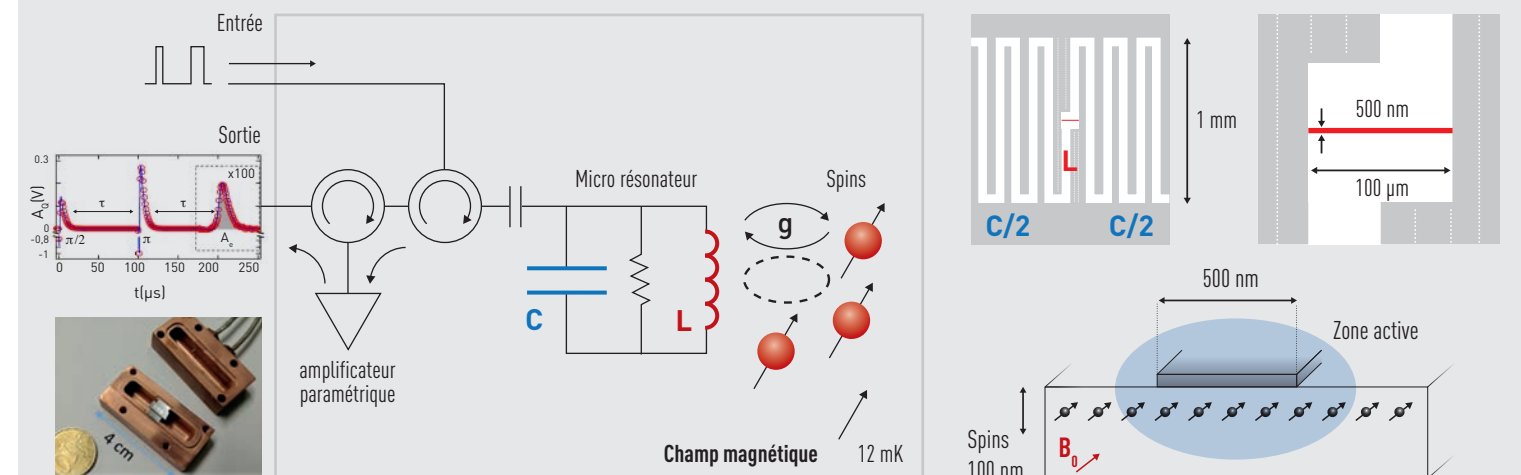


Fig. 1 : à gauche, le schéma du spectromètre de résonance magnétique quantique. Le cœur est un micro-résonateur LC de fréquence ω_o couplé aux spins avec une constante de couplage g . Des séquences de deux impulsions micro-ondes à ω_o séparées par un délai τ sont envoyées vers le résonateur afin de piloter les spins et de générer l'émission d'un écho au temps 2τ . Après amplification par un amplificateur paramétrique supraconducteur, le signal micro-onde est détecté. Un signal typique d'écho de spins est montré sur la figure.

À droite, le schéma du résonateur. Le fil inductif qui définit la « zone active » du résonateur a une largeur de 500nm pour une longueur de 100 μm . Il est placé juste au-dessus des spins. Pour les mesures, l'échantillon est placé dans un porte-échantillon en cuivre connecté à des câbles de mesure (voir photo à gauche).



65 spins en 1 seconde

Grâce à la polarisation complète des spins, au micro-résonateur supraconducteur utilisé pour les détecter, et au très faible niveau de bruit obtenu, on attend une sensibilité record. Dans l'expérience, les spins sont situés sous la surface d'un substrat de silicium, sur laquelle le résonateur a été fabriqué. Il s'agit d'atomes de Bismuth implantés à une profondeur de 100nm (Fig. 1), qui piègent un électron dont le spin est à détecter. Les spins sont excités à la fréquence ω_0 par une série de deux impulsions micro-ondes séparées par une durée τ , ce qui les amène à émettre un signal (appelé écho de spin) après un délai τ supplémentaire. En quantifiant le rapport signal-à-bruit de l'écho de spin mesuré, on démontre que le spectromètre est capable de détecter quelques 65 spins en 1 seconde, ce qui constitue une amélioration de la sensibilité de cinq ordres de grandeur par rapport à l'état de l'art [1 et 2].

Nous avons également amélioré la sensibilité en utilisant un effet purement quantique - la compression quantique, qui, remarquablement, est aussi très prometteur pour la détection d'ondes gravitationnelles ! Si le principe d'incertitude de Heisenberg

limite l'incertitude combinée de deux variables dites conjuguées, il n'interdit pas de fabriquer des états dans lesquels l'incertitude d'une variable est réduite aux dépens de l'autre. Ces états comprimés fournissent une méthode pour effectuer des mesures qui vont au-delà de la limite des fluctuations quantiques du vide. Dans notre expérience un amplificateur paramétrique Josephson génère un état comprimé du champ micro-onde qui est ensuite envoyé à l'entrée du spectromètre. Dans cet état, les fluctuations - qui sont en phase avec le signal émis par les spins électroniques que nous cherchons à détecter - sont réduites alors que le bruit en quadrature de phase est, lui, amplifié. Du coup, le rapport signal-à-bruit de la mesure des spins est amélioré de 1,2 dB [3].

Phénomènes qualitativement nouveaux

En couplant les spins et les circuits supraconducteurs, on n'améliore pas uniquement la sensibilité de détection ; on accède également à des phénomènes physiques qualitativement nouveaux où la dynamique des spins est modifiée par l'interaction avec le résonateur. La relaxation de spin en est un

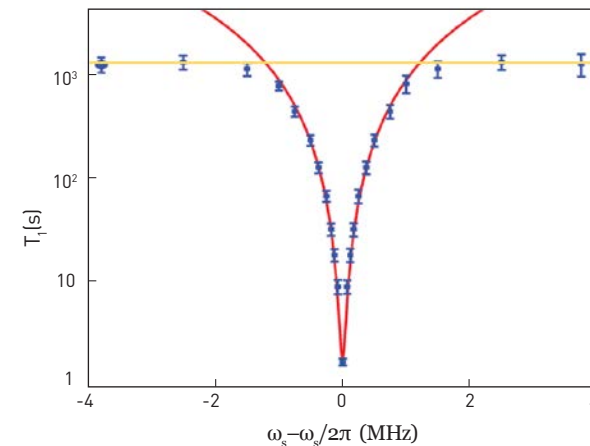


Fig. 2 : le temps de relaxation T_1 ainsi mesuré est représenté en fonction du désaccord $\omega_s - \omega_0$ (points bleus). La courbe rouge est la courbe théorique de l'effet Purcell de spins, sans paramètre ajustable. La courbe jaune indique une contribution non-radiative à la relaxation, qui prend le dessus lorsque le désaccord est très grand.

« Grâce à la polarisation complète des spins, au micro-résonateur supraconducteur utilisé pour les détecter, et au très faible niveau de bruit obtenu, on attend une sensibilité record. »

bon exemple. Après une séquence d'impulsions micro-ondes, les spins reviennent à l'équilibre thermique en un temps appelé « temps de relaxation » T_1 , en échangeant de l'énergie avec leur environnement. Dans les expériences usuelles de résonance magnétique, cet échange se fait par l'intermédiaire de vibrations du réseau cristallin (phonons) ou par interaction avec d'autres spins dans l'environnement. L'émission de photons micro-ondes se produit avec un taux extrêmement faible correspondant à un temps de relaxation d'environ dix mille ans.

Relaxation par effet Purcell

En revanche, cette émission radiative est fortement exaltée lorsque le spin est couplé à résonance avec un résonateur micro-onde (Fig. 2). Cet effet, prédit par Edwin Purcell en 1946, n'avait été observé jusqu'à nos expériences qu'avec des atomes ou des

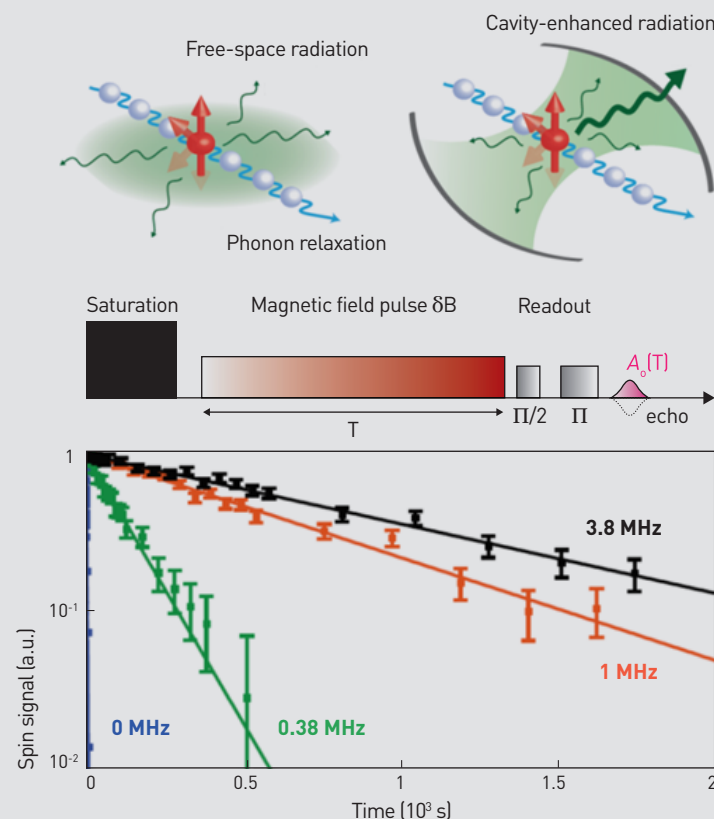
nanostructures semi-conductrices. Nous avons pu démontrer que, dans nos expériences, la relaxation par effet Purcell est le mécanisme dominant de relaxation de spin (Fig. 2). La relaxation du signal d'écho de spin y est mesurée en fonction du temps d'attente, pour différentes valeurs du désaccord en fréquence $\omega_s - \omega_0$ entre les spins et le résonateur. Par un ajustement exponentiel de chaque courbe, on obtient une mesure du temps de relaxation T_1 en fonction de $\omega_s - \omega_0$. On note que T_1 dépend fortement du désaccord, augmentant de 3 ordres de grandeur lorsque les spins sont désaccordés de quelques MHz. La figure 2 montre également la prédiction théorique de l'effet Purcell (courbe rouge), sans aucun paramètre ajustable. L'accord est remarquable jusqu'à des désaccords de quelques MHz, après quoi le temps de relaxation sature du fait d'un autre processus non-radiatif prenant le dessus (courbe jaune). ■

Conclusion

Ainsi peut-on amener la résonance magnétique dans le régime quantique grâce aux techniques des circuits supraconducteurs. Ces techniques nous ont permis d'améliorer considérablement la sensibilité de détection des spins d'une part, et de démontrer d'autre part que la relaxation des spins peut être induite rapidement par effet Purcell [4]. Une perspective fascinante est d'atteindre une sensibilité suffisante pour détecter des spins individuels avec des photons micro-ondes, ce qui ouvrira notamment la voie à une nouvelle architecture pour l'ordinateur quantique, basée sur des spins individuels interfacés par des circuits supraconducteurs.

Fig. 2 : le principe de l'effet Purcell de spin.

Le retour à l'équilibre thermique d'un spin se fait par échange d'énergie avec l'environnement. Habituellement, le processus dominant est la relaxation par émission d'un phonon dans le cristal. Négligeable dans l'espace libre, l'émission spontanée d'un photon micro-onde peut devenir au contraire importante si le spin est fortement couplé à une cavité résonante : c'est l'effet Purcell de spin. La manifestation de cet effet est que le temps de relaxation T_1 des spins doit être plus court lorsque les spins sont accordés à résonance avec la cavité. Nous avons mesuré T_1 avec la séquence décrite sur le panneau de gauche : les spins sont d'abord excités par une impulsion micro-onde « saturante » ; après quoi ils sont désaccordés de la cavité par une quantité $\omega_s - \omega_0$ contrôlée par l'amplitude d'une impulsion appliquée sur le champ magnétique. Après avoir été mis à nouveau à résonance, l'amplitude de l'écho de spin est mesurée en fonction du temps T pendant lequel ils ont été désaccordés. A résonance, la relaxation se fait en quelques secondes alors qu'elle est de l'ordre de 1000 secondes lorsque les spins sont désaccordés de quelques MHz.



