

FÉVRIER
2022

Le rêve quantique chinois

Les aspirations d'un géant dans l'infiniment petit

Marc JULIENNE



L’Ifri est, en France, le principal centre indépendant de recherche, d’information et de débat sur les grandes questions internationales. Créé en 1979 par Thierry de Montbrial, l’Ifri est une association reconnue d’utilité publique (loi de 1901). Il n’est soumis à aucune tutelle administrative, définit librement ses activités et publie régulièrement ses travaux.

L’Ifri associe, au travers de ses études et de ses débats, dans une démarche interdisciplinaire, décideurs politiques et experts à l’échelle internationale.

Les opinions exprimées dans ce texte n’engagent que la responsabilité de l’auteur.

ISBN : 979-10-373-0487-2

© Tous droits réservés, Ifri, 2022

Couverture : © ezphoto/Shutterstock.com

Comment citer cette publication :

Marc Julienne, « Le rêve quantique chinois : les aspirations d’un géant dans l’infiniment petit », *Études de l’Ifri*, février 2022.

Ifri

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tél. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : accueil@ifri.org

Site internet : ifri.org

Auteur

Marc Julienne est chercheur, responsable des activités Chine au Centre Asie de l'Ifri. Ses travaux portent principalement sur la politique étrangère, de sécurité et de défense chinoise, ainsi que sur la politique intérieure et l'évolution de l'appareil de sécurité nationale.

Marc Julienne est docteur en science politique et relations internationales de l'Inalco. Précédemment, il a été chercheur à la Fondation pour la recherche stratégique (FRS) pendant quatre ans. Il a aussi été doctorant associé à l'Institut de recherche stratégique de l'École militaire (IRSEM, 2016-2019), et chercheur à Asia Centre (Paris) pendant deux ans. Il a enfin été chercheur invité au Mercator Institute for China Studies (MERICS, Berlin, 2015) et à la Shanghai Academy of Social Sciences (SASS, Shanghai, 2017).

Parmi ses précédentes publications : [« China's Ambitions in Space: The Sky's the Limit »](#), *Études de l'Ifri*, janvier 2021.

Résumé

Domaine peu connu du grand public et relativement difficile d'appréhension tant ses lois sont contre-intuitives, la physique quantique constitue pourtant un enjeu critique dans la compétition stratégique internationale. Les grandes puissances scientifiques s'organisent pour percer les mystères de cette science apparue au XX^e siècle et pour tirer les premières les bénéfiques des applications révolutionnaires qu'elle promet. Santé, énergie, industrie, télécommunications, défense : les espoirs d'innovation technologique que nourrit la quantique sont insondables, autant que son potentiel de bouleversement des équilibres des puissances.

La République populaire de Chine, dont la stratégie de développement national et de montée en puissance repose sur la science et technologie, ne s'y trompe pas. La physique quantique figure au sommet des priorités scientifiques du pays et le gouvernement encourage un écosystème scientifique dynamique, dont le centre névralgique est l'Université de science et technologie de Chine (USTC), basée à Hefei.

Comme ailleurs dans le monde, les scientifiques chinois se concentrent essentiellement sur deux domaines phares de la physique quantique : l'informatique et la communication. Le premier vise à créer un ordinateur révolutionnaire qui abattra les limites de calcul de l'ordinateur classique actuel. La Chine a d'ores et déjà réalisé des avancées remarquables en annonçant avoir atteint « l'avantage quantique » sur deux concepts de processeurs quantiques différents (photonique et supraconducteur), rivalisant ainsi avec les géants américains Google et IBM.

Le second domaine – la communication quantique – ambitionne de déployer des réseaux de télécommunication inviolables, et à terme un réseau internet quantique. Une ligne de communication quantique est d'ores et déjà opérationnelle entre Pékin et Shanghai, tandis que les scientifiques chinois ont lancé en 2016 le satellite Mozi pour expérimenter la communication quantique à longue distance, et envisagent déjà une future constellation de satellites quantiques.

La Chine est ainsi déterminée à prendre la tête de la compétition scientifique internationale dans le domaine de la physique quantique et espère tirer tous les bénéfices de ses potentielles applications.

Abstract

Quantum physics, a field little known to the general public and relatively difficult to grasp as its laws are counter-intuitive, constitutes nevertheless a critical field of international strategic competition. The world's great scientific powers are organizing to unravel the mysteries of this science that appeared in the 20th century, and are angling to be the first to reap the benefits of the revolutionary applications it promises. Health, energy, industry, telecommunications, defense: the innovations quantum science promises to nurture are nothing short of revolutionary, as is the potential they hold to disrupt the global balance of power.

