

PARIS, LE 14 JUIN 2018

DOSSIER
DE **PRESE**

CONTACT PRESSE

François Legrand
francois.legrand@cea.fr
01 64 50 27 53

www.cea.fr

 [@CEA_Recherche](https://twitter.com/CEA_Recherche)

Opportunités et défis de la recherche
sur le calcul quantique

Préambule

Si on ne dispose pas encore d'une véritable technologie d'ordinateur quantique, de nombreuses routes sont néanmoins explorées aujourd'hui. Toutes font encore face à des difficultés sans solution viable. Mais l'histoire du domaine a montré que des verrous considérés comme infranchissables finissaient par être levés. C'est pourquoi la recherche mondiale est plus active que jamais et les annonces publiques se multiplient, dans le cadre de ce qui est appelé aujourd'hui « la deuxième révolution quantique ».

En Europe, cette recherche va être largement stimulée grâce à des financements fléchés (flagship) sur les technologies quantiques et en particulier sur la réalisation, la caractérisation et la manipulation de la brique élémentaire de support de l'information, le bit quantique ou qubit.

A la fois actif sur les technologies fondamentales et sur les perspectives de déploiement industriel, le CEA s'est engagé sur la route des architectures tolérantes aux fautes à base de qubits en technologie CMOS silicium (qui pourrait permettre sa production en masse), ainsi que sur la mise au point de qubits de grande robustesse.

Sommaire

L'essentiel sur l'ordinateur quantique	5
Les recherches du CEA sur le calcul quantique	11
22 mai 2018 : Atos et le CEA lancent une chaire industrielle sur l'informatique quantique, avec le soutien de l'ANR.....	13
20 mars 2018 : un substrat en vue de la production en série de composants	15
3 mai 2018 : un projet de collaboration franco-australien	17
Clefs N° 66 : Révolutions quantiques.....	19
Quelques repères chronologiques	21
Lexique.....	23
Biographie des intervenants.....	25
Pour aller plus loin	26



L'essentiel sur l'ordinateur quantique

La quête de l'ultime qubit

A la base du concept de l'ordinateur quantique figure l'idée selon laquelle les phénomènes quantiques pourraient être utilisés pour décupler la puissance de calcul des machines classiques. Ce rêve, poursuivi par des scientifiques, de par le monde, depuis plus de trente ans, se heurte cependant à d'importants obstacles technologiques.

Au début des années 1980, le « Nobel de physique » Richard Feynman est le premier à pressentir les possibilités faramineuses d'un ordinateur capable de tirer parti des lois quantiques. Dès les années 1990, plusieurs théoriciens démontrent que certains calculs verraient leur résolution accélérée dans des proportions inouïes s'il était possible de les implémenter sur des bits quantiques (qubits) plutôt que sur des bits classiques. À condition, bien sûr, de disposer d'un processeur quantique pour les utiliser, processeur dont personne ne sait à l'époque à quoi il pourrait ressembler.

Molécules en phase liquide, ions piégés par des faisceaux laser, impureté dans les solides... les idées commencent à fuser dans les laboratoires de physique pour définir ce qui pourrait devenir les briques de bases d'un futur ordinateur quantique, à l'instar des transistors de la microélectronique classique.

Un potentiel de rupture majeur mais un problème conceptuel et technologique extrêmement difficile

Au XX^e siècle, la mise au jour de la physique quantique a révolutionné notre conception du monde mais aussi notre mode de vie avec ses applications : lasers, transistors, circuits intégrés.

Une deuxième révolution quantique advient à l'aube du XXI^e siècle. Elle regroupe des recherches visant à concevoir et à réaliser des dispositifs de rupture qui exploitent les phénomènes physiques de la superposition et de l'intrication quantique. C'est un domaine en pleine expansion avec de très forts enjeux scientifiques et technologiques. En particulier, la réalisation d'un ordinateur quantique permettrait des approches révolutionnaires pour certaines classes de problèmes.

Une communauté scientifique et technique encore réduite

La communauté scientifique bien informée sur les possibilités des technologies quantiques est encore réduite. Issue pour l'essentiel du monde académique (physique et mathématiques), elle a peu développé les voies applicatives pour le moment. Il est donc possible que de nombreuses applications insoupçonnées jusqu'à présent apparaissent dans un futur proche.

Des domaines d'application déjà identifiés

Aujourd'hui, des programmes de recherche importants sont menés selon trois grandes voies de l'ingénierie quantique qui étudie ce qu'il est possible de réaliser

en termes d'application en exploitant les propriétés d'intrication, de non localité et de superposition, propre à un système quantique :

- ▶ **Les capteurs** : une information portée par un qubit est très sensible aux perturbations apportées par son environnement ; c'est une difficulté pour réaliser un ordinateur mais cela peut permettre de construire une sonde très sensible.
- ▶ **Les ordinateurs de très grande performance** : le calcul quantique est intrinsèquement parallèle et permet de traiter en un temps très réduit de grandes quantités d'information, avec des performances inaccessibles au calcul classique pour certaines applications.
- ▶ **Les télécommunications protégées** : Les corrélations quantiques entre des particules intriquées permettent de coder un message garantissant l'absence d'interception lors de sa transmission. Le codage à base de clefs publiques trop difficiles à factoriser par les ordinateurs actuels pourrait être cassé par un ordinateur quantique ayant un nombre suffisant de qubits (de l'ordre du nombre de bits de la clef).