- [1] Reaching the quantum limit of sensitivity in electron spin resonance A. Bienfait, J. J. Pla, Y. Kubo, M. Stern, X. Zhou, C. C. Lo, C. D. Weis, T. Schenkel, M.L.W. Thewalt, D. Vion, D. Esteve, B. Julsgaard, K. Moelmer, J.J.L. Morton, P. Bertet, Nature Nanotechnology 11, 253 (2016).
- [2] Inductive-detection electron-spin resonance spectroscopy with 65 spins/VHz sensitivity S. Probst, A. Bienfait, P. Campagne-Ibarcq, J.J. Pla, B. Albanese, J.F. Da Silva Barbosa, T. Schenkel, D. Vion, D. Esteve, K. Moelmer, J.J.L. Morton, R. Heeres, P. Bertet, Appl. Phys. Lett. 111, 202604 (2017).
- [3] Magnetic Resonance with Squeezed Microwaves A. Bienfait, P. Campagne-Ibarcq, A.H. Kiielerich, X. Zhou, S. Probst, J. J. Pla, T. Schenkel, D. Vion, D. Esteve, J.J.L. Morton, K. Moelmer, P. Bertet, Phys. Rev. X 7, 041011 (2017).
- [4] Controlling Spin Relaxation with a Cavity, A. Bienfait, J.J. Pla, Y. Kubo, X. Zhou, M. Stern, C.C. Lo, C.D. Weis, T. Schenkel, D. Vion, D. Esteve, J.J.L. Morton, and P. Bertet, Nature 531, 74 (2016). See arxiv 1508.06148. See also Article by Johanna Müller in Physics Today.

LE QUBIT

Abréviation de bit quantique, c'est l'état quantique qui représente la plus petite unité d'information quantique. C'est l'équivalent quantique du bit classique. Comme le bit classique, le qubit possède deux états fondamentaux notés par les étiquettes $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Alors que le bit classique ne peut exister que dans un seul de ses états de base 0 ou 1, un qubit peut exister dans une superposition quelconque de ses états fondamentaux $|0\rangle$ et $|1\rangle$ simultanément. **C'est la superposition quantique.**

- CONTRIBUTEURS

(Direction de la recherche fondamentale)



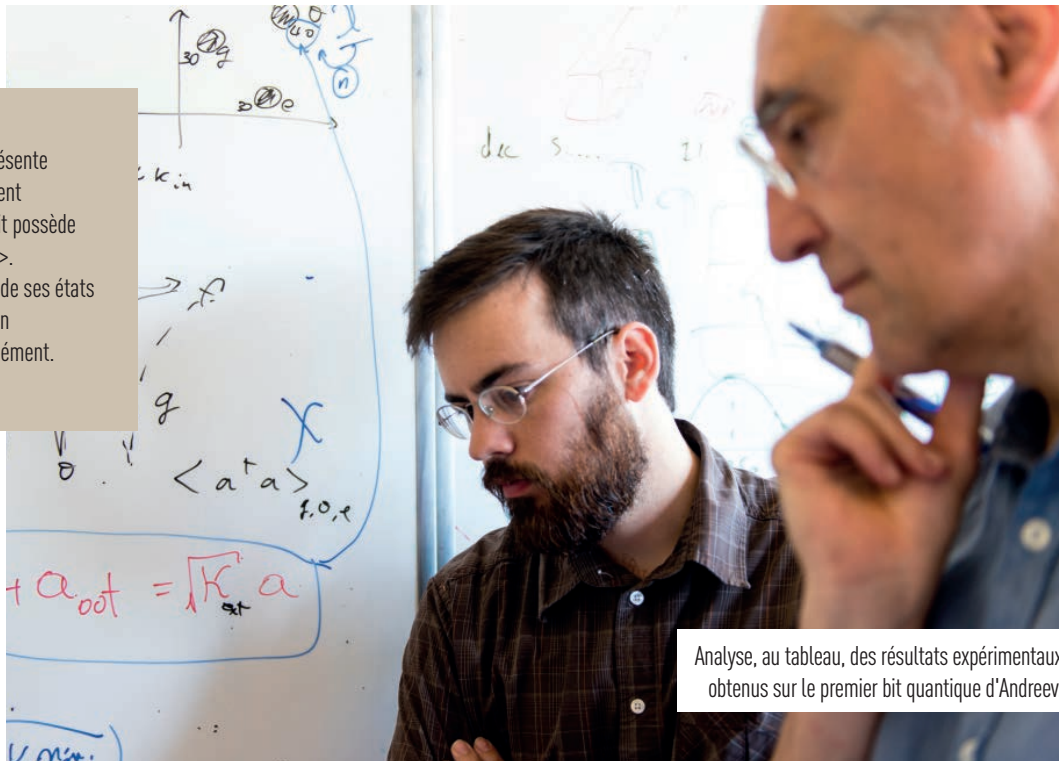
Daniel Estève est directeur de recherche et chef du groupe Quantronique dans le Service de physique de l'état condensé (Institut rayonnement-matière de Saclay) au CEA.



Patrice Bertet est chercheur dans le groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (Institut rayonnement-matière de Saclay) au CEA.



Denis Vion est chercheur dans le groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (Institut rayonnement-matière de Saclay) au CEA.



© PStroppa/CEA

ENJEUX ET PERSPECTIVES

Les voies du calcul quantique

Si on ne dispose pas encore d'une véritable technologie d'ordinateur quantique, de nombreuses voies sont explorées aujourd'hui. Et malgré les difficultés, la recherche est plus active que jamais.

De l'intrication quantique aux processeurs quantiques

Peu après la démonstration expérimentale de l'intrication de paires de photons (1982), le concept d'intrication est passé du statut de phénomène quantique étrange à celui de ressource utile. En se demandant en 1985 si un ordinateur exploitant la physique quantique pourrait battre les ordinateurs classiques, David Deutsch montra sur un problème élémentaire de classification comment la manipulation d'un registre de qubits permettait d'effectuer cette tâche plus efficacement qu'un algorithme classique. Mais

c'est l'invention par Peter Shor (1994) d'un algorithme quantique de factorisation des nombres exponentiellement plus rapide que les algorithmes classiques connus qui déclencha une course aux systèmes physiques permettant de traiter l'information quantique. Le principe de fonctionnement d'un ordinateur quantique manipulant un registre de qubits est schématisé sur la Figure 1. Les critères à satisfaire pour son bon fonctionnement sont ceux de DiVincenzo du nom du physicien qui les explicita. Ils sont assez difficiles à satisfaire tous ensemble et peu de réalisations s'approchent réellement d'un ordinateur quantique, même très rudimentaire.

Le problème de la cohérence quantique

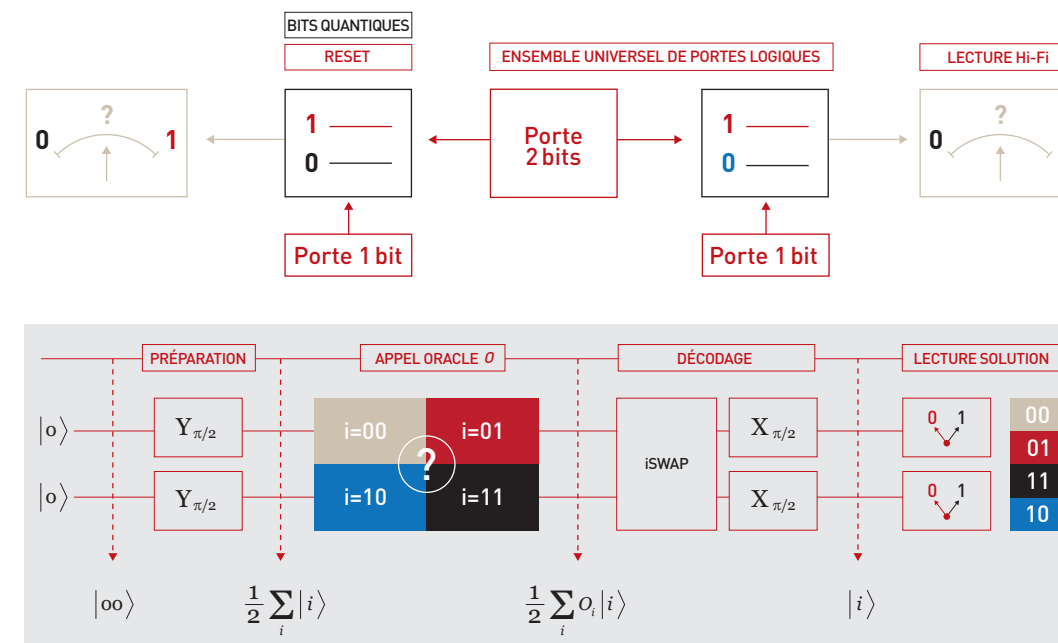
Le maintien de la cohérence quantique durant toute la réalisation d'un algorithme est le critère le plus difficile à passer lorsque le nombre de qubits intriqués augmente. Chaque bit quantique étant caractérisé par un temps de cohérence, celui d'un état intriqué de N bits est environ N fois plus court. Il faut donc impérativement limiter au maximum les processus de décohérence qui résultent du couplage des qubits à leur environnement. Mais cet environnement est indispensable pour pouvoir leur appliquer des portes logiques et en effectuer la lecture ! Il faut donc en pratique corriger activement les erreurs résiduelles.

Un processeur quantique fonctionnel nécessitant au moins une centaine de qubits logiques (c'est-à-dire idéaux) pour résoudre un problème d'intérêt, la correction quantique d'erreur semble indispensable pour les obtenir. La correction classique d'erreur est basée sur la redondance. On effectue une copie partielle de l'information en ajoutant par exemple des bits de parité pour détecter une erreur sur un petit nombre de bits et la corriger. La copie d'un état quantique étant impossible sans la détruire, la correction quantique d'erreur est bien plus délicate. Si on disposait de qubits physiques quasi parfaits, la correction ne nécessiterait qu'une dizaine de qubits physiques par bit quantique logique. Mais les qubits existants exigent une architecture bien plus tolérante aux fautes. La seule connue, appelée « code de surface », est inspirée des travaux du physicien russo-américain Kitaev et demande un très grand nombre de qubits

physiques par qubit logique, estimé à au moins dix mille pour les plateformes actuelles. Voyons maintenant le statut des solutions tentées pour résoudre ou contourner la difficulté.

La recherche sur les qubits s'est d'abord naturellement portée sur des systèmes au comportement quantique avéré, comme les atomes et les ions, bien que ces systèmes microscopiques soient difficiles à contrôler individuellement et à coupler. Elle s'est également intéressée ensuite à des systèmes plus contrôlables, comme des circuits électriques, qui, eux, n'opèrent en général pas en régime quantique. Le CEA est actuellement positionné sur ces deux voies.

La plateforme à base d'ions piégés est la plus avancée à ce jour. Elle utilise jusqu'à une vingtaine d'ions maintenus dans un piège à une ou deux dimensions. Les qubits sont formés avec deux états électroniques des ions, et sont manipulés avec des impulsions optiques résonnantes. Les portes logiques à deux qubits utilisent le couplage des transitions optiques au mode collectif de déplacement des ions dans le piège. Les caractéristiques de cette plateforme sont une très bonne cohérence quantique, et des portes logiques d'une très grande fidélité mais assez lentes. Des états intriqués à une vingtaine de qubits ont été testés, et c'est le record actuel. Des processeurs de quelques dizaines de qubits sont prévus, ce qui pourrait déjà permettre de réaliser certaines tâches plus efficacement qu'un ordinateur classique. Quelques petites entreprises adossées à de grands centres de recherche (comme l'université d'Innsbruck en Europe) se sont lancées dans l'aventure. Mais une intégration à très grande échelle semble difficile.



« Il faut impérativement limiter au maximum les processus de décohérence qui résultent du couplage des qubits à leur environnement. Mais cet environnement est indispensable pour pouvoir leur appliquer des portes logiques et en effectuer la lecture ! Il faut donc en pratique corriger activement les erreurs résiduelles. »

Fig. 1 : haut : schéma de principe d'un ordinateur quantique. Un registre de qubits (systèmes à deux niveaux quantiques) est muni d'un ensemble de portes logiques quantiques permettant de réaliser toutes les évolutions possibles. Chaque bit quantique peut être lu avec fidélité. La probabilité d'obtenir un résultat 0 ou 1 correspond au poids de l'état du registre avec cette valeur sur le bit mesuré.