The People's Republic of China, with a national development and growth strategy built on science and technology, is not to be outdone. Quantum physics is high on the country's science agenda and the government is fostering a vibrant scientific ecosystem, centered around the Hefei-based University of Science and Technology of China (USTC).

As elsewhere in the world, Chinese scientists mainly focus on two key areas of quantum physics: computing and communication. The first aims to create a revolutionary computer that would break down the computational limits of today's classical computer. China has already made remarkable progress in reaching the "quantum advantage" on two different quantum processor concepts (photonics and superconducting), thus competing with the American giants Google and IBM.

The second area – quantum communication – aims to deploy unbreakable telecommunications networks, and eventually a quantum internet. A quantum communication line is already operational between Beijing and Shanghai, while Chinese scientists launched the Mozi satellite in 2016 to experiment with long-range quantum communication, and are already considering a future constellation of quantum satellites.

China is thus determined to take the lead in the international scientific competition in the field of quantum physics and hopes to derive all the benefits from its potential applications.

Sommaire

INTRODUCTION	6
LES PROMESSES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE	7
Informatique et communication quantiques : l'entrée dans une nouvelle ère technologique	8
La physique quantique dans la compétition stratégique mondiale	9
ORIENTATION POLITIQUE ET ORGANISATION DE LA RECHERCHE EN CHINE	11
La doctrine chinoise dans le domaine quantique	11
L'écosystème de recherche et d'innovation quantique chinois	14
ÉTAT DES LIEUX DANS DEUX DOMAINES CLÉS : L'INFORMATIQUE ET LA COMMUNICATION QUANTIQUES	21
L'informatique quantique	21
La communication quantique	22
Satellite Mozi : vers l'internet quantique	25
CONCLUSION	30

Introduction

Comme le dit Xi Jinping, paraphrasant sans le dire Louis Pasteur : « La science n'a pas de frontière, mais les scientifiques ont une patrie » (科学无国界, 科学家有祖国)¹. Aussi les découvertes scientifiques doivent avant tout bénéficier au pays qui les réalise. C'est pourquoi la physique quantique constitue aujourd'hui un terrain de compétition stratégique entre grandes puissances, et la Chine compte bien rivaliser et même dominer cette compétition.

Dans cette étude, il s'agira d'abord d'évoquer en quoi et dans quels domaines la physique quantique pourrait se révéler une source de technologies de rupture, la rendant si stratégique dans les relations internationales.

Puis, l'on examinera la ligne doctrinale officielle, qui définit les orientations et les ambitions du Parti communiste chinois, ainsi que l'écosystème scientifique sur lequel elle repose et qui devra donner corps à ces ambitions.

Enfin, nous plongerons dans deux champs d'application prometteurs de la physique quantique – l'informatique et la communication – pour essayer de mieux comprendre et évaluer les avancées chinoises.

Bien que le chemin soit encore long et semé d'obstacles technologiques, et que la concurrence internationale soit rude, la Chine est résolue à ne ménager aucun effort pour réaliser ses ambitions et devenir la puissance *leader* en matière de science et technologie quantique. En ce sens, la physique quantique s'inscrit pleinement dans le « rêve chinois de grande renaissance de la nation » porté par Xi Jinping depuis son accession au pouvoir en 2012.

1. « Xi Jinping : Discours au Symposium des scientifiques » (习近平：在科学家座谈会上的讲话), Xinhua, 11 septembre 2020, disponible sur : www.xinhuanet.com.

Les promesses de la physique quantique

La « première révolution quantique » est née au début du xx^e siècle avec Max Planck qui postula le premier que les échanges d'énergie à très petite échelle étaient quantifiés : l'énergie est transmise par « paquets », des *quanta*. Planck inspira Albert Einstein, qui proposa en 1905 que la lumière n'était pas seulement une onde mais aussi un corpuscule. C'est le principe de dualité onde-particule fondateur de la physique quantique, qui vaudra à Einstein son prix Nobel en 1921.

Un champ insondable de la physique s'est alors ouvert auquel ont contribué les plus grands physiciens du siècle dernier, au premier rang desquels les Européens Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg ou Paul Dirac.

Outre le principe de dualité onde-particule, la physique quantique repose sur trois autres principes fondamentaux – quantification, superposition, intrication – qui confèrent à cette science à la fois son aspect tout à fait contre-intuitif pour l'esprit humain, mais aussi ses propriétés qui donneront lieu à des applications révolutionnaires.