Le calcul massivement parallèle, intrinsèque à l'ordinateur quantique, permet de sonder l'espace des états d'un système comportant de très nombreux paramètres. Cette caractéristique permet déjà d'identifier quatre grands domaines d'application :

- ▶ **La chimie** : simuler, in silico, de manière exacte, la structure et le fonctionnement de grosses molécules d'intérêt pour la pharmacologie ou pour l'agronomie. Avec les plus puissants ordinateurs actuels, même les plus puissants, il est possible de simuler des petites molécules mais il est souvent nécessaire de recourir à de fortes approximations dès que la taille du système étudié augmente.
- ▶ **Le Data Mining** : accélérer la recherche d'une information spécifique dans une vaste base de données ;
- ▶ **L'optimisation de procédés de l'industrie 4.0** : trouver une solution optimale dans un système complexe multiparamétrique, comme par exemple la tournée la plus rapide d'un camion de livraison ou ajuster l'offre à la demande sur un réseau électrique très décentralisé ;
- ▶ **L'intelligence artificielle** : au cours de la phase d'apprentissage d'un système d'IA, telle qu'une reconnaissance d'images, les informations pourront être simultanément reconnues et non de façon séquentielle comme c'est le cas avec des processeurs classiques (examiner une situation, puis une autre, etc.).



Les enjeux de la recherche

Atout du quantique : des calculs intrinsèquement parallèles

Alors que dans un ordinateur classique, les bits (unités de base utilisées) ne peuvent prendre qu'une valeur parmi deux (soit 0 soit 1), les qubits peuvent être placés dans un ensemble continu de superpositions de leurs deux états de base $|0\rangle$ ou $|1\rangle$

Un ordinateur exploitant cette possibilité, offerte par les lois de la physique quantique, pourrait calculer de façon massivement parallèle, c'est-à-dire simultanément, l'ensemble des valeurs des qubits, et ainsi surpasser considérablement la puissance de l'ordinateur classique.

Ainsi, dans un ordinateur classique, une série de N bits égaux à 0 ou 1 permet d'encoder un unique nombre parmi les 2^N possibles (un parmi 4096 pour $N = 12$).

En revanche, un registre quantique dont les 12 qubits seraient en parallèle plongés dans les deux états de base $|0\rangle$ ou $|1\rangle$, se trouverait dans une superposition des 4096 états de base du registre. Toute opération quantique qui lui serait appliquée s'effectuerait en parallèle sur ces 4096 états de base. Ceci ne réaliserait pas pour autant du calcul parallèle car la lecture ne donnera qu'un seul résultat. L'art de l'algorithmique quantique consiste alors à exploiter le parallélisme tout en concentrant, par chaque étape de mesure, l'état du registre quantique sur la ou les solutions du problème étudié.

Difficultés du quantique : un état intrinsèquement peu stable

Si les spécialistes de physique quantique savent observer atomes, photons ou molécules dans des états dits « de superposition quantique », ces états sont extrêmement fragiles : à la moindre perturbation extérieure, ils s'évanouissent ; d'où la nécessité d'isoler aussi complètement que possible de leur environnement les systèmes que l'on souhaite mettre durablement dans de tels états.

Les qubits sont les unités de construction des ordinateurs quantiques. Ils peuvent être mis en œuvre dans une large variété de systèmes physiques à l'échelle du laboratoire. 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 portée ensuite sur des systèmes plus faciles à contrôler, comme des circuits électriques, qui eux ne fonctionnent, en général, pas en régime quantique.

Cependant, lorsqu'on veut produire de grands systèmes ou des qubits en série, il faut utiliser des supports de l'information quantique compatibles avec les standards industriels. Les qubits de spin dans le silicium sont de petite taille (typiquement 30 nm) et sont compatibles avec les technologies CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor : technologie de fabrication de composants électroniques), largement utilisées dans l'industrie microélectronique. Ils présentent donc des avantages évidents pour la production en série par rapport aux autres types de qubits.

Depuis 2012, où ont été mis au point les premiers qubits basés sur des spins d'électrons confinés, le ^{28}Si purifié isotopiquement a permis d'améliorer significativement le temps de cohérence du spin quantique : en effet, l'isotope 28 du silicium ne porte pas de spin nucléaire, source importante de décohérence



pour le qubit. Plus le temps de cohérence du spin augmente, plus la fidélité des opérations de calcul quantique et la capacité à effectuer une séquence complète d'opérations s'améliorent.

La recherche dans le domaine

La recherche fondamentale dans le domaine de l'information quantique a connu un essor important cette dernière décennie. Les enjeux dans ce domaine et la rupture technologique que présenterait un ordinateur quantique ont incité de grandes entreprises à investir d'importants moyens, en s'associant à des communautés scientifiques, ou en créant leurs propres laboratoires de recherche. L'association de Google avec l'Université de Californie de Santa Barbara ou la collaboration annoncée sur dix ans du groupe Intel avec l'université technologique de Delft illustrent l'engouement pour cette thématique de recherche et la nécessité de construire un véritable partenariat public-privé sur le long terme. Atos-Bull, leader européen du calcul intensif, s'est aussi positionné activement sur la feuille de route de l'ordinateur quantique en réalisant un émulateur d'ordinateur quantique intégrant finement mémoire et calcul dans un serveur classique optimisé, et en créant une équipe spécialisée en logiciel adapté au quantique.