Bas : exemple élémentaire d'algorithme quantique : l'algorithme de recherche de Grover sur quatre objets. Un opérateur marquant un état de base particulier du registre doit être trouvé. Partant du registre dans l'état $|00\rangle$, on applique des portes à un bit quantique qui le place dans la superposition de tous les états de base du registre. On applique ensuite l'opérateur O à découvrir, puis le décodage qui fournit l'état marqué par l'oracle, que la lecture finale donne. Le dispositif réalisé en 2012 au SPEC, malgré un taux de succès limité par la décohérence et les erreurs de lecture à 60%, démontra l'accélération quantique de l'algorithme de Grover par rapport à un algorithme classique qui demanderait au moins deux appels de la fonction de discrimination.

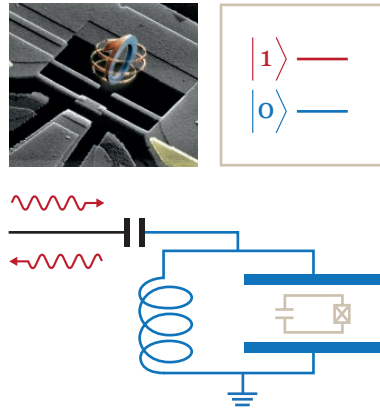


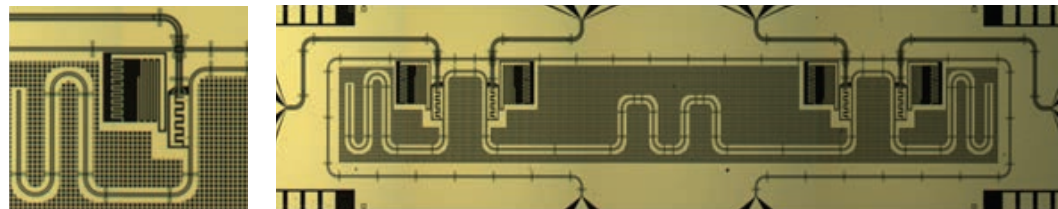
Fig. 2 : haut : version quantrium de la boîte à paires de Cooper développée au CEA en 2002. Ce dispositif supraconducteur a permis de reproduire avec un circuit électrique les expériences fondatrices de la physique quantique. Le bit quantique est formé par les deux états de plus basse énergie, bâtis à partir de deux états de charge différant par une paire de Cooper de l'île de la boîte, située en vis-à-vis de la grille de contrôle visible en bas à gauche. Cette île, connectée par deux petites jonctions Josephson en parallèle à une électrode commune, a une capacité très faible (fF). Le bit quantique est manipulé en appliquant un signal micro-onde résonnant à l'électrode de grille.

Bas : version transmon de la boîte à paires de Cooper actuellement utilisée dans les processeurs quantiques supraconducteurs. Une jonction Josephson (croix) connectée à une capacité bien plus importante constitue un oscillateur anharmonique dont les deux niveaux de plus basse énergie forment le bit quantique. Cet oscillateur est couplé à un résonateur micro-onde dont la fréquence de résonance assez différente dépend de l'état du bit quantique, ce qui en permet la mesure par réflectométrie micro-onde.

Les qubits supraconducteurs à base de jonctions Josephson sont à ce jour les qubits électriques les plus avancés. L'équipe Quantronique du Service de physique de l'état condensé au CEA-Saclay, qui avait démontré le comportement quantique d'une jonction Josephson (une mince barrière tunnel entre deux électrodes supraconductrices) couplée à un résonateur, proposa, en 1996, le circuit supraconducteur dit de la boîte à paires de Cooper pour réaliser un bit quantique (voir fig. 2). Une équipe de NEC au Japon y parvint la première en 1999, puis l'équipe du CEA démontra, en 2002, le premier bit quantique électrique fonctionnel et réalisa sur cet objet unique toutes les manipulations quantiques fondamentales. La boîte à paires de Cooper est toujours le bit quantique supraconducteur le plus utilisé mais dans la version optimisée « transmon » développée à l'université de Yale en 2006. Le couplage de la boîte à une cavité micro-onde dans laquelle on la place permet la mesure du qubit via le petit changement de fréquence de cette cavité dépendant de l'état du qubit. L'analogie entre ce système et l'électrodynamique quantique en cavité développée par l'équipe de Serge Haroche à l'École normale supérieure a donné son nom au domaine, l'électrodynamique quantique des circuits (circuit QED). L'équipe du CEA démontra, en 2009, la lecture haute-fidélité en un coup du transmon, puis

réalisa, en 2012, un processeur élémentaire à deux qubits, soit quatre états de base. Ce processeur rudimentaire mit en œuvre un véritable algorithme quantique, l'algorithme de recherche de Grover d'un objet dans une base en ne disposant que d'une fonction de discrimination. Pour quatre objets, cet algorithme trouve idéalement la solution en un seul appel de cette fonction, ce qui démontre l'accélération quantique par rapport à un algorithme classique. Le dispositif testé, bien qu'imparfait, la prouva. Depuis, des circuits plus complexes ont été fabriqués (voir fig. 3) et des protocoles quantiques plus évolués ont été démontrés. Les circuits avec une vingtaine de qubits développés par Google, IBM ou Rigetti Computing, qui ne sont toutefois pas munis de portes logiques entre tous les qubits, n'ont pas démontré d'algorithme quantique résolvant un problème difficile. Les annonces très récentes d'IBM et Google de circuits supraconducteurs à 50 à 70 qubits visent à préparer la correction quantique d'erreur sur un qubit unique, mais aussi à prouver, sur un problème spécifique, la « quantum supremacy » de l'ordinateur quantique sur l'ordinateur classique. Cette architecture à base de transmons n'est toutefois pas encore assez intégrable pour obtenir des circuits avec un nombre suffisant de qubits logiques pour aborder un problème intéressant.

Fig. 3 : processeurs quantiques supraconducteurs

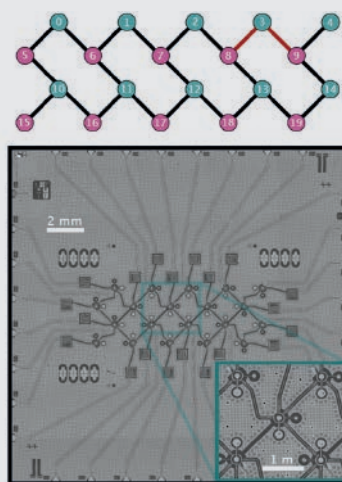


Processeur à quatre transmons (CEA, 2014).

La ligne (connectée en bas) réalise la lecture multiplexée des qubits par couplage à des résonateurs non-linéaires individuels. Un résonateur couplé à tous les qubits permet de réaliser des portes logiques entre tous les qubits. Le zoom à gauche montre un bloc bit quantique-résonateur non-linéaire de lecture.



Processeur à 19 transmons (Rigetti 19Q, déc. 2017)
avec résonateurs de lecture individuels.
Le schéma au-dessus indique les bits couplés.



Les qubits semi-conducteurs : une architecture très intégrable

Les nanostructures semi-conductrices ont atteint depuis longtemps un régime où un tout petit nombre d'électrons (ou de trous) est contrôlé dans de petits îlots découpés dans des gaz électroniques bidimensionnels ou bien dans des nanofils. Les premiers résultats avec ces « gaz 2D » dans des hétérostructures d'arséniure de gallium ont été décevants en raison de la décohérence due au bruit magnétique des spins nucléaires du matériau. Plus récemment, la réalisation d'îlots dans du silicium contenant peu de spins nucléaires, et même purifié isotopiquement pour s'en débarrasser complètement, a ouvert la voie à des qubits de spin avec une excellente cohérence quantique potentielle. Le bit quantique de spin d'un trou dans l'îlot d'un transistor CMOS réalisé au CEA Grenoble en 2016 (voir p. 36) a montré qu'un bit quantique, donc potentiellement un très grand nombre, peut sortir d'une ligne de fabrication industrielle. La capacité d'intégration de cette technologie CMOS en fait une plateforme de choix pour implémenter les codes de surface. Depuis, QuTech à Delft a fait fonctionner un petit processeur à deux qubits réalisé dans un gaz 2D silicium, une technologie plus simple mais aussi moins intégrable. La course à l'intégration est donc lancée pour les qubits semi-conducteurs, mais il faut au préalable mettre au point des briques de base, portes logiques et lecture, compatibles avec l'intégration.



© D. Guillaudin/CEA



© P. Stropia / CEA

Fabrication de bits quantiques supraconducteurs dans une machine d'évaporation aluminium : mise en place de la galette de saphir servant de support aux circuits.

Une stratégie alternative : la réalisation de qubits robustes

Pour échapper à la complexité des codes de surface, une voie différente serait de disposer de qubits avec une bien meilleure cohérence. Cela rendrait la correction d'erreur plus facile, et de petits processeurs sans correction d'erreur utilisables. A Yale, Michel Devoret et Robert Schoelkopf mettent en place une architecture proposée par Mazhar Mirrahimi d'Inria : des qubits à base d'états intriqués d'un résonateur micro-onde de très grand facteur de qualité, dont le seul mode de décohérence est la perte détectable d'un photon. En outre, la cohérence de ces qubits peut être maintenue de façon active en pompant subtilement le système pour qu'il s'autocorrige en continu. Leur cohérence est en voie de dépasser celle déjà excellente du résonateur de départ, et de rapprocher l'équipe de Yale du bit quantique éternel. Une porte logique à deux qubits a même été réalisée mais ces qubits originaux sont toutefois très complexes à utiliser.

L'équipe Quantronique du CEA suit une voie différente basée sur des niveaux de spin électronucléaires d'impuretés chargées, implantées dans un cristal isolant comme le diamant ou le silicium. La cohérence quantique de ces impuretés peut atteindre des heures et la difficulté est de les contrôler, les manipuler et les coupler. Ces recherches pour obtenir de qubits plus robustes sont soutenues par une chaire industrielle ANR dont le partenaire est Atos (voir p. 43). Elles concernent actuellement le contrôle d'un tout petit nombre de spins électroniques couplés à un résonateur supraconducteur de grand facteur de qualité. Les résultats préliminaires en résonance paramagnétique électronique sont décrits dans ce numéro en page 28. ■



« Le bit quantique de spin d'un trou dans l'îlot d'un transistor CMOS réalisé au CEA Grenoble en 2016 a montré qu'un bit quantique, donc potentiellement un très grand nombre, peut sortir d'une ligne de fabrication industrielle. »

Conclusion

Si on ne dispose pas encore d'une véritable technologie d'ordinateur quantique, de nombreuses voies sont néanmoins explorées aujourd'hui. Toutes sont confrontées à des difficultés sans solution viable. Mais comme l'histoire a montré que des verrous considérés comme infranchissables finissaient par être levés, la recherche est plus active que jamais. Au niveau européen, cette recherche va être largement poussée par le flagship sur les technologies quantiques. Le CEA est impliqué dans le domaine des architectures tolérantes aux fautes à base de qubits en technologie CMOS silicium, et dans la mise au point de qubits de grande robustesse.

•
CONTRIBUTEURS
(Direction de la recherche technologique,
Direction de la recherche fondamentale)



Maud Vinet est chef du Laboratoire d'intégration des composants pour la logique (Département composants silicium) au CEA/Leti.

