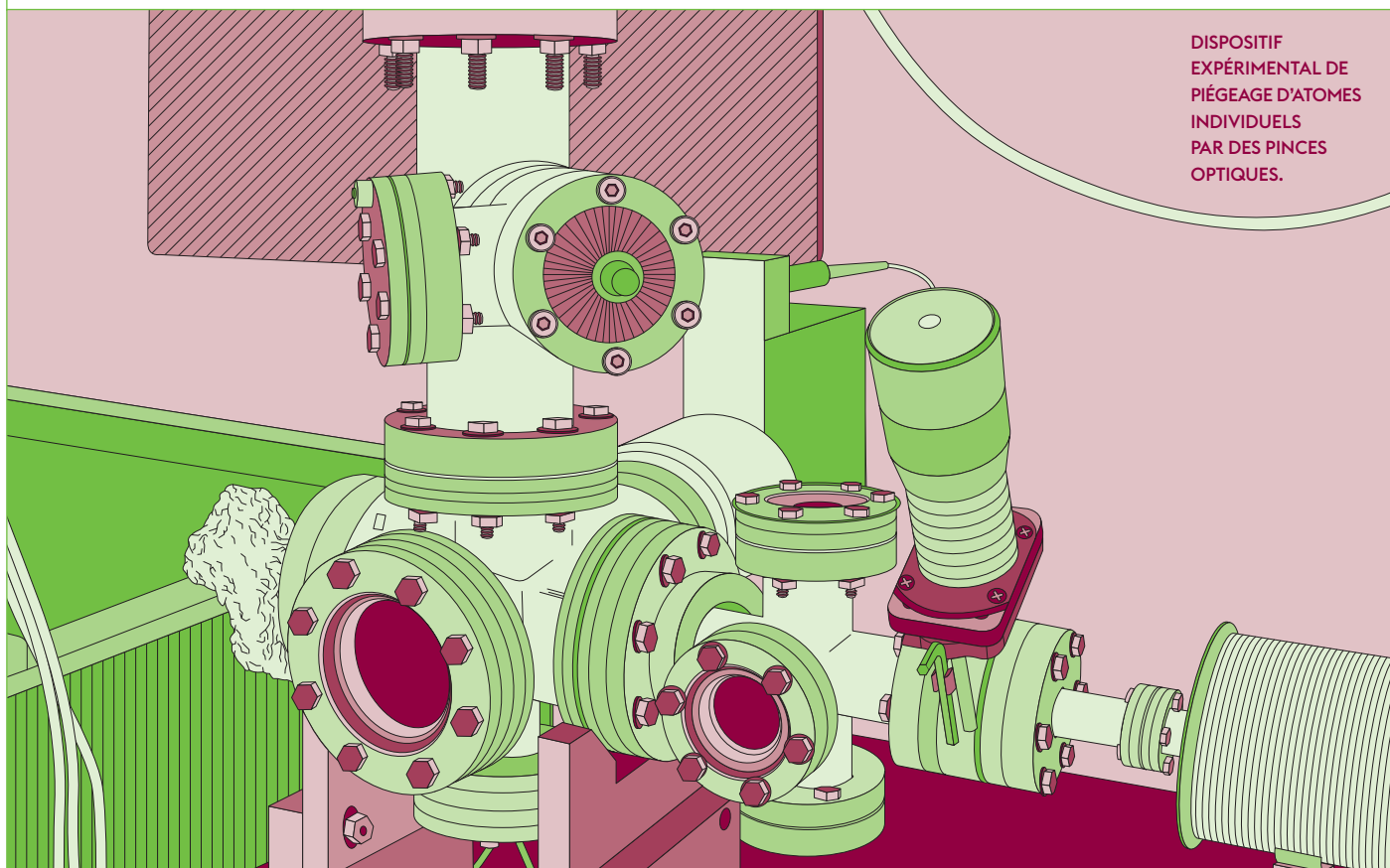




Titre

Promesses et progrès de l'ingénierie quantique



DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DE PIÉGEAGE D'ATOMES INDIVIDUELS PAR DES PINCES OPTIQUES.

Capteurs quantiques, simulations quantiques, informatique quantique, cryptographie quantique... Les technologies quantiques n'ont cessé de se développer ces dernières années et forment aujourd'hui des champs d'applications en pleine ébullition.

Dualité onde-particule, superposition d'états, intrication... À l'échelle de l'infiniment petit, les principes qui régissent le fonctionnement des atomes, des particules ou des rayonnements, ne répondent plus aux lois traditionnelles de la mécanique, de la thermodynamique ou de l'électromagnétisme, et bousculent notre rapport sensible au monde.