4 principes fondamentaux de la physique quantique

- **Principe de dualité** : une particule est à la fois une onde et un corpuscule.
- **Principe de quantification** : une particule ne peut se trouver que dans certains niveaux d'énergie. Son énergie est quantifiée.
- **Principe de superposition** : un système quantique peut se trouver dans une superposition de plusieurs états différents.
- **Principe d'intrication** : il est possible d'intriquer deux objets quantiques, dont les propriétés seront alors liées, même si les deux objets se trouvent à très grande distance l'un de l'autre. Une mesure sur l'un des objets peut affecter instantanément et à distance l'état de l'autre.

Les principes de la physique quantique ont d'ores déjà permis de développer de nombreuses applications et technologies d'usage courant aujourd'hui, comme les lasers, les semi-conducteurs, les circuits intégrés de l'informatique, les LED, etc.

Dans les années 1980, les expérimentations du physicien français Alain Aspect sur l'intrication des particules de lumière (photons) ont permis d'entrer pleinement dans la « seconde révolution quantique » et ont ouvert la voie au développement d'une infinité de nouvelles applications. Quatre grands domaines sont au cœur de cette révolution : l'informatique, les télécommunications, la métrologie et la simulation. Nous nous intéresserons ici principalement aux deux premiers.

Informatique et communication quantiques : l'entrée dans une nouvelle ère technologique

L'informatique quantique diverge fondamentalement de l'informatique classique. Cette dernière repose sur un mode de calcul binaire appelé « bit ». Un bit fournit l'information (un signal électrique) 0 ou 1, tandis que pour effectuer un calcul l'ordinateur classique devra exécuter une opération après l'autre, jusqu'à arriver à la solution. La montée en puissance des calculateurs permet aujourd'hui² à un ordinateur d'effectuer des millions de calculs consécutivement par seconde. L'ordinateur quantique, quant à lui, exploite le principe de superposition d'états d'une particule. Plutôt qu'un bit de valeur 1 ou 0, un « qubit » (contraction de « quantum bit ») d'ordinateur quantique est la superposition de 1 et 0. Ainsi, il est en théorie capable d'effectuer, non plus consécutivement, mais simultanément un très grand nombre de calculs, et décuple ainsi la puissance de traitement.

Il ne faut toutefois pas concevoir l'ordinateur quantique comme le futur substitut de nos ordinateurs classiques. Les deux seraient en réalité complémentaires dans la mesure où le premier n'apporterait pas de plus-value à l'informatique du quotidien, mais il ouvrirait des champs de calculs aujourd'hui interdits à l'informatique classique. C'est ce qu'on appelle la « suprématie » ou l'« avantage quantique³ » sur l'informatique classique : la capacité de l'ordinateur quantique à réaliser en un temps raisonnable des opérations qui demanderaient des milliers d'années aux supercalculateurs classiques les plus puissants.

Par ses capacités de simulation radicalement supérieures à l'ordinateur classique, l'ordinateur quantique pourrait permettre des applications et des

2. Notamment grâce à l'augmentation massive du nombre de transistors (semi-conducteurs) sur un circuit imprimé, atteignant plusieurs milliards.

3. L'expression « suprématie quantique » a été proposée par le physicien américain John Preskill en 2012. La formule a toutefois pâti d'une connotation négative et a largement été déformée par une utilisation souvent sensationnaliste dans les médias. Elle a ainsi perdu de sa pertinence scientifique, et c'est pourquoi beaucoup lui préfèrent aujourd'hui l'expression d'« avantage quantique ». D'autres voient néanmoins une distinction entre les deux notions : la « suprématie » qualifierait l'impossibilité totale pour un ordinateur classique d'effectuer un calcul réalisé avec succès par un ordinateur quantique, tandis que l'« avantage » désignerait l'efficacité nettement supérieure (mais pas absolue) de l'ordinateur quantique sur le classique pour résoudre un calcul.

découvertes révolutionnaires, comme de nouvelles molécules dans le domaine de la pharmacie ou de l'énergie, de nouveaux matériaux permettant des progrès dans l'efficacité des batteries électriques ou dans le domaine de la supraconductivité, ou encore faciliter significativement les problèmes de logistique, un enjeu crucial pour les entreprises et le commerce international. Santé, énergie, transport, science, agriculture, environnement... les promesses de l'ordinateur quantique sont insondables.

Le potentiel d'innovation de l'ordinateur quantique dans le secteur civil va évidemment de pair avec un potentiel tout aussi important dans le secteur militaire : imagerie, détection, système de positionnement et de navigation, physique des matériaux (nouvelles armes), armes biologiques, déchiffrement de communications, etc.