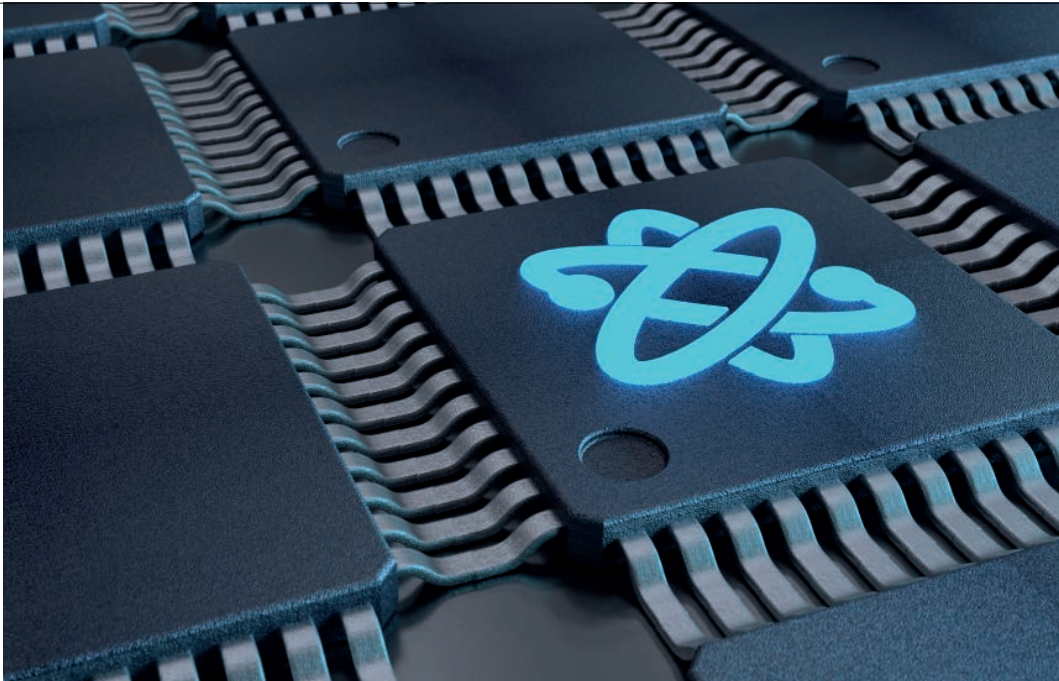


Marc Sanquer est chef du Laboratoire de transport électronique quantique et supraconductivité (Institut nanosciences et cryogénie) au CEA.



Silvano de Franceschi est chercheur au Laboratoire de transport électronique quantique et supraconductivité (Institut nanosciences et cryogénie) au CEA.

[1] soit $V=ne/C=1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 19 \cdot C \cdot 10^4/10^{-15} \text{ F}$ de l'ordre de quelques 0.16V
[2] Uhlenbeck & Goudsmit, Nature 1926,117,264
[3] S.A. Goudsmit. La découverte du spin de l'électron. Journal de Physique, 1967, 28 (1), pp.123-128



APPLICATIONS

À la recherche du qubit intégrable

Des équipes du CEA travaillent à transformer le dispositif emblématique de la technologie silicium - le transistor à effet de champ - en un bit quantique potentiellement intégrable à grande échelle.

La manipulation et la mesure d'un spin électronique unique dans un transistor à effet de champ est une découverte étonnante qui ouvre la possibilité de construire un processeur quantique à base des composants universellement utilisés pour les processeurs classiques. Ce résultat, qui tire ses racines de plusieurs champs de la science et de la technologie (purification isotopique, technologies CMOS, mécanique quantique des circuits électroniques...), constitue une prouesse et ouvre bien des perspectives.

Les bases du qubit de spin silicium

Toute information est stockée et manipulée sur un support physique. Dans les processeurs classiques, l'information est codée par une tension d'environ 1V (ou 0V) produite par quelques dizaines de milliers d'électrons accumulés sur des capacités de l'ordre

du femto Farad (y compris les capacités parasites des interconnexions)[1]. Les petites capacités sont celles des grilles de contrôle de nos transistors à effet de champ, le composant emblématique de nos processeurs.

La charge de l'électron est donc la base de notre électronique, mais l'électron possède un autre attribut, son spin. Postulé il y a environ cent ans[2], les découvreurs racontent [3] combien il leur a fallu d'inconscience pour postuler cette propriété quantique des électrons, car elle n'a pas d'analogie classique.

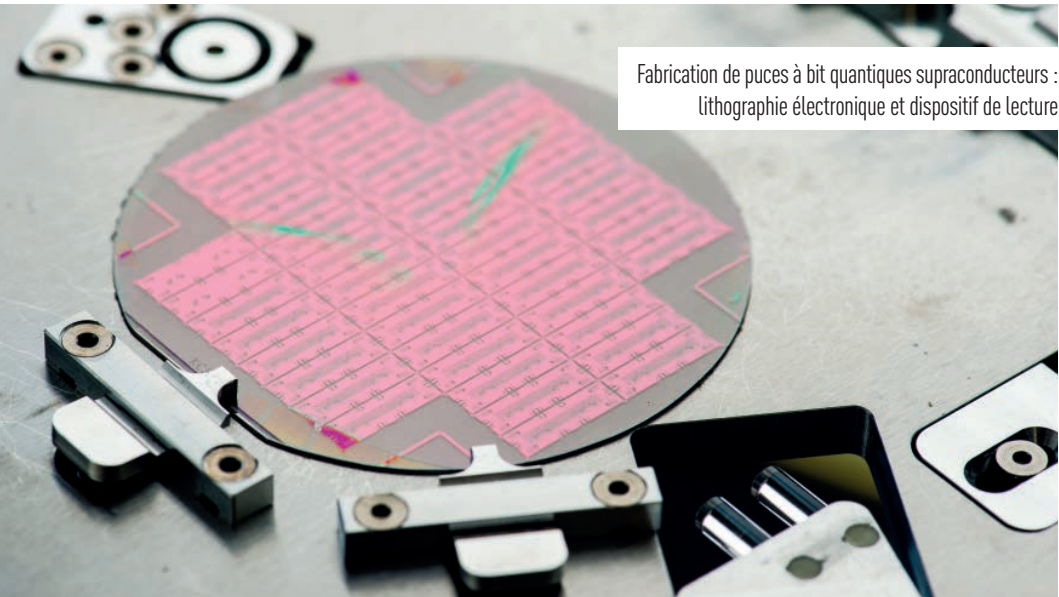
Manipuler des grands ensembles de spins - la variable oubliée de l'électronique - est le domaine de la spintronique, une discipline en plein essor. On peut aussi naturellement imaginer de coder une information sur le spin d'un électron unique. On conçoit qu'il s'agit d'un codage ultime en coût énergétique et même potentiellement un codage quantique, car il implique l'attribut quantique d'une seule particule élémentaire.

Aussi ambitieux que ce codage puisse paraître, c'est pourtant ce qui a été conçu et réalisé.

Cette réalisation repose sur l'observation que, dans nos transistors les plus petits, le nombre moyen d'électrons dans le canal du transistor peut atteindre l'unité. Le canal du transistor est un fil conducteur qui s'ouvre ou se ferme suivant la charge accumulée sur la grille de contrôle (l'« information »). À température ambiante il n'est pas possible de définir précisément ce nombre d'électrons car il fluctue continuellement. Cette fluctuation temporelle est nécessaire pour qu'un courant circule dans le fil (et charge éventuellement la capacité de grille d'un autre transistor en aval, permettant ainsi de propager l'« information » d'une grille à l'autre dans le processeur).

Mais à basse température, quand l'énergie thermique $k_B T$ (k_B étant la constante de Boltzmann) est inférieure à l'énergie e^2/C , où C est la capacité du canal du transistor (d'autant plus petite que le canal est petit, elle peut atteindre quelques dizaines d'attoFarad), le nombre d'électrons dans le canal se fige. Il est alors possible de contrôler un par un les électrons dans le canal.

Le CEA a été pionnier dans cette découverte. En effet, en 2003, pour la première fois, le contrôle d'électron un par un a été obtenu de façon contrôlée dans un canal d'un transistor MOS [4]. Ce contrôle avait été obtenu précédemment par plusieurs groupes (y compris le CEA) dans des transistors silicium rudimentaires et/ou de façon stochastique. On peut alors imaginer coder l'information sur le nombre d'électrons dans le canal d'un nano-transistor à basse température. Ce bit quantique de charge a effectivement été proposé et même réalisé sur ce principe [5]. Malheureusement ce bit quantique de charge, qui suppose des transferts cohérents d'électrons entre plusieurs sites, n'est pas assez stable.



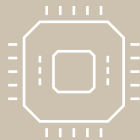
Fabrication de puces à bit quantiques supraconducteurs : lithographie électronique et dispositif de lecture

© P.Stroopa / CEA

Il vient alors l'idée d'utiliser un électron fixé sur un site et de coder l'information sur son spin, qui peut prendre deux valeurs selon un axe donné par un champ magnétique. Ce concept avait été étudié avec succès dans des boîtes quantiques à base d'arséniure de gallium. Ces boîtes présentent l'intérêt que le désordre y est moins fort que dans les canaux des transistors à base de silicium. Malheureusement, les atomes d'arsenic et de gallium portent des spins nucléaires. Ces spins nucléaires fluctuent et interagissent avec le spin de l'électron, ce qui perturbe le bit quantique de spin. Au contraire, le silicium est un atome qui ne porte pas de spin nucléaire, à l'exception de son isotope minoritaire ²⁹Si (présent à 4,7% dans le silicium naturel). En outre, il peut être purifié pour éliminer cet isotope gênant pour les spins électroniques.

Le CEA a réussi récemment à produire des couches de silicium sur des galettes de diamètre 300mm avec une concentration en ²⁹Si inférieure à 0,006 %. Des mesures macroscopiques sur de très grands ensembles de spins ont montré que le temps de relaxation de spin dans le ²⁸Si est très long à basse température [6]. Le spin de l'électron, dans un cristal de ²⁸Si, voit donc autour de lui un « vide de spin ».

Sur ces bases, le bit quantique de spin silicium s'est développé en deux temps : en 2012, les premiers bits quantiques de spin silicium ont été publiés en Australie [7] et aux USA [8]. Puis en 2014, une équipe de Sydney a montré des bits quantiques de spin à très long temps de cohérence dans le silicium isotopiquement enrichi à 99.92% en ²⁸Si [9]. La même année deux bits quantiques couplés dans le même silicium ²⁸Si sont obtenus par le même groupe australien [10]. Ces publications marquent le renouveau de l'intérêt porté pour le bit quantique de spin en silicium au niveau mondial, à l'image d'INTEL qui annonce en 2015 son engagement dans cette voie.

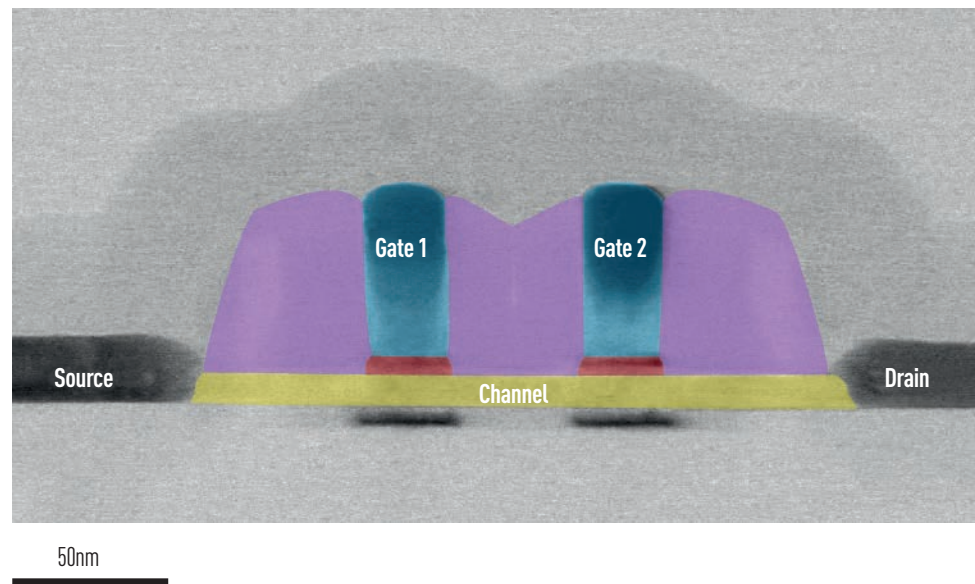


« Le CEA a réussi récemment à produire des couches de silicium sur des galettes de diamètre 300 mm avec une concentration en ²⁹Si inférieure à 0.006 %. »

[4] F. Bœuf, T. Skotnicki, X. Jehl and M. Sanquer "Controlled single-electron effects in non-overlapped ultra short silicon field effect transistor", IEEE transactions on Nanotechnology, vol2, No3, p144 (2003).
[5] quantum cellular automaton Shi, Z. et al. Coherent quantum oscillations and echo measurements of a si charge qubit. Phys. Rev. B 88, 075416 (2013)
[6] Witzel, W. M., Carroll, M. S., Morello, A., Cywin 'ski, Ł. & Das Sarma, S. Electron spin decoherence in isotope-enriched silicon. Phys. Rev. Lett. 105, 187602 (2010)
[7] Pla, J. J. et al. A single-atom electron spin qubit in silicon. Nature 489, 541/545 (2012)
[8] Maune, B. M. et al. Coherent singlet-triplet oscillations in a silicon-based double quantum dot. Nature 481, 344–347 (2012)
[9] Muhonen, J.T. et al. Storing quantum information for 30 seconds in a nanoelectronic device. Nature Nanotechnology doi:10.1038/nnano.2014.211 (2014) ; Veldhorst, M. et al. An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant fidelity, Nature Nanotechnology doi:10.1038/nnano.2014.216 (2014).
[10] M. Veldhorst et al., Nature 526, 410–414 (2015)



Fig. 1 : le bit quantique de spin en technologie CMOS, image en coupe par microscopie électronique colorisée [d'après Maurand16]. Le canal silicium du transistor est en jaune. Les deux grilles sont en bleu. Les contacts source et drain en silicium épaissi et fortement dopés en accepteurs sont en gris foncé. Les zones rouges représentent les oxydes de grille : en coupe, ils enserrant le fil de silicium jaune sur trois faces et on distingue leur présence en gris foncé « sous » le fil, en fait en arrière de celui-ci. Les zones violettes sont les espaceurs en nitrure de silicium destinés à éloigner la source et le drain fortement dopés des zones du canal sous et entre les grilles. Le fond gris-clair représente l'oxyde de silicium qui encapsule le dispositif.