Une accélération mondiale et un grand nombre d'initiatives publiques et privées

Plusieurs actions majeures à l'étranger (USA, Royaume-Uni, Pays-Bas, Danemark) impliquent dès aujourd'hui de très grands industriels (Google, Intel...) et mobilisent des financements de plusieurs dizaines de millions d'euros. Au niveau européen, un *flagship* sur l'ingénierie quantique a été décidé en 2016 et a démarré en 2018 avec l'ambition d'amener les technologies quantiques sur le marché. Le financement annoncé est d'au moins un milliard d'euros, apporté par la Commission européenne et les Etats membres sur dix ans.

Un grand nombre de voies à explorer pour espérer lever les verrous conceptuels et technologiques

Un grand nombre de voies de réalisation physique¹ est développé en parallèle. Aucun consensus ni aucun argumentaire robuste n'existe aujourd'hui sur la solution la plus adaptée pour réaliser un ordinateur quantique comprenant plus d'une dizaine de qubits. Tous les systèmes étudiés jusqu'à présent se sont en effet heurtés aux problèmes de décohérence et de complexité rapidement croissante des dispositifs quand le nombre de qubits augmente. En particulier, le problème de la correction d'erreurs est plus qu'ardu car ses difficultés sont d'ordre à la fois conceptuel et technologique, liant degrés de liberté, interactions, complexité, méthode d'adressage, méthode de mesure, décohérence. A ces questions s'ajoute la vaste problématique de l'algorithmique et de son implémentation pratique dans une architecture donnée (traitement des erreurs, langage de programmation...)

¹ A base d'atomes froids, d'ions ou d'atomes piégés, de centres NV, de photons, de supraconducteurs, de semi-conducteurs, ...

Les recherches du CEA sur le calcul quantique

Des qubits de grande robustesse

L'ordinateur quantique, susceptible de révolutionner le traitement de certains problèmes hors de portée des ordinateurs classiques existants et même à venir, utilise des registres de bits quantiques dont la cohérence quantique doit être maintenue durant le calcul.

En 2002, les chercheurs du groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (SPEC, CEA-CNRS, Paris-Saclay) dirigé par Daniel Estève ont réalisé le premier circuit électronique qui pourrait servir de brique de base à un futur processeur quantique.

L'expérience, dont les résultats ont été publiés dans *Nature*, a porté sur un bit quantique constitué d'une boucle de métal supraconducteur (aluminium) interrompue par des jonctions tunnel (ou jonctions Josephson). L'état quantique du Quantronium a ainsi été piloté par des séquences d'impulsions radiofréquence, comme peut l'être celui d'un atome par des impulsions laser. Des algorithmes quantiques ont ainsi été implémentés dans des processeurs élémentaires.

Cette équipe a aussi introduit les systèmes hybrides à base de bits quantiques supraconducteurs et de centres colorés dans le diamant combinant le traitement et le stockage de l'information quantique. Aujourd'hui, les travaux du groupe portent plus particulièrement sur la combinaison de circuits supraconducteurs avec des systèmes quantiques microscopiques, des spins électroniques et nucléaires, dont la cohérence quantique est meilleure.

Portée par Daniel Estève, la chaire industrielle Atos-CEA (soutenue par l'ANR), baptisée « Nasniq » (Nouvelle architecture de spins nucléaires pour l'information quantique), a pour ambition d'explorer cette nouvelle voie pour développer l'ordinateur quantique.

Des architectures tolérantes aux fautes à base de qubits en technologie CMOS silicium

Le CEA-Leti et l'Institut Nanosciences et cryogénie (Inac, CEA/UGA) ont franchi une étape importante vers la fabrication à grande échelle de boîtes quantiques (qubits), briques élémentaires des futurs processeurs de calcul quantique : le CEA et ses partenaires ont ainsi annoncé en mars dernier la mise au point d'un procédé pour obtenir des galettes de silicium enrichi en silicium 28 qui peuvent servir de support en vue de produire, en série, des milliers de boîtes quantiques. Cette étape permet un procédé utilisant l'isotope silicium 28, compatible avec les chaînes de production industrielles aux normes CMOS. Elle suit la réalisation du premier qubit silicium en technologie industrielle CMOS en 2016.

Une diversité d'activités complémentaires

Les équipes du CEA poursuivent aussi des recherches dans d'autres domaines, complémentaires et indispensables à l'émergence des technologies de l'ordinateur quantique et de l'ingénierie quantique : l'électronique cryogénique, la nano-implantation contrôlée d'ions dans les matériaux, des sources de photons micro-ondes intriqués et des briques technologiques permettant d'utiliser des



photons et des électrons comme systèmes quantiques, des sources électroluminescentes à molécules organiques uniques, des dispositifs spintroniques en régime quantique.

Des partenariats publics privés

Recherche publique

La France mène une recherche de premier plan mondial dans les domaines du flagship quantique, particulièrement au sein du CEA, du CNRS, de l'Inria et sur plusieurs sites universitaires, dont Paris, Paris-Saclay et Grenoble. Le CEA développe des collaborations avec la plupart de ces acteurs.