«La physique quantique a été inventée au début du XX^e siècle, au prix d'une révision déchirante des concepts de la physique dite "classique", rappelle Daniel Estève, responsable du groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (SPEC) au CEA. Cette première révolution quantique a permis d'expliquer l'interaction de la lumière avec la matière, le comportement des atomes et de leurs édifices plus complexes, jusqu'aux propriétés de la matière condensée.

Elle a aussi permis de maîtriser les matériaux et d'exploiter des propriétés aussi étonnantes que la supraconductivité. » Les applications les plus innovantes (transistors, lasers, circuits intégrés...) ont ainsi pu émerger au milieu du siècle dernier et bouleverser nos sociétés.

Un domaine de recherche effervescent
Une deuxième révolution quantique tire aujourd'hui parti de ces propriétés pour concevoir de nouvelles technologies basées sur le traitement et la manipulation d'objets quantiques. «C'est un domaine de recherche en pleine effervescence!» confie Philippe Grangier, responsable du groupe d'Optique quantique au Laboratoire Charles-Fabry de l'Institut d'Optique Graduate School. Le FET "Flagship" quantum technologies, lancé par la Commission européenne fin 2017 et assorti d'une enveloppe d'un milliard d'euros sur dix ans, vient d'ailleurs renforcer ce développement et favoriser le transfert vers l'industrie.

En Île-de-France, les recherches s'organisent au sein du réseau SIRTEQ (Sciences et ingénierie en région Île-de-France pour les technologies quantiques). Ce réseau regroupe une centaine d'équipes issues d'une trentaine de laboratoires – dont plus d'un tiers compose

également le projet IQUPS de l'Université Paris-Saclay (voir Focus page suivante) – et s'intéresse aux quatre grands axes thématiques exposés ci-dessous.

1 – Dépasser la sensibilité limite des capteurs quantiques

En exploitant la spécificité des états quantiques de la matière ou du rayonnement, les chercheurs conçoivent des capteurs, d'une très grande précision, qui trouvent des applications dans les horloges atomiques, les accéléromètres, les gyromètres, les gravimètres ou les magnétomètres ultra-résolvants. «Les capteurs quantiques utilisent des superpositions d'états quantiques qui sont fragiles à l'environnement et très sensibles aux perturbations extérieures, explique Patrice Bertet du groupe Quantronique. Habituellement, cette fragilité mène à une perte de cohérence. Là, on s'en sert pour mesurer très précisément un paramètre, comme le champ magnétique.»

Avec ses collègues, il explore la résonance paramagnétique électronique en régime quantique, afin d'augmenter la sensibilité des capteurs au-delà d'une frontière naturelle appelée «limite quantique standard» et réussir à détecter un seul spin électronique. Les cher-

cheurs emploient des circuits supraconducteurs refroidis à ultra-basse température (entre 10 et 20 mK) pour diminuer le bruit thermique et augmenter le signal émis. Grâce à cette technique, ils ont récemment atteint une sensibilité de 65 spins détectés en une seconde.

2 – Mimer des systèmes quantiques complexes

Comprendre et prédire les effets macroscopiques de systèmes quantiques complexes contenant un très grand nombre de particules constitue un défi que ne peuvent relever même les plus puissants supercalculateurs actuels. «Il y a beaucoup de systèmes quantiques inaccessibles à la mesure, parce qu'ils sont très loin ou qu'on ne sait pas les manipuler, comme une étoile à neutrons, avance Philippe Grangier. L'idée est de les remplacer par d'autres systèmes quantiques qu'on contrôle bien, d'y reproduire des comportements physiques et de faire des correspondances.»

Pour exemple, Antoine Browaeys, du groupe d'Optique quantique, et ses collègues ont développé une technique capable de piéger des atomes froids uniques dans des réseaux optiques, de les positionner et de les maintenir de façon contrôlée dans un réseau bidimensionnel à l'aide de pinces optiques, et de les observer par fluorescence. Dernièrement, ils ont réussi à modéliser des réseaux 3D comprenant jusqu'à 72 atomes uniques piégés.

3 – L'informatique quantique et la difficile stabilité des qubits

«L'ordinateur quantique, c'est LE sujet à la mode», résume Philippe Grangier. En cause : la promesse d'effectuer à terme des calculs bien plus rapidement et efficacement que les ordinateurs classiques et d'accéder à des niveaux de traitement des données encore difficiles à appréhender. L'information à traiter réside dans des cases mémoires élémentaires : les bits quantiques (ou qubits). Les verrous technologiques sont d'augmenter leur temps de cohérence et de corriger leurs erreurs. Pour les lever, les chercheurs explorent différents supports physiques de qubits (supraconducteurs, ions piégés, photons, spins d'électrons...) dont aucun pour le moment n'est privilégié.