Le bit quantique CMOS du CEA

Plusieurs options se présentent pour le bit quantique de spin sur silicium : on peut confiner les électrons à l'interface entre le silicium et son oxyde, comme dans la technologie CMOS, ou autour de dopants, ou bien à une interface enterrée entre le silicium et le germanium. Dans le premier cas, on peut utiliser un cristal de silicium massif ou bien une fine couche de silicium cristallin sur un isolant, etc. Chaque option présente avantages et inconvénients et il n'est pas évident que le transistor à effet de champ CMOS - optimisé pour un fonctionnement optimal à température ambiante - puisse, même au prix d'adaptations, devenir un bon bit quantique. C'est pourtant cette approche que nous avons choisie à Grenoble.

Rappelons ici que le transistor à effet de champ CMOS est un objet remarquable qui commute en moins d'une picoseconde, à un coût énergétique extrêmement faible, quelques dizaines d'attoJoule à température ambiante. Notre pari est que la technologie du transistor -non son principe- peut être adaptée et donc extrêmement utile pour développer le bit quantique. On part donc de cette technologie plutôt que d'une page blanche.

En 2016, le CEA a produit le premier bit quantique à base de technologie CMOS [11]. Il s'agit d'un tran-

sistor à effet de champ basé sur la technologie grenobloise du FD-SOI (Fully-depleted Silicon-on-Insulator) dans lequel on a défini un nano-fil de section transversale 10nm×20nm, que l'on recouvre d'une grille de longueur 30 nm. Deux transistors de ce type sont mis en série pour permettre de détecter les spins (voir fig. 1).

Ce dispositif est constitué de deux transistors à effet de champ relativement isolés des zones très dopées que constituent la source et le drain pour éviter que des dopants viennent perturber le cœur du dispositif. La source et le drain sont dopés avec des accepteurs, car nous travaillons dans la bande de valence du silicium (avec des anti-quasi-électrons appelés trous) plutôt qu'avec des quasi-électrons dans la bande de conduction du silicium [12]. En effet, le spin d'un trou est sensible au champ électrique par un effet relativiste appelé couplage spin-orbite, tandis que le spin des électrons voit surtout le champ magnétique. Dans les transistors à effet de champ, on utilise exclusivement le champ électrique, et c'est pourquoi il est préférable de manipuler aussi le spin avec un champ électrique.

Manipuler un bit quantique

Le principe de la manipulation du bit quantique est sommairement le suivant : des tensions continues sont appliquées sur les deux grilles pour attirer un trou sous chacune des grilles. Plus spécifiquement on s'arrange pour que les configurations avec un trou sur chaque grille (1,1), deux trous sur la grille 2 (0,2) et (1,0) soient équivalentes en énergie. Dans ce cas, un courant de trou circule du drain (légèrement polarisé positivement) à la source par la séquence suivante : (1,0)→(1,1)→(2,0)→(1,0), du moins quand les spins sont d'orientation antiparallèle dans l'état (1,1). En effet, s'ils sont parallèles, dans l'état (2,0), ils doivent occuper une même orbitale (le canal est si petit que seule une orbitale est énergétiquement disponible), ce qui est interdit par le principe de Pauli. Ceci met fin au transfert de trou entre le drain et la source. On peut donc être sûr que les spins des deux trous piégés en (1,1) sont d'orientation parallèle si on attend un peu (phase d'« initialisation »). Puis on change rapidement les tensions continues pour que l'état (1,0) soit énergétiquement interdit, les états (1,1) et (2,0) restant équivalents et, maintenant, isolés (phase de « manipulation »). On ajoute alors une tension radiofréquence sur la grille 1. Grâce au couplage spin/orbite et au bon choix de la



Installation d'un réfrigérateur à forte puissance, destiné à porter les bits quantiques silicium et leur environnement de lecture-contrôle vers 0.35K (environ - 273°C).

fréquence micro-onde (environ 20GHz), le spin du trou sous la grille 1 tourne en fonction de la longueur du pulse radiofréquence appliqué avec une fréquence appelée fréquence de Rabi (environ 80MHz dans notre meilleur cas). Quand les deux spins sont parallèles, la transition (1,1)→(2,0) a lieu. Enfin, dans la phase dite de « détection », on ajuste de nouveau les tensions de grille pour que la transition (2,0)→(1,0) soit permise. Si la transition (1,1)→(2,0) a lieu, on transfère un trou, sinon il n'y a pas de transfert. En répétant suffisamment ce cycle initialisation/manipulation/détection, on transforme donc l'information de l'orientation du spin sous la grille 1 en un courant drain-source mesurable.

Différentes manipulations d'échos de spin, inspirées de la résonance paramagnétique électronique, permettent de mesurer le temps de cohérence du spin et de le comparer à la fréquence de Rabi. Nous observons un temps de cohérence de 300 ns pour une fréquence de Rabi de 80MHz, c'est-à-dire que nous pouvons retourner 24 fois le spin avant de perdre la cohérence quantique du spin.

Conclusion

Malgré leurs qualités, les performances des transistors et processeurs CMOS saturent aujourd'hui et de nouveaux moyens de traiter l'information sont nécessaires pour continuer à progresser.

L'information quantique est l'un de ces moyens. Naturellement, la puissance des processeurs classiques constitue une marche très haute à franchir. Le calcul quantique, qui repose sur des principes radicalement nouveaux, peut nous faire espérer franchir cette marche. Le bit quantique de spin dans le silicium, nouveau venu dans ce vaste champ de recherche de l'ingénierie quantique, progresse vite et peut s'appuyer sur une technologie très développée.



« Différentes manipulations d'échos de spin, inspirées de la résonance paramagnétique électronique, permettent de mesurer le temps de cohérence du spin et de le comparer à la fréquence de Rabi. »

[11] A CMOS silicon spin qubit, R. Maurand, X. Jehl, D. Kotekar Patil, A. Corna, H. Bohustavskyi, R. Laviéville, L. Hutin, S. Barraud, M. Vinet, M. Sanquer, S. De Franceschi - arXiv:1605.07599 Nature Communications 7, Article number: 13575

[12] On parle de quasi-électrons car ce sont des électrons évoluant dans le silicium et non pas dans le vide.

APPLICATIONS

Les bénéfices du calcul quantique

Si le calcul quantique suscite aujourd'hui autant d'espoirs et entraîne nombre d'annonces du côté des industriels de l'informatique, c'est que la réalisation de machines appliquant ces principes pourrait permettre l'exploration de problèmes difficiles ou impossibles à appréhender à l'aide de calculateurs classiques. Quels sont ces problèmes ? Ou, autrement formulé, quels sont ces problèmes qui se trouvent limités par les gigantesques capacités de calcul de nos plus puissants ordinateurs actuels ?



Christian Gamrat est responsable scientifique du Département Architecture Conception et Logiciels Embarqués (DACLE) au CEA/List.



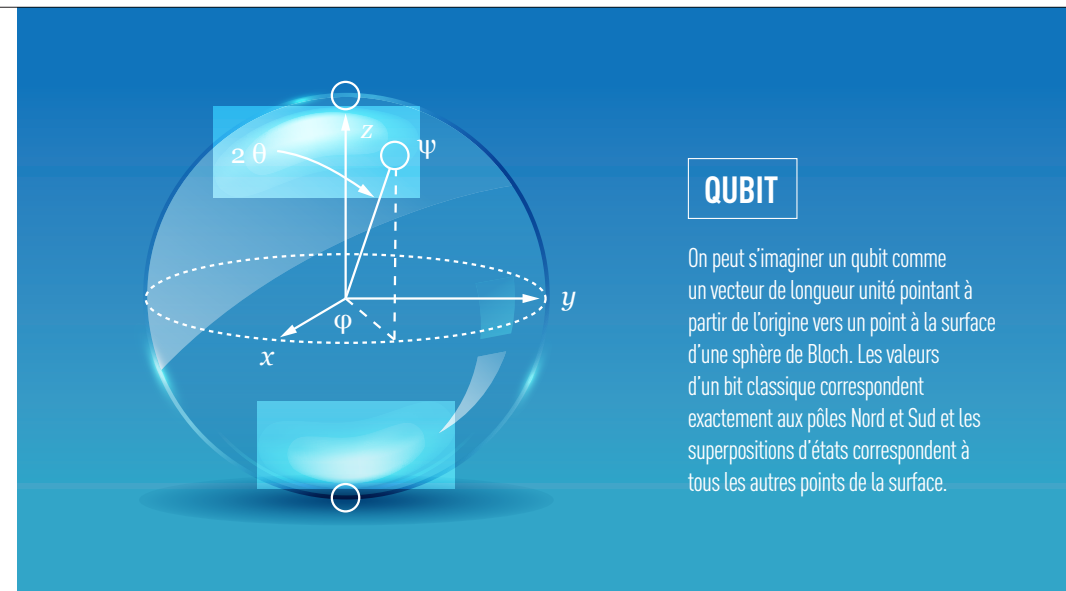
Christophe Calvin est responsable du Secteur informatique, simulation numérique et calcul intensif au CEA/DRF.



Les bases du calcul quantique furent posées par Richard Feynman en 1982 [1], dans un article où il s'interrogeait sur la possibilité de simuler les phénomènes physiques, le temps, les probabilités et la mécanique quantique avec un ordinateur. Afin d'y parvenir, il se posa la question de savoir s'il était possible de réaliser une simulation probabiliste d'un système quantique à l'aide d'un ordinateur classique ? Il observait : « Si je veux rendre les équations [de la mécanique quantique] aussi proches que possible de ce qui peut être simulé par un ordinateur probabiliste classique, je tombe toujours sur une impasse » [1]. Aussi conclut-il que la meilleure façon de simuler un système quantique serait de le faire à l'aide d'un dispositif obéissant lui-même aux lois de la mécanique quantique, réalisant ainsi ce qu'il appela un « simulateur quantique universel ».

Trois ans plus tard, en 1985, David Deutsch proposa une généralisation quantique du modèle de calcul de la « machine de Turing » - qui est à la base des

ordinateurs classiques - avec laquelle il serait possible de construire un « calculateur quantique universel » [2]. Il remarquait qu'une telle construction bénéficierait de caractéristiques remarquables impossibles à reproduire par aucune machine de Turing, en introduisant le parallélisme quantique : « une méthode par laquelle certaines tâches probabilistes peuvent être exécutées plus rapidement par un calculateur quantique universel que par n'importe quelle autre machine de Turing classique ». Deutsch concluait son article en notant que l'existence d'une telle machine impliquait l'existence de programmes capables de réaliser n'importe quelle expérience de physique. Cette affirmation sera enrichie plus tard par Deutsch et Josza [3] qui introduiront l'un des premiers exemples d'algorithme quantique s'exécutant exponentiellement plus vite que n'importe quel algorithme déterministe classique. Par la suite, David DiVincenzo, posera les premières conditions à la réalisation pratique d'un ordinateur quantique sous la forme de cinq critères connus sous le nom de « critères de DiVincenzo » [4].