Atos-Bull

Le CEA a développé des collaborations de longue date avec Atos-Bull en calcul intensif et pour la conception conjointe de supercalculateurs ; plus récemment le partenariat s'est élargi aux méthodes d'analyse de données industrielles et l'apprentissage (chaire ENS-CEA-Atos lancée en 2016). La collaboration se prolonge aujourd'hui sur l'informatique quantique (chaire ANR-CEA-Atos lancée en 2018).

L'écosystème de R&D sur le semi-conducteur en appui

L'écosystème grenoblois sur le calcul quantique à base de silicium s'est structuré autour de celui de la recherche du semi-conducteur (CEA, Soitec, STMicroelectronics, Atos...). Grâce à de nombreux projets supportés par des fonds européens ou du gouvernement français, l'Institut Néel au CNRS, les départements de recherche fondamentale du CEA et le CEA Leti ainsi que l'Université Grenoble Alpes travaillent désormais en collaboration avec les industriels sur les thématiques allant de l'optimisation du qubits à la conception des algorithmes qui sauront tirer avantage des performances propres au silicium.

22 mai 2018 : Atos et le CEA lancent une chaire industrielle sur l'informatique quantique, avec le soutien de l'ANR

Atos et le CEA ont inauguré le 22 mai dernier une chaire industrielle, cofinancée par l'Agence nationale de la recherche (ANR), dans le but de développer la recherche et l'innovation en information quantique.

Portée par Daniel Estève (1), la chaire industrielle, baptisée « Nasniq » (Nouvelle architecture de spins nucléaires pour l'information quantique), a pour ambition de développer une voie hybride originale vers l'ordinateur quantique en combinant des systèmes microscopiques très quantiques avec des circuits électriques.

Les technologies quantiques représentent un enjeu de souveraineté qui nécessite aujourd'hui d'importants efforts de recherche et développement, couplant équipes académiques et entreprises.

La chaire industrielle Nasniq combinera les efforts de recherche fondamentale portés par l'équipe du Spec (CEA-CNRS) aux développements d'Atos sur la simulation algorithmique, renforçant par ailleurs les synergies entre toutes les activités du CEA dans ce domaine. En outre, la chaire assurera une veille technologique nécessaire dans l'appropriation de ce domaine innovant.

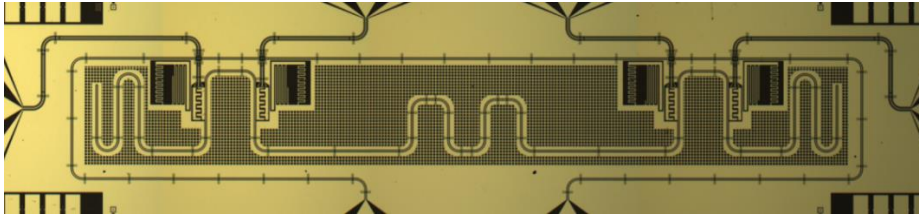
Un programme de R&D fondamentale et appliquée

Le programme de la chaire industrielle Nasniq doit permettre de relever plusieurs défis :

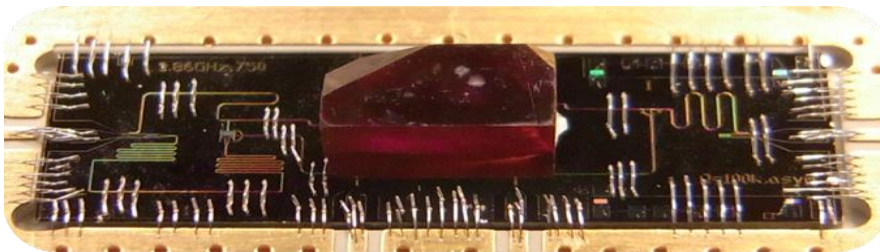
- ▶ Concevoir et tester de nouveaux types de qubits et mieux maîtriser la cohérence quantique : les équipes du Spec travaillent à la maîtrise de la cohérence quantique en développant des bits quantiques plus robustes ;
- ▶ Le logiciel quantique pour les qubits hybrides : Atos apportera son expertise en logiciel et algorithmie quantiques, ainsi qu'en simulation numérique, pour le développement de nouveaux logiciels adaptés aux qubits nucléaires ;
- ▶ Le programme prévoit aussi la protection pertinente et la valorisation (brevets) des « technologies hybrides » de circuit quantique, dont le groupe Qantronique du Spec est aujourd'hui l'un des leaders mondiaux.

Du point de vue de la recherche appliquée, les équipes mobilisées vont aussi valoriser dans d'autres domaines des technologies initialement mises au point pour l'information quantique, par exemple en résonance paramagnétique électronique (RPE), spectroscopie très utilisée en chimie et en biologie, où de remarquables gains en sensibilité sont attendus.

En renforçant les échanges entre les équipes de recherche et industrielles, la chaire Nasniq permettra également de former les futurs ingénieurs et chercheurs dans le domaine.



Un processeur quantique composé de quatre qubits, réalisé et mis en œuvre au groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (unité mixte de recherche CEA - CNRS, au CEA Paris-Saclay) © CEA



Circuit hybride supraconducteur - optique quantique développé, réalisé et mis en œuvre au groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (unité mixte de recherche CEA - CNRS, au CEA Paris-Saclay) Au centre un diamant porteur d'un ensemble de centres azote-lacune, dont le spin est porteur de l'information quantique. © CEA

20 mars 2018 : un substrat en vue de la production en série de composants

Le CEA et ses partenaires ont mis au point un procédé pour obtenir des galettes de silicium enrichi en silicium 28 qui peuvent servir de support en vue de produire, en série, des milliers de boîtes quantiques. Cette étape esquisse un procédé compatible avec les chaînes de production industrielles aux normes CMOS.

