

TABLE RONDE LE QUANTIQUE ET SES APPLICATIONS DANS LE SECTEUR ASD

L'ONERA et la deuxième révolution quantique

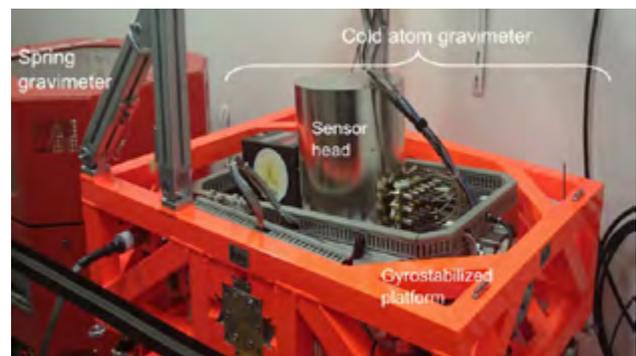
PAR SYLVAIN SCHWARTZ, DIRECTEUR DE RECHERCHE ONERA ET RESPONSABLE DU LABORATOIRE QTECH

Elaborée au début du XX^e siècle, la théorie quantique permet de décrire le comportement de la matière et de la lumière à l'échelle des particules élémentaires. Elle a tout d'abord rencontré de grands succès dans le domaine de la science fondamentale, en permettant par exemple de comprendre la stabilité de la matière, l'origine des liaisons chimiques, la superfluidité et la supraconductivité. Elle a ensuite permis, dans la seconde partie du XX^e siècle, des développements technologiques qui ont radicalement transformé la société. Ainsi le développement des dispositifs à base de semi-conducteurs, qui ont entraîné l'avènement de la microélectronique et des télécommunications optiques, a-t-il été rendu possible par la théorie quantique. Il en va de même pour le laser ou l'horloge atomique, qui ont ouvert la voie à de nombreuses applications telles que la chirurgie laser, les lecteurs de codes-barres ou les systèmes de positionnement type GPS. On parle parfois à propos de ces applications de première révolution quantique.

En plus de transformer la société par les applications que nous venons de citer, certains dispositifs issus de la première révolution quantique comme le laser ou les photodétecteurs ont permis aux chercheurs de faire d'immenses progrès dans le contrôle des systèmes quantiques à l'échelle de la particule élémentaire, ce qui s'est notamment matérialisé par une série de prix Nobel français : Claude Cohen-Tannoudji en 1997 pour le piégeage et le refroidissement d'atomes par laser, Serge Haroche en 2012 pour le contrôle et la manipulation des photons individuels et Alain Aspect en 2022 pour ses expériences mettant en œuvre des photons intriqués. A l'heure actuelle, de nombreux laboratoires à travers le monde sont capables de manipuler de façon routinière des systèmes quantiques individuels, qu'ils soient naturels (atomes, ions, photons) ou artificiels (circuits supraconducteurs, centres colorés du diamant ou spins électroniques). On parle, à propos des nouvelles applications technologiques qui pourraient être permises par le contrôle des systèmes quantiques individuels, de deuxième révolution quantique. La plus célèbre de ces applications potentielles est sans aucun doute l'ordinateur quantique, mais il en existe d'autres, à des degrés de maturité technologique variés, dans les domaines des capteurs, de l'imagerie ou des communications sécurisées. L'ONERA travaille actuellement au développement de certaines de ces applications dans le cadre de son laboratoire transverse QTech, inauguré en février 2022 et dédié aux technologies issues de la deuxième révolution quantique pour les domaines aéronautique, espace et défense. On se propose dans ce qui suit de dresser un panorama des recherches actuellement menées au sein du laboratoire QTech, organisé autour de 4 axes : capteurs à atomes froids, optronique quantique, communications quantiques et calcul quantique.