© MuncherD/Spleens, Creative Commons CC BY-SA 3.0/4

Parmi les domaines d'applications considérés pour le calcul quantique figurent en bonne place des problèmes physiques réputés difficiles par des approches classiques. Cette difficulté est souvent liée au nombre de variables trop important où croissant de manière exponentielle avec la taille du problème posé. S'il est souvent possible d'appréhender ces problèmes avec des approches de simulation atomistique, il reste que la précision des résultats et les temps de calcul sont vite contraints par les capacités limitées des ordinateurs classiques.

Chimie quantique

La simulation en chimie en est un cas exemplaire. La majorité des problèmes de chimie computationnelle consistent à déterminer les orbitales moléculaires, d'en calculer les distributions spatiales et énergétiques ainsi que les propriétés des états fondamentaux d'une molécule. Du calcul de ces grandeurs, on peut ensuite déduire et prédire la stabilité, la réactivité d'une molécule et toutes propriétés importantes pour expliquer ses effets pour les applications les plus variées (pharmacologie, catalyse).

La fonction d'onde quantique (fonction de Schrödinger) permet d'obtenir ces informations, mais il s'agit d'un calcul qu'il n'est possible de réaliser par une approche classique qu'au prix d'un certain nombre d'approximations. Et plus le problème est grand (plus la molécule est complexe), plus ces approximations deviennent importantes. On est typiquement dans une approche classique de modélisation, où le problème réel ne pouvant être résolu dans toute sa complexité, il est nécessaire de passer par une phase de représentation simplifiée du problème (le modèle) pour en trouver une solution approchée. Par son potentiel de puissance calculatoire et de capacité exponentielle à stocker de l'information, le calcul quantique permet d'envisager une simulation directe de ces systèmes moléculaires complexes.

La situation est très proche pour la physique nucléaire

et, de manière générale, pour tout système basé sur la physique quantique.

Apprentissage machine & optimisation

Les technologies liées à l'intelligence artificielle connaissent actuellement un essor rapide, plus particulièrement l'apprentissage profond. Parmi les multiples aspects du domaine, celui de l'apprentissage est souvent cité comme une application potentielle du calcul quantique. De fait, les techniques d'apprentissage consistent le plus souvent à minimiser une fonction d'erreur entre états de sortie obtenus et souhaités par une descente de gradient dans un espace d'états de très grande dimension en ajustant un nombre de paramètres considérable. En outre, cette minimisation doit être réalisée pour un nombre de configurations (les exemples à apprendre) lui aussi gigantesque : souvent plusieurs millions. Cela conduit à des algorithmes d'apprentissage très itératifs, dont les durées d'exécution peuvent se chiffrer en jours voire en semaines selon la complexité des problèmes, et ce même sur des machines classiques très puissantes. Dans ce type de problème, l'approche quantique pourrait permettre une exploration plus efficace de l'espace d'états en exploitant la superposition quantique.

On constate que l'apprentissage machine est un problème d'optimisation particulier par rapport à une fonction d'erreur sur la sortie désirée. Mais il existe nombre d'applications fort utiles et parfois utilisées quotidiennement qui relèvent d'une problématique similaire d'optimisation sur un jeu de contraintes : horaires de circulation, gestion de trafic, emplois du temps, et plus généralement problèmes d'ordonnement et de planification. Comme pour d'autres applications, l'approche quantique pourra se révéler utile dès lors que la taille du problème à traiter devient exponentiellement grande.

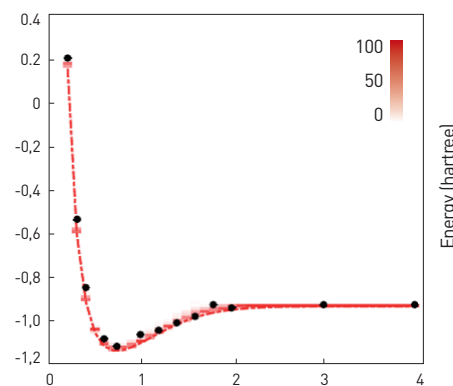
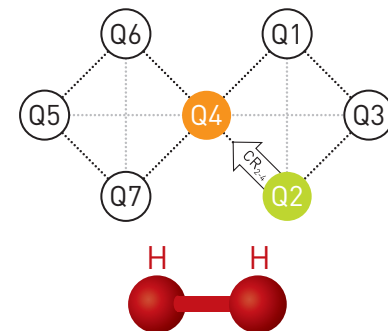


Fig. 1 : calcul d'une molécule élémentaire (H2) par un calculateur quantique : énergie en fonction de la distance interatomique (résultats expérimentaux : points noirs, simulation quantique : courbe rouge) [7]

[1] R. P. Feynman, "Simulating physics with computers," Int J Theor Phys, vol. 21, nos. 6-7, pp. 467-488, 1982.

[2] D. Deutsch, "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer," Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 400, no. 1818, pp. 97-117, Jul. 1985.

[3] D. Deutsch and R. Josza, "Rapid solution of problems by quantum computation," Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 439, no. 1907, pp. 553-558, Dec. 1992.

[4] D. P. DiVincenzo and IBM, "The Physical Implementation of Quantum Computation," Fortschritte der Physik, vol. 48, nos. 9-11, pp. 771-783, Sep. 2000.

[5] P. W. Shor, "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer," Aug. 1995.

[6] C. S. Calude, "De-quantizing the solution of deutsch's problem," Int. J. Quantum Inform., vol. 05, no. 03, pp. 409-415, Jun. 2007.

[7] A. Kandala et al., "Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets," Nature, vol. 549, no. 7671, pp. 242-246, Sep. 2017.



« Le possesseur d'un ordinateur quantique pourrait "casser" le code RSA en un temps raisonnable à l'aide de l'algorithme de Shor et accéder à nombre d'informations confidentielles liées au commerce électronique entre autres. »

Cryptographie

Lorsque Peter Shor publia un article montrant comment il serait possible d'effectuer la factorisation des entiers en nombre premiers dans un temps polynomial avec un ordinateur quantique [5], une attention particulière s'est portée sur l'ordinateur quantique. En effet, le principe de décomposition d'un entier suffisamment grand en ses facteurs premiers est à la base de l'algorithme de cryptage RSA couramment utilisé pour échanger des données confidentielles sur internet. De fait, le possesseur d'un ordinateur quantique pourrait « casser » le code RSA en un temps

raisonnable à l'aide de l'algorithme de Shor et accéder à nombre d'informations confidentielles liées au commerce électronique entre autres. L'ordinateur quantique fit ainsi une entrée en fanfare dans le monde de l'informatique et de la cyber-sécurité. Face à ce risque potentiel, la NIST (organisme américain chargé de standardiser - entre autres - les systèmes de cryptographie) a lancé début 2017 une initiative pour solliciter des études sur des algorithmes de cryptographie dit « post-quantiques », c'est-à-dire capables de résister à des attaques par de futures machines quantiques. De tels algorithmes existent bien, montrant que l'ordinateur quantique a aussi ses limites.

Programmer l'ordinateur quantique

La réalisation effective des applications évoquées au préalable suppose bien évidemment qu'on puisse disposer d'un ordinateur quantique opérationnel et de la capacité à le programmer de manière efficace. Pour le moment, une méthode de programmation d'une application sur un ordinateur quantique pourrait être schématisée par les étapes suivantes (voir fig. 2) :

1. préparer un ensemble de qubits dans un état initial adapté au problème à résoudre ;
2. appliquer une séquence d'opérations quantiques sur cet ensemble de qubits ;
3. mesurer une probabilité (classique) de l'état final.

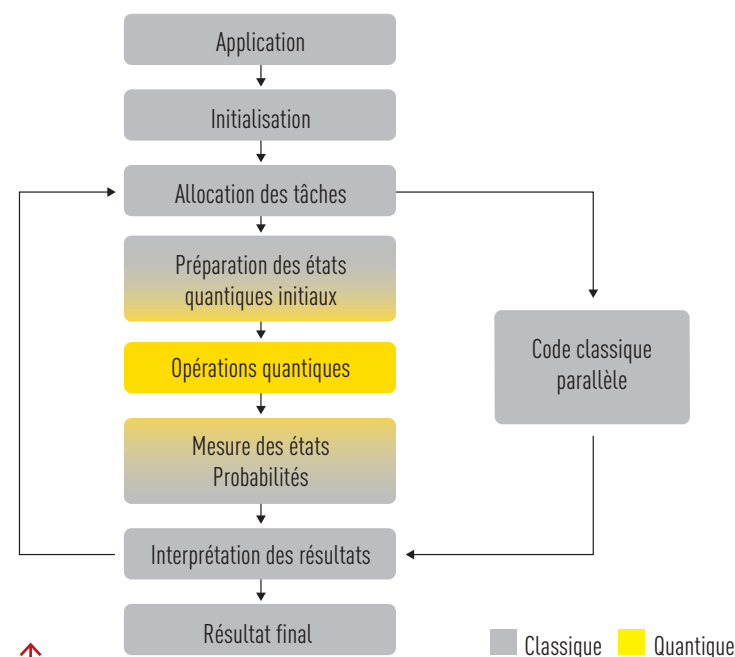


Fig. 2 : schéma d'exécution d'une application quantique : les étapes quantiques (en jaune) sont intégrées dans un flot d'exécution classique (en gris).

Si tout s'est bien enchaîné, la mesure finale donnera une solution au problème avec une probabilité d'autant plus grande que la fidélité du calcul quantique aura été conservée pendant toute la succession des étapes. Il est cependant évident que pour augmenter la fiabilité du résultat final, cette succession d'étapes devra être répétée un nombre suffisant de fois.

On constate que cette succession d'étapes implique une partie dévolue au calcul classique pour les phases de préparation et de mesure, de sorte que l'exécution d'un programme de l'ordinateur quantique serait nécessairement hybride : sa partie quantique peut ainsi être vue comme un accélérateur et sa partie classique comme un superviseur des opérations. Dès lors, la performance globale de l'ordinateur quantique sera bornée par la performance de sa partie classique. C'est une version quantique de la fameuse loi d'Amdahl.

Le mode de fonctionnement de l'informatique quantique est radicalement différent de l'informatique classique de Von Neumann. À titre d'illustration, sur un ordinateur classique le résultat est déterministe, alors qu'il est probabiliste pour un ordinateur quantique. Autre différence notable, on ne peut pas copier la valeur d'un qubit. Ainsi la programmation quantique est en rupture totale par rapport à une approche de programmation classique et il est donc nécessaire de repenser totalement la façon de résoudre le problème initial.

Paradoxalement, en repensant le mode de résolution des problèmes pour les adapter au calcul quantique, on fait aussi progresser les algorithmes classiques [6] et on repousse un peu plus leurs limites.

En somme, on peut envisager d'accélérer certains des problèmes identifiés à l'aide de circuits quantiques soigneusement réalisés et des moyens de programmation adaptés. Cependant, l'ordinateur quantique - toujours hybride - n'est pas encore prêt de supplanter l'ordinateur classique. ■

Baptisé « Atos Quantum Learning Machine », le simulateur s'appuie sur un langage de programmation universel propulsé par un nouveau supercalculateur ultra compact.



© Atos

•
**PAR
PHILIPPE DULUC**
(ATOS)



Philippe Duluc est Chief Technology Officer "Big data & Security" chez Atos.

Demain, l'informatique quantique ?

Le potentiel de l'informatique quantique n'est plus à démontrer mais la route est encore longue. En collaboration notamment avec le CEA, Atos investit des moyens importants pour développer les technologies quantiques de demain.

L'industrie et la recherche ont toujours besoin de davantage de puissance de calcul. Jusqu'à présent, cette puissance doublait tous les 18 mois selon la loi de Moore. Mais aujourd'hui, la technologie ne peut plus suivre, la finesse de gravure des puces atteignant désormais 5 nanomètres au mieux. La miniaturisation des puces de silicium, avec une maille cristalline de 0,3 nm, nous ferait basculer dans une dimension atomique, où les propriétés quantiques jusque-là constructives vont devenir destructives. Pour aller plus loin, Atos a déjà livré le BullSequana, qui sera capable d'atteindre l'exaflop/s (1 milliard de milliards d'opérations par seconde) à partir de 2020. Pour la génération suivante, de nouvelles architectures seront nécessaires. Les technologies quantiques peuvent fournir une partie de la réponse :

la possibilité d'accélération a été démontrée non seulement pour la factorisation, mais sur des algorithmes de machine learning, d'inversion de matrice, de recherche dans une liste, ou d'optimisation combinatoire.