Le CEA-Leti et l'Institut Nanosciences et cryogénie (Inac, CEA/UGA) ont franchi une étape importante vers la fabrication à grande échelle de boîtes quantiques (qubits), briques élémentaires des futurs processeurs de calcul quantique.

Les chercheurs ont réussi à obtenir, sur des plaques (ou galettes) de silicium, une fine couche d'isotope 28 du silicium (^{28}Si) dont le degré de pureté est très élevé et dont la structure cristalline est d'une qualité comparable à celle des films minces généralement fabriqués à partir de silicium naturel.

Un isotope du silicium pour augmenter la fidélité des qubits

Le silicium naturel, très majoritairement composé de Si^{28} , est couramment utilisé dans l'industrie électronique. Il contient cependant 4,67 % d'isotope 29. Or, cet isotope présente un spin nucléaire qui limite la cohérence des bits quantiques (qubits) codés sur les spins électroniques, générant des erreurs de calcul (voir encadré 1).

« C'est pour éviter les pertes de cohérence que nous mettons en œuvre nos technologies sur un silicium appauvri en ^{29}Si . Nous avons ainsi créé, sur des plaques de silicium de 300 mm, une couche de l'ordre de 30 nm d'épaisseur dont la teneur en ^{29}Si est inférieure à 0,006 % et dont la surface est suffisamment lisse pour subir dans de bonnes conditions les étapes successives de dépôts de matériaux, nécessaires à la fabrication de composants », explique Marc Sanquer (Inac).

Une production massive de qubit nécessaire pour les futurs processeurs

Ce résultat a été obtenu par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) sur une plateforme pré-industrielle utilisant des galettes de silicium de diamètre 300 mm, standard largement utilisé sur les lignes de production de masse de l'industrie microélectronique. Le gaz de silicium enrichi en isotope 28 utilisé en CVD a été fourni par l'institut de chimie des substances de haute pureté de l'Académie des sciences de Russie, avec le soutien de la société Air liquide.

« La prochaine étape consistera à réaliser sur de tels substrats des qubits dont la fidélité devrait être nettement supérieure à celle de qubits que nous avons déjà obtenus précédemment sur silicium naturel. Et toujours au plus près du standard industriel », souligne Louis Hutin (CEA Leti) (voir encadré 2). « La production massive de qubits est indispensable car un processeur électronique quantique devra intégrer de très nombreux qubits pour dépasser la performance des calculateurs classiques disponibles actuellement », poursuit M. Hutin.

Une R&D désormais européenne

Ce résultat doit faire partie des contributions du CEA au vaste programme européen *Flagship On Quantum Technology* (H2020), notamment grâce à son expertise scientifique et technologique, à ses partenariats industriels et académiques associées à sa plateforme silicium 300 mm, en cours d'installation dans les salles blanches du Leti, à Grenoble.

Une R&D amont et aval

Les équipes grenobloises du CEA avait déjà la maîtrise de la fabrication de qubits dans un procédé utilisant une plateforme silicium sur isolant CMOS 300 mm (b). Dans un article publié dans *Nature PJ Quantum Information* (b), elles démontrent qu'un spin électronique dans un transistor peut être manipulé par des signaux électriques. En amont, les physiciens du CEA à Saclay avaient déjà annoncé la mise au point d'un qubit dans un circuit électrique (c) dès 2002, ainsi que celle d'un dispositif de lecture fiable des qubits (d) en 2009.

- (a) "A CMOS silicon spin qubit", arXiv:1605.07599 *Nature Communications* 7, Article numéro : 13575 (2016) doi:10.1038/ncomms13575
- (b) "Electrically driven electron spin resonance mediated by spin-valley-orbit coupling in a silicon quantum dot", *Nature JP Quantum Information* (2018) 4:6; doi:10.1038/s41534-018-0059-1
- (c) D. Vion,* A. Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Esteve, M. H. Devoret *Science*, 296 (2002) 886
- (d) "Single-shot qubit readout in circuit quantum electrodynamics", François Mallet, Florian R. Ong, Agustin Palacios-Laloy, François Nguyen, Patrice Bertet, Denis Vion & Daniel Esteve, *Nature Physics* (2009), published online: 27 September 2009.



Les chercheurs du CEA franchissent une étape clef pour la réalisation de bits quantiques silicium, composants élémentaires d'un processeur quantique, en série et aux standards de l'industrie microélectronique © Jayet/CEA

3 mai 2018 : un projet de collaboration franco-australien

Le Premier ministre australien, Malcolm Turnbull, et le président français, Emmanuel Macron, ont annoncé le 2 mai 2018 un projet de nouvelle collaboration entre la première entreprise australienne dédiée à l'informatique quantique, Silicon Quantum Computing Pty Ltd (SQC), et le CEA. Ce partenariat franco-australien est une nouvelle étape concrète dans le développement d'un ordinateur quantique à base de silicium.

Le Protocole d'accord, signé le 2 mai, fixe le cadre d'un projet visant à former une entreprise commune dans le domaine des technologies d'informatique quantique à base de circuits CMOS en silicium, dans le but de focaliser et d'accélérer les développements de cette technologie, ainsi que pour saisir les opportunités de commercialisation - en réunissant les efforts français et australiens pour développer un ordinateur quantique.