CAPTEURS À ATOMES FROIDS

Le principe de base de ces capteurs est d'utiliser des atomes piégés et refroidis par laser pour venir sonder l'environnement. En fonction de la configuration mise en œuvre, on peut rendre ces atomes sensibles à la gravité, aux accélérations, aux rotations ou aux champs électromagnétiques. A l'ONERA, le capteur à atomes froids le plus abouti et le plus emblématique est le gravimètre GIRAFE (Gravimètre Interférométrique de Recherche à Atomes Froids Embarquable), qui a fait l'objet d'un précédent article dans la revue Trajectoire(s) [1]. Un avantage important de ce type de gravimètre est qu'il ne nécessite pas de calibration, car la mesure du champ de gravité est directement reliée aux propriétés intrinsèques des atomes, ce qui lui confère un caractère absolu. D'autres capteurs à atomes froids, moins matures technologiquement que le gravimètre, sont en cours d'étude à l'ONERA : accéléromètre pour la géodésie spatiale, accéléromètres et gyromètres 3 axes pour la navigation inertielle, capteurs de champs micro-ondes à atomes de Rydberg pour les radars, les communications radiofréquence ou l'imagerie THz.



Le gravimètre à atomes froids GIRAFE à bord du bâtiment océanographique Beautemps-Beaupré

OPTRONIQUE QUANTIQUE

L'ONERA développe depuis de très nombreuses années des applications mettant en œuvre de la lumière laser, par exemple pour la détection à distance (LIDAR) ou l'analyse spectrométrique de gaz. Les états de la lumière associés, appelés états cohérents, peuvent être en très bonne approximation décrits par la théorie classique des équations de Maxwell, et ne nécessitent pas de faire appel au formalisme quantique. Il existe en revanche d'autres états de la lumière (générés par exemple par des cristaux non-linéaires, des atomes ou des dispositifs semi-conducteurs) ayant des propriétés très différentes des états cohérents, et pouvant

potentiellement conduire à de nouvelles applications. Par exemple, les états comprimés de la lumière permettent de réduire le bruit dans les interféromètres optiques, et sont d'ailleurs utilisés pour cela dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles type VIRGO. De même, les paires de photons intriqués (comme celles utilisées dans les expériences d'Alain Aspect) donnent lieu à des corrélations d'origine quantique qui peuvent être exploitées pour sonder un échantillon à une longueur d'onde (typiquement dans l'infrarouge moyen, plus favorable pour certaines applications) tout en effectuant la détection à une autre longueur d'onde (typiquement dans le visible ou le proche infrarouge, où les détecteurs sont beaucoup plus sensibles). Une expérience de spectroscopie fondée sur ce principe est en cours de développement à l'ONERA.

Au-delà des développements expérimentaux, le rôle du laboratoire QTech consiste aussi à apporter une expertise technique à l'Etat ou aux industriels français dans le domaine du quantique. Cela s'illustre par exemple par une récente étude, publiée conjointement avec le laboratoire Kastler Brossel et Sorbonne Université [2], qui a permis de démontrer que l'idée d'utiliser des paires de photons intriqués dans le domaine micro-onde pour améliorer la précision des radars n'était pas applicable en pratique, car l'avantage théorique qui en découle n'est valable que pour des puissances très faibles. Cette étude, qui fait maintenant autorité, a été confirmée par la suite par d'autres études similaires, notamment aux Etats-Unis.