L'autre domaine particulièrement déterminant des applications de la physique quantique est la communication. L'enjeu de la communication quantique est la sécurité des échanges. Il convient ici de distinguer deux segments complètement autonomes l'un de l'autre : le déchiffrement d'un côté et la cryptographie quantique de l'autre.

Comme l'a démontré le physicien américain Peter Shor par son algorithme devenu éponyme, l'ordinateur quantique devrait permettre de déchiffrer n'importe quelle communication protégée par les protocoles de chiffrement actuels (cryptographie asymétrique). C'est pourquoi certains États et entreprises travaillent déjà sur des algorithmes post-quantiques. Ces algorithmes ne sont pas quantiques, ils sont élaborés par des ordinateurs classiques, mais ils reposent sur des algorithmes mathématiques résistants à l'algorithme de Shor.

La cryptographie quantique, quant à elle, se fonde non plus sur les mathématiques, mais sur les principes de la physique quantique (l'intrication notamment). Elle ouvre ainsi la voie à des moyens de communication à jamais inviolables, même pour l'ordinateur quantique.

L'horizon de ces applications est variable et souvent indéterminé. En matière de communication, la Chine dispose déjà d'un réseau partiellement opérationnel. En matière d'informatique, de nombreux laboratoires à travers le monde, y compris en Chine, montrent des résultats probants, bien qu'il faille sans doute encore attendre plusieurs décennies pour une mise en œuvre opérationnelle.

La physique quantique dans la compétition stratégique mondiale

On comprend alors la portée stratégique de la physique quantique, au même titre par exemple que l'intelligence artificielle (IA), pour les États. L'avantage stratégique conféré par les potentielles retombées économiques,

industrielles, scientifiques et militaires promises par la physique quantique, engendrent une course scientifique entre grandes puissances.

Dès 2013, le Royaume-Uni a publié sa « Stratégie nationale pour les technologies quantiques⁴ ». Aux États-Unis, le Congrès a voté fin 2018 le *National Quantum Initiative Act* visant à coordonner et « accélérer la recherche et le développement quantiques pour la sécurité économique et nationale des États-Unis⁵ ». Cette loi a notamment établi le Bureau de coordination nationale du quantique (National Quantum Coordination Office, NQCO) à la Maison-Blanche. En France, le président Macron a dévoilé, le 21 janvier 2021, le « Plan Quantique », qui cherche à maintenir la France dans le peloton de tête des puissances quantiques, avec un budget public-privé de 1,8 milliard d'euros sur cinq ans (dont plus d'un milliard d'investissement de l'État⁶). Au Canada, c'est le Département de la défense nationale et les forces armées qui ont publié la « Stratégie de sciences et technologies quantiques⁷ » en janvier 2021. Enfin, la Commission européenne a lancé en 2018 le « European Quantum Flagship », dont l'Agenda de recherche stratégique a été publié en 2020⁸. La Chine, bien sûr, n'est pas en reste comme nous le verrons dans la partie suivante⁹.

Le foisonnement scientifique autour de la physique quantique ces dernières années, encouragé par les gouvernements et irrigué par des budgets publics de recherche et des investissements privés toujours plus élevés, semble d'ores et déjà porter ses fruits. Google a annoncé en décembre 2019 avoir atteint expérimentalement l'avantage quantique avec un processeur quantique supraconducteur. Bien que les résultats de Google aient fait face à des objections importantes, l'expérience n'en reste pas moins une avancée technique non négligeable. La Chine a, à son tour, annoncé avoir atteint l'avantage quantique en décembre 2020 avec un processeur quantique photonique, puis à nouveau en juin 2021 avec un processeur quantique supraconducteur.

4. *National Strategy for Quantum Technologies: A New Era for the UK*, UK National Quantum Technologies Programme, mars 2015.

5. *National Quantum Initiative Act*, Congrès américain, 21 décembre 2018, disponible sur : www.congress.gov.

6. « 1,8 M € en faveur des technologies quantiques », Gouvernement.fr, 21 janvier 2021, disponible sur : www.gouvernement.fr.

7. *Quantum S&T Strategy*, DND/CAF, janvier 2021, disponible sur : www.canada.ca.

8. *Strategic Research Agenda*, Quantum Flagship, février 2020, disponible sur : <https://ec.europa.eu>.

9. Pour plus de développements sur les stratégies des différents acteurs, voir : A. Pannier, « Calcul stratégique : Le calcul haute performance et l'informatique quantique dans la quête de puissance technologique de l'Europe », *Études de l'Ifri*, octobre 2021, disponible sur : www.ifri.org.