SQC est un leader mondial de l'informatique quantique à base de silicium, son programme de développement technologique est dirigé par les professeurs Michelle Simmons, Andrew Dzurak, Andrea Morello et Sven Rogge. Exploitant la propriété intellectuelle développée au CQC²T (*Australian Centre of Excellence for Quantum Computation and Communications Technology*), SQC travaille sur des approches parallèles avec des qubits à un seul atome et des qubits fabriqués à l'aide de la technologie CMOS à base de silicium. Sous la direction du professeur Dzurak, SQC détient une expertise de tout premier plan au niveau mondial dans la conception et l'intégration de composants pour puces quantiques basées sur la technologie CMOS à base de silicium. Ce Protocole d'accord porte sur cette approche CMOS à base de silicium.

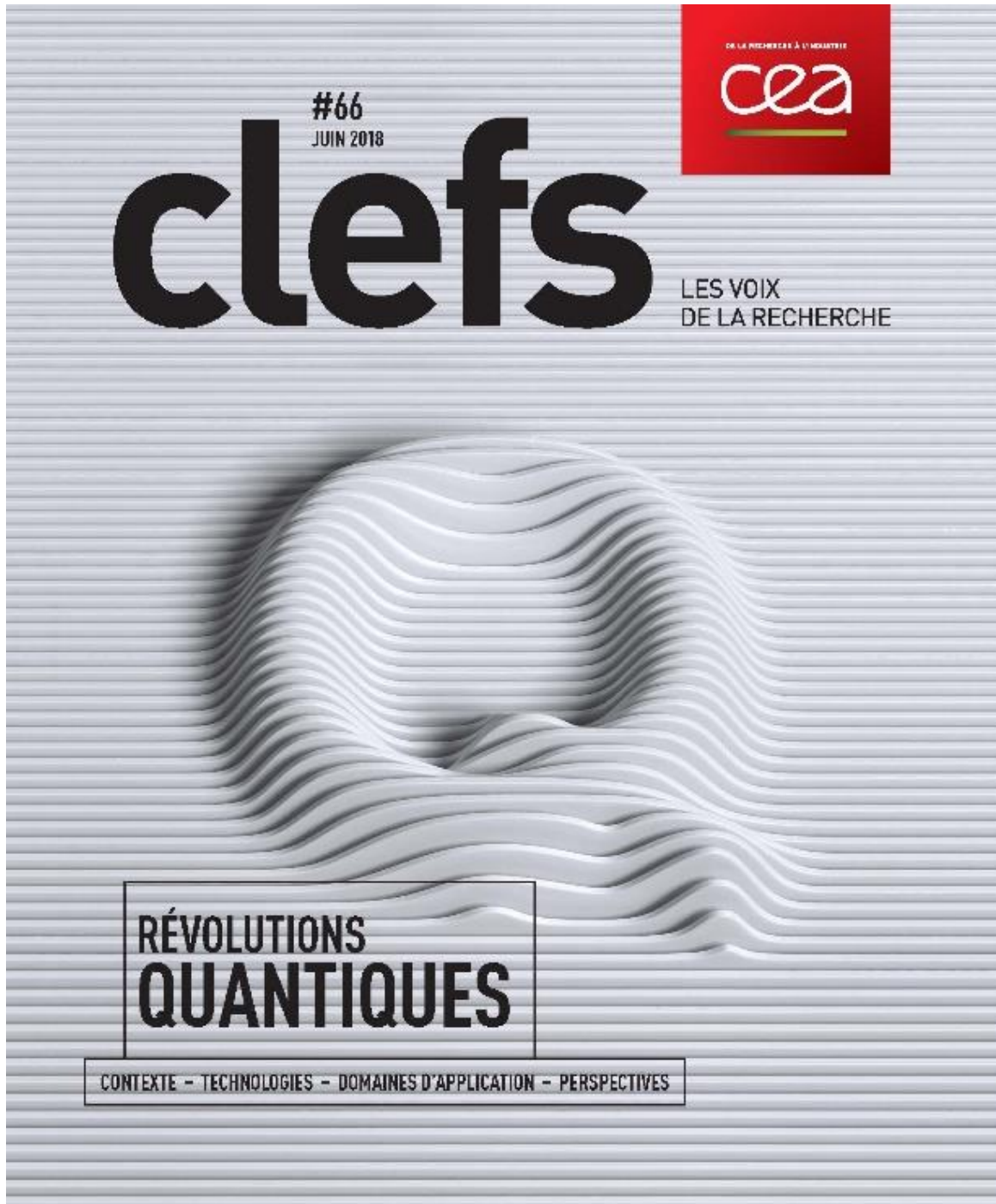
En tant que société de commercialisation des programmes d'informatique quantique à base de silicium pour le CQC²T, SQC développe actuellement un portefeuille d'opportunités - sous forme d'entreprises communes et de partenariats -, visant à maintenir le leadership australien dans la commercialisation des technologies quantiques à base de silicium et la production des systèmes en Australie. SQC travaille actuellement sur trois approches pour la création de systèmes quantiques à base de silicium. L'entreprise commune envisagée par le Protocole d'accord permettrait à SQC de travailler avec l'expertise du CEA sur les composants CMOS sur silicium, avec pour ambition de former ainsi un leader dans la course mondiale à la fabrication et à l'industrialisation des matériels informatiques quantiques.