Atos, leader européen en calcul, apporte le meilleur de la technologie à ses clients, anticipant en permanence les opportunités et défis à venir. C'est la raison pour laquelle le groupe a été le premier industriel en Europe à lancer sur fonds propres un programme dédié pour leur faire bénéficier d'une rupture probablement majeure. Atos Quantum a ainsi été lancé début 2016 par Thierry Breton. Il couvre deux axes. Le principal, à court terme, vise à fournir une plateforme de programmation, d'optimisation et d'émulation d'algorithmes quantiques, à travers un simulateur baptisé Atos Quantum Learning Machine

« Jusqu'à présent, la puissance de calcul doublait tous les 18 mois selon la loi de Moore. Mais aujourd'hui, la technologie ne peut plus suivre. »

« Un ordinateur quantique comporte trois parties : hardware (qubits physiques, lasers, refroidissement, électronique de commande...), software (algorithmie, programmation, test, optimisation, commande des qubits...) et applications métier. Pas de développement du quantique sans avancée conjointe dans ces trois domaines. »

(Atos QLM). L'Atos QLM a été développée en 18 mois et livrée aux premiers clients fin 2017, parmi lesquels figure le Centre de recherches américain d'Oak Ridge. Elle accélère le développement d'algorithmes quantiques en permettant de les optimiser et les tester jusqu'à 40 qubits par émulation sur un ordinateur in-memory spécialement modifié. L'objectif à terme est d'offrir des capacités de simulation les plus réalistes possibles, en fonction du hardware quantique utilisé. Pour ce faire, nous embarquerons dans le simulateur des caractéristiques spécifiques (connectivité, design des portes, topologie, etc.) et des modèles de bruit, ce qui procure un avantage incommensurable aux développeurs de software ou de hardware.

Le deuxième axe prépare l'après-BullSequana et vise à fournir des capacités d'accélération quantique applicables à certains algorithmes. Comme pour les supercalculateurs avec Intel ou ARM par exemple, Atos s'appuiera sur des partenaires fournisseurs de QPU, de façon agnostique, et construira ses propres machines. Au CEA, cela concerne l'équipe Quantronique (Direction de la recherche fondamentale) dont l'expérience et les compétences sont unanimement reconnues, et avec qui une Chaire Industrielle est mise en place ainsi que le Leti (Direction de la recherche technologique) sur les qubits de silicium qui constituent une voie technologique plus récente et prometteuse (voir p. 36).

Un ordinateur quantique comporte trois parties : hardware (qubits physiques, lasers, refroidissement, électronique de commande...), software (algorithmie, programmation, test, optimisation, commande des qubits...) et applications métier. Pas de dévelop-

pement du quantique sans avancée conjointe dans ces trois domaines. Les domaines software et applicatif demeurent insuffisamment développés, une véritable terra incognita, où les spécialistes restent rares. On sait les limites physiques que rencontrent les technologies hardware en matière de décohérence quantique : réduire la profondeur d'un circuit quantique diminue le temps d'exécution et donc le bruit. Cela peut se faire par voie logicielle, d'où l'importance de l'optimisation et des innovations algorithmiques.

Certains algorithmes ne bénéficient d'aucune accélération en quantique. De fait, l'ordinateur universel quantique perd son intérêt. Les plateformes de calcul futures offriront plutôt des capacités hétérogènes mettant en œuvre plusieurs technologies (CPU, GPU, FPGA et accélérateurs quantiques). Cette évolution constitue aussi un formidable challenge pour le software. Pour toute application, il faudra piocher dans une librairie d'algorithmes, certains étant accélérés par le quantique ou d'autres par les GPU. Une application pourrait se décomposer en plusieurs modules adressant différentes technologies, avec des problématiques nouvelles d'échanges de données et de synchronisation que les développeurs devront prendre en compte. On le voit bien, l'arrivée de l'informatique quantique au sein de plateformes hybrides constitue en elle-même un formidable enjeu, une nouvelle frontière, pour le software et le système dans lesquels Atos entend bien figurer au premier rang. Cela se traduit pour le CEA par une belle complémentarité permettant de couvrir, ensemble, l'entièreté du domaine de l'informatique quantique. ■



© Atos



© Belpa

Thierry Breton, Président-directeur général d'Atos, lors du lancement du programme Atos Quantum le 4 novembre 2016.

Conseil scientifique du programme Atos Quantum

Thierry Breton, Président-directeur général d'Atos, entouré de Serge Haroche, Prix Nobel de Physique, Cédric Villani, lauréat de la Médaille Fields, Daniel Estève, Alain Aspect, David DiVincenzo, Artur Ekert et les membres de l'équipe dirigeante d'Atos Quantum, lors du lancement du programme Atos Quantum le 4 novembre 2016.



Explosion d'une étoile massive (Supernova) éjectant à grande vitesse ses produits de nucléosynthèse.

Tout est quantique dans l'Univers

L'Univers a une histoire dont nous sommes capables de retracer les grandes étapes. Voilà certainement l'une des plus grandes découvertes du XX^e siècle. Elle débouche sur une surprise de taille : il fut un temps où les atomes qui nous constituent n'existaient pas et leur fabrication résulte de phénomènes quantiques.

Il y a environ 13,8 milliards d'années, l'Univers n'était empli que de lumière et de particules élémentaires : protons, neutrons, électrons, neutrinos. Son expansion a refroidi ce gaz très chaud, autorisant l'existence des noyaux atomiques, combinaisons stables de protons et de neutrons. Cette période de formation des noyaux cessa en quelques minutes, ne laissant que les plus légers d'entre eux, ceux qui renfermaient peu de protons et de neutrons. Pour construire des noyaux plus lourds, il fallut attendre que des conditions favorables réapparaissent et accorder beaucoup plus de temps aux réactions nucléaires. C'est au cœur des étoiles, réacteurs nucléaires dont la matière est confinée par la gravitation, que se situe le creuset des noyaux allant du carbone au fer. Les étoiles les plus massives, en explosant violemment, éjectent à grande vitesse leurs produits de nucléosynthèse. Petit à petit, ces supernovæ enrichissent le milieu interstellaire en noyaux lourds qui entreront dans la composition des futures étoiles. Sans la nucléosynthèse stellaire et les supernovæ, notre univers serait un endroit fort peu

intéressant ne contenant que les deux éléments primordiaux, l'hydrogène et l'hélium. Et l'émergence de noyaux plus lourds doit beaucoup à la physique quantique.

À la fin du XIX^e siècle, les physiciens étaient incapables d'expliquer que le Soleil ait pu briller plus d'un milliard d'années - âge que les géologues donnaient alors à la Terre - au rythme qui était observé. En 1920, le physicien britannique Arthur Eddington (1882-1944) publia un article intitulé The Internal Constitution of the Stars où il s'interrogeait sur la source d'énergie capable d'expliquer la prodigieuse ancienneté du rayonnement solaire. Reprenant le résultat tout récent de son compatriote Francis Aston (1877-1945), qui venait de montrer que la masse d'un atome d'hélium-4 est inférieure de 0,8 % à celle de quatre atomes d'hydrogène, et ayant en tête l'équivalence entre masse et énergie démontrée par Albert Einstein (le fameux $E = mc^2$!), Eddington montra que les étoiles pouvaient briller durablement grâce à l'énergie dégagée par la transformation de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium-4.

« Sans la nucléosynthèse stellaire et les supernovæ, notre univers serait un endroit fort peu intéressant ne contenant que les deux éléments primordiaux, l'hydrogène et l'hélium. Et l'émergence de noyaux plus lourds doit beaucoup à la physique quantique. »

•
PAR ROLAND LEHOUCQ

(Direction de la recherche fondamentale)



Roland Lehoucq est astrophysicien (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers) au CEA et enseignant à l'École polytechnique.

© Laurence Honnorat / Utopiales 2014



George Gamow (1904-1968)
George Gamow, né Gueorgui Antonovitch Gamov (Георгий Антонович Гамов), est un physicien théoricien, astronome, cosmologiste et vulgarisateur scientifique américano-russe.

Il a proposé la théorie de la radioactivité alpha par l'effet tunnel quantique. Il a effectué des recherches sur la formation des étoiles, la nucléosynthèse stellaire, la nucléosynthèse primordiale à la suite du Big Bang, le fond diffus cosmologique de micro-ondes, et la génétique au niveau moléculaire.

Pour se convaincre définitivement que des réactions de fusion étaient à l'œuvre, il fallut aussi comprendre comment deux noyaux, portant une charge électrique positive, peuvent s'approcher suffisamment pour fusionner en dépit de leur répulsion électrique. Franchir cette barrière énergétique est possible à condition que les noyaux soient suffisamment rapides, c'est-à-dire suffisamment chauds. Problème : à la température du cœur solaire, de l'ordre de 15 millions de degrés, l'énergie thermique moyenne est 1 000 fois inférieure à la hauteur de la barrière à franchir. Qu'à cela ne tienne ! Après tout, toutes les particules d'un gaz n'ont pas la même énergie : certaines en ont plus, d'autres moins, et la température du gaz n'est autre, à une constante près, qu'une mesure de leur énergie moyenne. En pratique, le nombre de particules ayant une énergie donnée décroît si vite (exponentiellement) qu'aucune des particules du Soleil n'a l'énergie requise pour provoquer une fusion nucléaire... En physique classique, la réaction de fusion proposée par Eddington est donc impossible dans les conditions solaires !

La physique quantique entre en scène

La lumière viendra de la physique quantique et du physicien américain d'origine russe George Gamow (1904-1968) qui étudiait l'émission d'un noyau d'hélium-4 par un noyau radioactif, nommée désintégration alpha. Selon la mécanique classique, cette émis-

sion spontanée est impossible car la particule alpha est incapable de sortir du noyau à cause de la grande énergie requise pour échapper à l'attraction nucléaire. Grâce à la mécanique quantique, Gamow montra que la particule alpha avait une probabilité faible mais non nulle de franchir cette barrière énergétique. Grâce à cet « effet tunnel », il en déduisit par le calcul une relation déjà observée expérimentalement liant la durée de vie du noyau radioactif à l'énergie de la particule alpha émise. Il montra aussi que l'effet tunnel joue un rôle dans la fusion nucléaire en abaissant considérablement l'énergie réellement nécessaire pour franchir la barrière de répulsion électrique. Le travail fut parachevé en 1939 par le physicien allemand Hans Bethe (1906-2005), qui expliqua la transformation d'un des protons en neutron via l'interaction faible, faisant du noyau de deutérium, produit de la fusion de deux protons, la première étape vers la production d'hélium-4.

L'évolution et le destin d'une étoile dépendent essentiellement de sa masse. C'est elle qui fixe les conditions thermodynamiques centrales, donc la possibilité que des réactions de fusion thermonucléaires se déroulent au cœur de l'étoile. Durant la plus grande partie de sa vie, une étoile s'accommode de son hémorragie d'énergie lumineuse en puisant dans ses ressources d'énergie nucléaire. L'épuisement de l'hydrogène déclenche la contraction gravitationnelle du cœur et l'énergie dégagée prend le relais de la source nucléaire. L'échauffement et la compression qui résultent de cette contraction permettent le démarrage

« En quelques dixièmes de seconde, la matière atteint l'incroyable densité d'un million de tonnes par centimètre cube, l'équivalent d'une plate-forme pétrolière compactée dans le volume d'un dé à coudre ! »



d'un nouveau cycle de fusion qui consomme les noyaux produits par le cycle précédent. La contraction s'arrête alors car l'énergie dégagée par les réactions nucléaires fait que l'étoile retrouve un nouvel état d'équilibre. Plus une étoile est massive, plus sa température centrale atteindra des valeurs élevées après sa contraction gravitationnelle et plus lourds seront les noyaux qui pourront fusionner.

Physique quantique : le retour

Mais la contraction gravitationnelle ne conduit pas forcément au démarrage d'un nouveau cycle de fusion car le gaz d'électrons des régions centrales peut devenir sujet à un effet quantique qui stoppera la contraction et l'échauffement du cœur. En effet, quand la densité est assez élevée pour que la distance moyenne entre électrons soit bien plus petite que la longueur d'onde - quantique - qui leur est associée (dite longueur d'onde de de Broglie), la description du gaz doit tenir compte des effets quantiques. Dans le cas d'un gaz d'électrons, le principe d'exclusion, proposé par le physicien autrichien Wolfgang Pauli (1900-1958), stipule que deux électrons ne peuvent occuper le même état quantique. Autrement dit, deux électrons ne peuvent avoir simultanément la même position, la même énergie et le même état de spin. Dans cette situation, le gaz d'électrons est dit dégénéré et même totalement dégénéré quand tous les états quantiques sont occupés jusqu'à une énergie dite de Fermi, et vides au-delà. La contraction s'arrête alors car la pression d'un gaz dégénéré est bien supérieure à celle d'un gaz habituel dans les mêmes conditions.