4 – Des communications ultra-sécurisées

Maintenir la sécurité et l'inviolabilité des données transférées sur Internet, le long de fibres optiques, représente un vrai challenge. Aujourd'hui, l'échange sécurisé de données repose sur la cryptographie à clé publique (RSA) et l'impossibilité de factoriser de très grands nombres. Mais les progrès des algorithmes et l'éventuelle apparition d'un ordinateur quantique, capable de cas-

ser ce code, menacent le système. C'est là qu'intervient la cryptographie quantique à clé secrète. «Dans un canal quantique, on transmet par exemple des photons polarisés codant pour des bits, explique Philippe Grangier. Toute tentative d'interception du message va perturber cette polarisation et introduire des erreurs dans la transmission.» En mesurant la quantité d'erreurs, il devient alors possible de borner supérieurement la quantité d'informations connue par l'espion. «Souvent, on dit que la cryptographie quantique permet de détecter l'espion. C'est vrai, mais insuffisant : le protocole quantique quantifie surtout la connaissance de l'espion. Si elle est assez petite, on obtient une clé sans erreur et absolument sûre. Si elle est trop grande, il n'y a plus de clé et la ligne est coupée», conclut le chercheur.

www.sirteq.org
www.qt.eu

Publications

- S. Probst et al. Inductive-detection electron-spin resonance spectroscopy with 65 spins/Hz sensitivity, Applied Physics Letters 111 (20), 2017.
- Daniel Barredo et al. Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom, Nature vol. 561, (79 – 82), 2018.

Portrait

Philippe Grangier



© VMI/UPSaclay

L'idée est d'échanger des informations sur Internet en garantissant le secret grâce à la mécanique quantique.

Philippe Grangier est responsable du groupe d'Optique quantique au sein du Laboratoire Charles-Fabry de l'Institut d'Optique Graduate School depuis 1988. Il est également coordinateur du réseau Sciences et ingénierie en région Île-de-France pour les technologies quantiques (SIRTEQ).

Actuellement, il consacre ses recherches au traitement quantique de l'information et à la mise au point de nouveaux protocoles de cryptographie quantique, ainsi qu'à la manipulation d'atomes ou de photons individuels afin d'effectuer des opérations logiques simples avec des bits quantiques.

» focus

Une chaire industrielle pour booster l'informatique quantique

Créée en mai 2018 et cofinancée par l'Agence nationale de la recherche (ANR), la chaire industrielle Nasniq (Nouvelle architecture de spins nucléaires pour l'information quantique) associe Atos, grande entreprise française de services du numérique, et le CEA, pour le développement de recherches et d'innovations dans le domaine du traitement et du stockage de l'information quantique, de la simulation algorithmique et du calcul intensif.

Portée par Daniel Estève, responsable du groupe Quantronique au Service de physique de l'état condensé du CEA, la chaire a pour ambition de développer l'ordinateur quantique.

Son programme prévoit notamment de concevoir et de tester de nouveaux types de bits quantiques (qubits), plus robustes, et de mieux maîtriser la cohérence quantique; d'élaborer de nouveaux logiciels quantiques adaptés aux qubits hybrides; de valoriser dans d'autres domaines des technologies prévues initialement pour l'informatique quantique.

www.iramis.cea.fr/spec/Pres/Quantro/static/
www.atos.net/fr

» focus

IQUPS, appuyer l'ingénierie quantique au sein de Paris-Saclay

Lancée début 2017, l'initiative de recherche stratégique IQUPS (Ingénierie quantique à l'Université Paris-Saclay) a pour but de structurer et de consolider la recherche réalisée au sein de l'Université dans le domaine de l'ingénierie quantique et d'accroître sa visibilité à l'international. Cela concerne 25 équipes et 119 chercheurs issus de 8 laboratoires de l'Université Paris-Saclay. IQUPS cherche à susciter des collaborations, à favoriser l'émergence de nouvelles idées et le développement d'installations destinées à la fabrication de dispositifs quantiques. IQUPS organise également des sessions de cours, labellisés par les écoles doctorales et ouverts aux chercheurs, aux doctorants et aux post-docs.

www.universite-paris-saclay.fr/fr/recherche/projet/iqups-ingenierie-quantique#section-introduction