À propos de Silicon Quantum Computing

Les travaux de Silicon Quantum Computing Pty. Ltd. (SQC) visent à créer et à commercialiser un ordinateur quantique basé sur la propriété intellectuelle de premier plan acquise auprès du CQC²T (*Australian Centre of Excellence for Quantum Computation and Communication Technology*). SQC dispose actuellement de plusieurs plateformes parallèles pour la création d'un ordinateur quantique à base de silicium s'appuyant sur des donneurs de phosphore atomiquement modifiés, des points quantiques de technologie CMOS et hybrides. SQC appartient au gouvernement australien, à la Commonwealth Bank of Australia (CBA), à Telstra, à l'Université de Nouvelle-Galles du Sud et au gouvernement de Nouvelle-Galles du Sud.

Clefs N° 66 : Révolutions quantiques



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

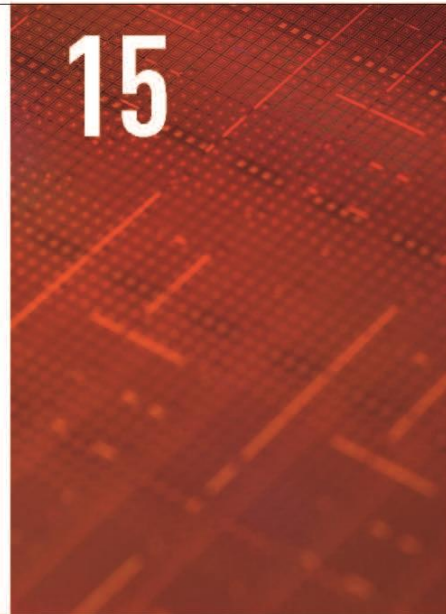
Aucune théorie n'a jamais été aussi fructueuse en termes de compréhension de l'Univers qui nous entoure et d'applications. Notre société, celle de l'information et de la communication, est l'enfant de la mécanique quantique.

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

Quelques repères chronologiques

1982

Le physicien Richard Feynman a l'intuition de l'ordinateur quantique, fondé sur la possibilité pour un système quantique de se trouver dans une superposition d'un grand nombre états en même temps, d'où la possibilité de calculs massivement parallèles.

1999

Des chercheurs japonais de la société NEC, via des technologies développées par le groupe Quantronique du CEA, observent pour la première fois un circuit supraconducteur dans un état de superposition quantique potentiellement utilisable comme qubit.

2002

Le groupe Quantronique du CEA met au point un qubit supraconducteur, le quantronium, dont on peut lire l'état en un coup, et non plus en moyenne, et dont la durée de vie (temps de cohérence) permettrait de s'en servir pour réaliser des opérations logiques.

2004

John Martinis, ancien post-doc au CEA, réalise à l'Université de Californie une porte logique à deux qubits, dite iSWAP, qui transforme un état 01 en une superposition quantique des états 01 et 10.

2012

Le groupe Quantronique du CEA démontre, grâce à un système à deux qubits supraconducteurs, la plus grande efficacité de l'algorithme quantique de Grover pour retrouver un objet parmi N.

2014-2015

Démonstration de codes correcteurs d'erreurs quantiques primitifs dans plusieurs groupes de recherche.

2016

Des chercheurs du CEA démontrent que les très petits transistors obtenus par la technologie silicium sur isolant permettent de réaliser un qubit intégrable ; de quoi mettre l'ordinateur quantique à portée de l'industrie électronique.

2017

Atos-Bull commercialise le simulateur de calcul quantique.

2018

Le CEA et ses partenaires mettent au point un procédé pour obtenir des galettes de silicium enrichi en silicium 28 qui peuvent servir de support en vue de produire, en série, des milliers de boîtes quantiques. Cette étape esquisse un procédé compatible avec les chaînes de production industrielles aux normes CMOS.



Lexique

Physique quantique

Ensemble de lois qui s'appliquent aux systèmes physiques. Les physiciens du début du XXème siècle comprennent que les échanges d'énergie sont quantifiés. Bohr montre que l'atome n'évolue pas comme un système classique capable d'échanger de l'énergie de manière continue, mais qu'il présente plusieurs états « quantiques » ayant chacun une énergie bien définie (comme des paliers définissant un niveau atomique). Dans le monde macroscopique, le comportement quantique des systèmes physiques passe généralement inaperçu. Il règne en maître sur la matière à l'échelle des particules comme les électrons, les photons et les composants du noyau atomique.

Bit quantique (ou qubit)

Le bit quantique est l'unité élémentaire pouvant porter une information quantique. Comme le 1 et le 0 sont les deux états d'un bit classique ordinaire, un qubit est la superposition cohérente d'au moins deux états de base quantiques, que l'on peut noter $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Dans un état superposé, une porte logique quantique fournit la même superposition des transformés des états de base.

Intrication

Intrication : l'état quantique d'un système formé de plusieurs sous-systèmes peut être un état dans lequel chaque sous-système est dans un état quantique défini. Mais, et c'est le cas le plus général, il peut être dans une superposition de tels états et ne plus correspondre à un état quantique bien défini pour chaque sous-système. La démonstration en 1982 par Alain Aspect et son équipe de la réalité des corrélations quantiques dans une paire de photons intriqués se séparant, et ce même à grande distance, a démontré l'existence de l'intrication non-locale rejetée par Einstein.