Cette situation se produit dans les étoiles les moins massives, comme le Soleil, qui pourront seulement réaliser la fusion de l'hydrogène en hélium-4 suivie de celle de l'hélium-4 en carbone-12. En revanche, les étoiles ayant une masse au moins huit fois supérieure à celle du Soleil pourront enclencher une succession de cycles de fusion menant à la formation du fer. L'apparition du fer par fusion du silicium marque le début d'un processus qui aboutira à la destruction de l'étoile. Le noyau du fer étant le plus lié des noyaux stables, il est énergétiquement stérile et sa fusion ne compensera pas l'énergie que l'étoile rayonne inexorablement par sa surface. L'étoile se trouve définitivement à court de carburant nucléaire.

Quand la gravité surpasse les effets quantiques

En 1930, l'astrophysicien indien Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) étudia la stabilité gravitationnelle d'un astre sans source interne d'énergie et supporté par la pression d'un gaz d'électrons dégénérés. Il montra que l'astre devenait instable quand sa masse dépassait une limite, désormais nommée masse de Chandrasekhar. Cette limite est atteinte quand la vitesse moyenne des électrons tend vers celle de la lumière, c'est-à-dire quand la densité du gaz d'électrons est telle que son énergie de Fermi est de l'ordre de l'énergie de masse d'un électron. La pression électronique devient alors incapable de supporter le poids des couches externes de l'étoile : la gravité surpasse les effets quantiques. Au fil de la fusion



Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995)

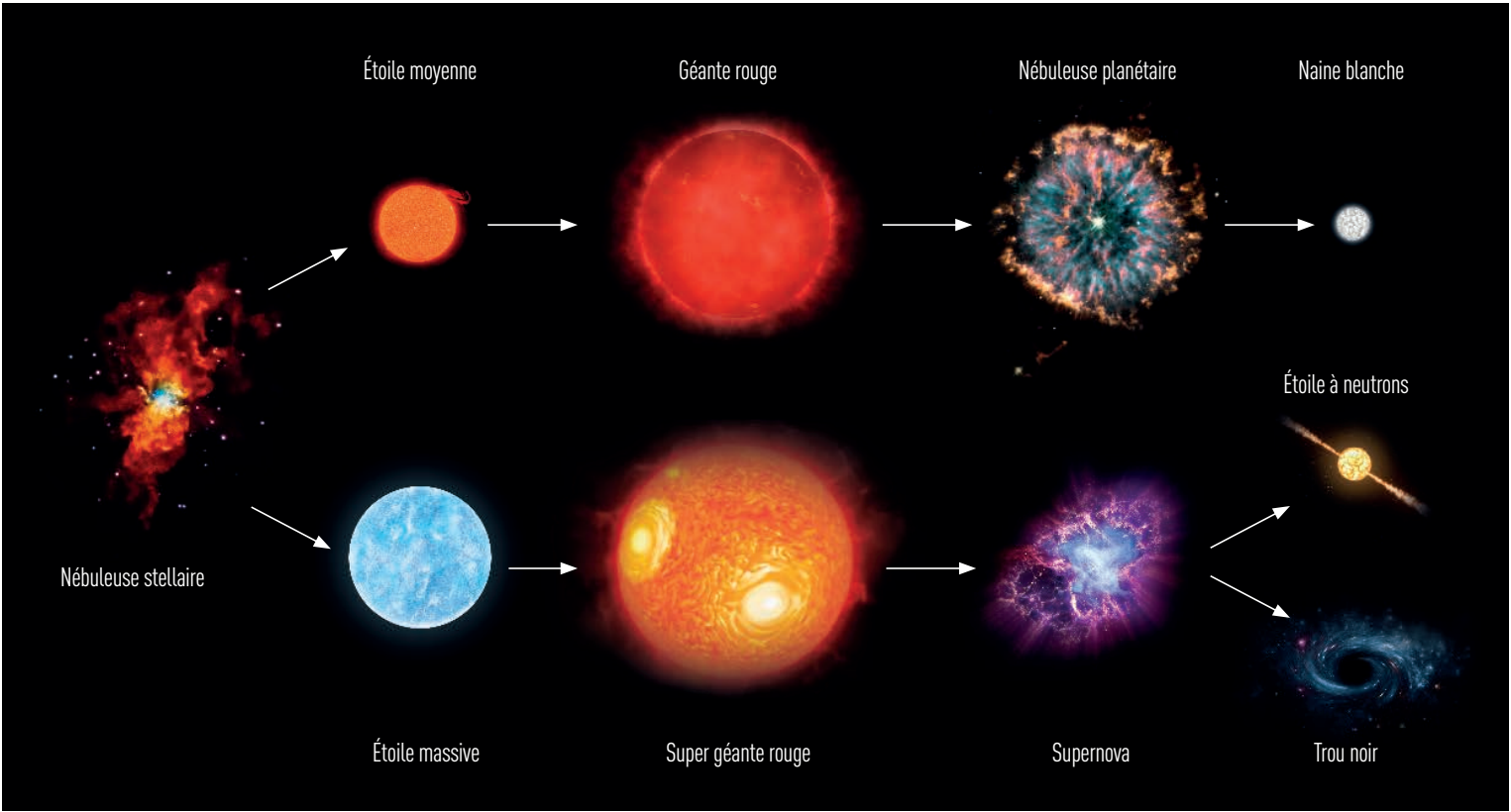
Subrahmanyan Chandrasekhar est un astrophysicien et un mathématicien d'origine indienne. Il est lauréat du prix Nobel de physique de 1983.

Il est connu pour avoir déterminé au-delà de quelle limite une naine blanche devient instable sous certaines conditions et s'effondre en étoile à neutrons, initiant le processus de supernova.

Cette limite est désormais connue sous le nom de limite de Chandrasekhar.



« La masse de Chandrasekhar est atteinte quand la vitesse moyenne des électrons tend vers celle de la lumière, c'est-à-dire quand la densité du gaz d'électrons est telle que son énergie de Fermi est de l'ordre de l'énergie de masse d'un électron. »



« Nous sommes tous constitués de poussières d'étoiles.
On pourrait ajouter que nous sommes
aussi les enfants de la physique quantique. »

du silicium, la masse de fer augmente inexorablement et finit par atteindre la masse de Chandrasekhar, provoquant ainsi l'effondrement gravitationnel du cœur de l'étoile. Les conditions sont telles que les photons brisent les noyaux de fer précipitant ainsi l'effondrement du cœur, attisé par la capture des électrons par les noyaux transformant les protons en neutrons. Cette réaction nucléaire s'accompagne d'une émission de neutrinos, qui emportent la phénoménale quantité d'énergie potentielle gravitationnelle dégagée par la contraction. En quelques dixièmes de seconde, la matière atteint l'incroyable densité d'un million de tonnes par centimètre cube, l'équivalent d'une plate-forme pétrolière compactée dans le volume d'un dé à coudre !

Des noyaux nouveaux pour enrichir l'Univers

Le cœur de l'étoile, désormais constitué de neutrons, se réduit à une petite sphère d'une dizaine de kilomètres de diamètre avec une masse de l'ordre de celle du Soleil : une étoile à neutrons s'est formée et, sur sa surface rigide, le reste de l'étoile en effondrement vient s'écraser. La violente compression qui en résulte produit une onde de choc qui remonte à travers les

couches externes de l'étoile. Son passage chauffe la matière à des températures supérieures au milliard de degrés et provoque des réactions de fusion qui produisent des éléments lourds, notamment du nickel et du cobalt radioactifs. Quand l'onde de choc atteint la surface, la température s'élève brutalement et l'étoile entière explose, éjectant les éléments qui la composent à des vitesses pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par seconde. Cet événement, appelé « supernova de type II », marque la mort d'une étoile massive mais son influence sur le milieu interstellaire se fera sentir pendant des millions d'années : l'explosion propulse les noyaux synthétisés durant toute la vie de l'étoile, ainsi que ceux qui furent produits lors du passage de l'onde de choc.

Petit à petit, les supernovæ enrichissent ainsi le milieu interstellaire en noyaux nouveaux qui entrèrent dans la composition de futures étoiles et de leurs éventuelles planètes. Absents au début de l'Univers, ils ne représentent aujourd'hui que 2 % des noyaux : du point de vue nucléaire, l'Univers a peu évolué. Les noyaux rencontrés sur Terre sont tous issus de la nucléosynthèse stellaire et le fer ne provient que des supernovæ. Ce fait stupéfiant a fait dire, à juste titre, que nous sommes tous constitués de poussières d'étoiles. On pourrait ajouter que nous sommes aussi les enfants de la physique quantique. ■

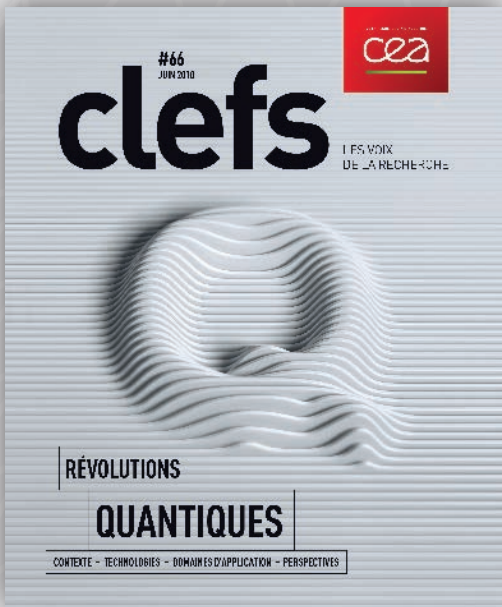


Vous souhaitez approfondir vos connaissances en mécanique quantique : suivez en ligne la masterclass d'Etienne Klein et Roland Lehoucq !

Cette masterclass a été enregistrée à l'Ecole Polytechnique le 29 mai 2018

cea.fr/go/masterclass-physique-quantique





#66



#65



#64

Retrouvez ce numéro et les numéros précédents sur
www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/clefs.aspx

#67
À DÉCOUVRIR EN DÉCEMBRE

LA MÉDECINE DU FUTUR



Vous voulez vous abonner ou commander un numéro ?

Envoyez votre nom, prénom,
adresse postale et adresse e-mail (recommandé) à :

clefs-cea@cea.fr 

À l'exclusion des illustrations, la reproduction totale ou partielle des informations contenues dans
ce numéro est libre de tous droits, sous réserve de l'accord de la rédaction et de la mention d'origine.

Abonnement gratuit ou commande au numéro : clefs-cea@cea.fr
Cet exemplaire ne peut être vendu.

 © 2018 CEA
RCS Paris B 775 685 019
Siège social : Bâtiment Le Ponant D,
25 rue Leblanc, 75015 Paris



#66 clefs

LES VOIX
DE LA RECHERCHE

Clefs CEA N° 66 - Juin 2018

Revue éditée par le CEA
Direction de la communication
Bâtiment Siège
91191 Gif-sur-Yvette Cedex - FR
Tél. : (+33) 1 64 50 10 00

Directeur de la publication
Xavier Clément

Rédacteur en chef
Laetitia Baudin
laetitia.baudin@cea.fr

Comité éditorial
Cécile Castille, Etienne Klein,
Sophie Martin, Eric Proust, Gérard Sanchez,
Malgorzata Tkatchenko

Iconographie
Thinkstock, Wikipedia

Abonnement
L'abonnement à la revue Clefs CEA
(version papier) est gratuit.
Les demandes d'abonnement
doivent être adressées, de préférence
par Internet, à l'aide du formulaire
disponible à l'adresse : www.cea.fr
ou par télécopie au 01 64 50 20 01

ISSN 0298-6248
Dépôt légal à parution

Réalisation
Agence Heidi
www.agence-heidi.fr

Impression
Imprimerie de la Centrale - Lens
Imprimé sur papier recyclé.

Pour en savoir plus ou
retrouver tous
les dossiers thématiques



www.cea.fr

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



Abonnez-vous !

www.newsletters.cea.fr/contact