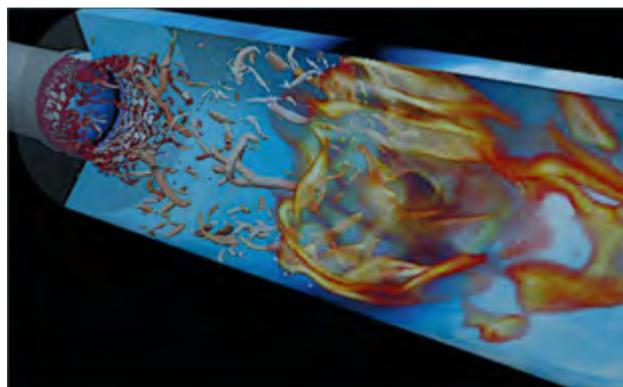
COMMUNICATIONS QUANTIQUES

Une autre application de la lumière quantique concerne la sécurisation des communications. Par exemple, en envoyant un message codé sur un ensemble de photons individuels transmis les uns à la suite des autres, il est possible de garantir a posteriori qu'aucun espion n'a écouté le message. Cela est fondé sur le théorème de non-clonage quantique qui implique qu'il n'est pas possible de dupliquer l'état d'un photon. La seule manière pour un espion de prélever de l'information sur le message consisterait donc à effectuer des mesures sur les photons individuels, ce qui affecterait l'état de ces derniers et révélerait alors la présence de l'espion. Une implémentation possible de ces canaux de communication quantiques consiste à utiliser un satellite permettant de relier entre elles des stations sol. L'ONERA, qui est un acteur reconnu dans le domaine des corrections des effets liés à la turbulence atmosphérique par optique adaptative, travaille actuellement à appliquer cette expertise au domaine des communications quantiques entre une station sol et un satellite, en lien avec des acteurs académiques et industriels du domaine [3].

CALCUL QUANTIQUE

La promesse la plus spectaculaire de la deuxième révolution quantique est sans aucun doute celle de l'ordinateur quantique, qui exploiterait la possibilité de manipuler des superpositions d'états à plusieurs particules (états intriqués) pour implémenter certains algorithmes de façon plus efficace qu'avec un ordinateur classique. En théorie, il suffirait d'être capable de manipuler des états intriqués impliquant « seulement » 50 systèmes quantiques élémentaires (appelés dans ce contexte bits quantiques ou qubits)

pour battre le meilleur des ordinateurs disponibles actuellement. En pratique, le phénomène de décohérence, qui augmente exponentiellement avec le nombre de particules que l'on cherche à intriquer, rend cette tâche très difficile. L'approche suivie à l'ONERA consiste à s'appuyer sur les start-ups françaises qui développent actuellement des calculateurs quantiques (Pasqal et Quandela notamment) pour se concentrer sur le développement d'algorithmes quantiques, dédiés en particulier à la résolution d'équations aux dérivées partielles pour la simulation de la combustion.



L'ONERA étudie par exemple en quoi le calcul quantique pourrait contribuer à ce genre de simulation instationnaire (combustion, domaine aérospatial) dans des conditions industrielles (image issue du calcul classique - Luc-Henry Dorey, DMPE/ONERA & GENCI)

CONCLUSION

La deuxième révolution quantique actuellement en cours pourrait ouvrir la voie à des applications radicalement nouvelles. Avec le laboratoire QTech, l'ONERA entend y prendre pleinement sa part, notamment en ce qui concerne les applications à ses domaines de prédilection que sont l'aéronautique, le spatial et la défense. Dans le contexte actuel de fort intérêt autour des technologies quantiques, il semble également utile de rappeler l'importance du rôle d'expert indépendant que l'ONERA peut jouer auprès de l'Etat et des industriels français, en lien étroit avec les acteurs académiques du domaine.

RÉFÉRENCES

- [1] Alexandre Bresson, Yannick Bidet et Nassim Zahzam, Atomes froids et gravimétrie, *Trajectoire(s)* no. 1, pp. 36-39 (2022)
- [2] Giacomo Sorelli, Nicolas Treps, Frédéric Grosshans et Fabrice Boust, Detecting a Target With Quantum Entanglement, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* vol. 37, no. 5, pp. 68-90 (2022)
- [3] Valentina Marulanda Acosta, Daniele Dequal, Matteo Schiavon, Aurélie Montmerle-Bonnefois, Caroline B. Lim, Jean-Marc Conan et Eleni Diamanti, Improvement of satellite-to-ground quantum key distribution secret key rate with adaptive optics, *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego, CA, USA* (2023).

Site web du laboratoire QTech: w3.onera.fr/qtech ■