Superposition

Principe, énoncé à travers l'exemple du chat vivant et mort de Schrödinger, selon lequel un même système quantique peut être placé dans une superposition d'états correspondant à des valeurs différentes d'une observable (chat mort / chat vivant). Un électron peut être « physiquement » à plusieurs endroits à la fois avec une certaine probabilité : il a X % de probabilité d'être ici et Y % d'être là, etc. En physique classique, l'état d'un système est parfaitement défini et on ne peut pas observer une telle superposition d'états. Les chercheurs veulent utiliser cette propriété de superposition des états pour stocker et traiter des données de façon massivement parallèle, plus rapidement que dans l'électronique classique.

Cohérence / Décohérence

Lorsqu'il est placé dans une superposition d'états, un système oscille indéfiniment entre les différents états qui le constituent ; on le dit « cohérent ». Mais, toute interaction avec le monde extérieur, par de très fines interactions fluctuantes avec l'environnement ou la mesure des propriétés du système, tend à modifier l'état quantique bien préparé. Ceci déphase de façon aléatoire les fonctions

d'onde des états de la superposition initiale, qui est brouillée et perd ainsi sa cohérence : c'est la décohérence. Les chercheurs tendent à identifier des matériaux et des conditions physiques qui permettent à des qubits de conserver leur cohérence le plus longtemps possible.

Spintronique

Le spin est une propriété quantique d'une particule qui ne présente pas d'équivalent dans la physique classique contrairement à la position ou l'impulsion. Cette propriété permet de décrire l'interaction de la particule avec les champs magnétiques. Elle est souvent assimilée au moment cinétique de la rotation d'un objet sur lui-même. La spintronique est la science qui consiste à exploiter les propriétés quantiques de spin de l'électron. Elle offre des possibilités d'applications dans la réalisation de capteurs de très grande sensibilité qui ont révolutionné le stockage magnétique de l'information.

Loi de Moore

Durant les années 70, Gordon Moore, fondateur de la société américaine Intel et inventeur du premier microprocesseur (Intel 4004, en 1971), observant que le nombre de transistors présents dans les microprocesseurs double tous les 18 mois, propose cette règle pour établir la feuille de route de la microélectronique, la célèbre « loi de Moore ». Cette feuille de route (roadmap) établit avec précision les objectifs de réduction de taille des transistors. Autrement dit, la puissance de calcul de ces composants allait continuer de doubler pour une même surface ! Cette loi n'a quasiment pas été démentie jusqu'à ce jour.

Les progrès constants réalisés, associés à une production massive de ces composants, ont permis de réduire radicalement les coûts des composants microélectroniques et donc de tous les produits ayant recours à ces composants : ordinateurs, smartphone, téléviseurs, caméras, appareils photos, etc.

Cryptographie et communication quantique

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). C'est une technologie quantique déjà relativement mûre qui donne lieu à des systèmes développés et commercialisés par quelques petites entreprises. Ils permettent 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.

Biographie des intervenants

Philippe Chomaz



Physicien théoricien, Philippe Chomaz est directeur scientifique exécutif au sein de la Direction de la recherche fondamentale du CEA.

Il débute sa carrière au CNRS puis au Laboratoire national Lawrence-Berkeley. De 1991 à 2008, il exerce différentes responsabilités au Grand accélérateur national d'ions lourds (Ganil) à Caen et participe à la préparation de l'installation Spiral 2, destinée à produire des noyaux qui n'existent pas à l'état naturel sur Terre pour déchiffrer les secrets de l'Univers. Il dirige ensuite l'Institut de recherche sur les lois

fondamentales de l'Univers (Irfu) à Saclay, avant de rejoindre la Direction de la recherche fondamentale.

En parallèle, Philippe Chomaz a toujours été fortement engagé dans la vulgarisation de la connaissance scientifique. Il instaure les bars des sciences, ce qui lui vaut en 2001 le prix Jean-Perrin de la société française de Physique.

Maud Vinet



Maud Vinet est en charge du programme avancé sur la technologie microélectronique CMOS, depuis 2013. Auparavant, elle a dirigé une équipe de R&D au centre de recherche IBM Nanotech (US, Albany) et a participé au développement de la technologie européenne FD-SOI, en passe de devenir un nouveau standard international pour la microélectronique.

Au-delà de la R&D incrémentale et de rupture sur la technologie CMOS, Maud Vinet et son équipe explorent aussi les interactions entre l'architecture des dispositifs et des systèmes à travers la recherche en informatique neuromorphique et en électronique quantique.

Daniel Estève



Daniel Estève dirige le groupe Quantronique au CEA Paris-Saclay. Il mène ses travaux de recherche en physique mésoscopique et en particulier dans le domaine du transport de la cohérence quantique et des circuits électriques quantiques. Il est membre de l'Académie des sciences depuis 2005.



Pour aller plus loin

L'essentiel sur la microélectronique

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/essentiel-sur-microelectronique.aspx>

Dossier sur la microélectronique

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/microelectronique.aspx>

L'essentiel sur la mécanique quantique

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-mecanique-quantique.aspx>

L'essentiel sur la physique quantique

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/complements-nanomonde/physique-quantique.aspx>



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



WWW.CEA.FR