Orientation politique et organisation de la recherche en Chine

En Chine, le gouvernement central a mis ses universités en ordre de bataille pour concourir dans la course quantique. La physique quantique est une priorité explicite du Parti communiste chinois (PCC), qui mobilise un écosystème de recherche et d'innovation pour réaliser des percées technologiques, l'Université de science et technologie (USTC) de Chine au premier plan.

La doctrine chinoise dans le domaine quantique

À la lecture des documents de stratégie et de doctrine chinois, il ne fait aucun doute que la quantique figure au sommet des priorités scientifiques du gouvernement central pour réaliser ses ambitions technologiques.

L'innovation technologique est aujourd'hui affichée comme le principal moteur du développement national en Chine. Dans un discours devant des scientifiques chinois le 11 septembre 2020, Xi Jinping a déclaré :

« La principale contradiction dans notre société réside désormais entre l'aspiration croissante de la population à une meilleure vie et un développement déséquilibré et inégal. Pour satisfaire cette aspiration à une vie meilleure, encore davantage d'innovation scientifique et technologique visant au bien-être du peuple doit être réalisée.¹⁰ »

Dans sa compétition stratégique avec les États-Unis, Pékin mise moins sur un rattrapage quantitatif et qualitatif dans le domaine militaire, qui nécessiterait plusieurs décennies, que sur une ou plusieurs ruptures technologiques qui redistribueraient les cartes des équilibres de la puissance. Ainsi, parmi les technologies de rupture les plus prometteuses, l'État chinois investit massivement dans l'IA, ainsi que dans la physique fondamentale et les applications quantiques, communications et informatique en tête.

10. « Xi Jinping : Discours au Symposium des scientifiques » (习近平：在科学家座谈会上的讲话), Xinhua, *op. cit.*

Dans son « 13^e plan quinquennal pour l'innovation scientifique et technologique nationale », publié en 2016, la communication et l'informatique quantiques figuraient dans le top 3 des priorités nationales de la recherche. Notamment, dans les « technologies de rupture qui ont un impact majeur et peuvent changer ou modifier partiellement le schéma technologique, économique, social et écologique, et gagner un avantage concurrentiel dans le nouveau cycle de transformation industrielle », l'ordinateur quantique figure en deuxième position des priorités de recherche, après l'internet mobile et avant l'IA¹¹. De même, dans le classement des 13 « Grands enjeux scientifiques prospectifs de portée stratégique » identifiés dans ce même document, la recherche dans le « contrôle quantique (量子调控) et l'information quantique (量子信息) » se positionne en deuxième place¹².

Le « Plan de développement d'une intelligence artificielle nouvelle génération » publié en 2017 par le gouvernement insiste pour sa part sur la convergence entre IA et « informatique quantique intelligente » (量子智能计算) dans le but de développer une IA quantique de très haute performance¹³.

Illustration de la priorité stratégique que représente la quantique, le secrétaire général Xi Jinping évoque régulièrement dans ses discours l'importance de progresser dans ce domaine. En avril 2016, il avait effectué une visite à l'USTC, le centre névralgique de la recherche quantique chinoise¹⁴. Dans ses vœux télévisés pour l'année 2018, Xi Jinping avait salué les succès de développement de l'ordinateur quantique aux côtés du satellite astronomique à rayon X, Huiyan, de l'avion de ligne C919, ou encore du premier porte-avions indigène chinois (le *Shandong*).

Le discours le plus marquant de Xi Jinping sur la quantique est celui qu'il a prononcé le 16 octobre 2020, devant un groupe de travail du Bureau politique du Comité central du PCC sur les technologies quantiques. Xi diagnostiquait que « le développement de la technologie quantique avance à pas de géant et est devenu la frontière d'un nouveau cycle de révolution technologique et de transformation industrielle. » Il affirmait : « L'accélération du développement de la technologie quantique joue un rôle très important dans la promotion d'un développement de haute qualité et la garantie de la sécurité nationale. » Il y dressait par ailleurs une évaluation nuancée des progrès de la Chine dans le domaine. Il saluait la « force

11. « 13^e plan quinquennal pour l'innovation scientifique et technologique nationale » (« 十三五 » 国家科技创新规划), Conseil des affaires de l'État, mars 2016, disponible sur : www.gov.cn.

12. *Idem*.

13. « Plan de développement d'une intelligence artificielle nouvelle génération » (新一代人工智能发展规划的通知), Conseil des affaires de l'État, juillet 2017, disponible sur : www.gov.cn.

14. Il est intéressant de constater que cette visite figure toujours en première page du site des actualités de l'université, pourtant régulièrement mis à jour : <http://news.ustc.edu.cn> ; « Le secrétaire général Xi Jinping inspecte l'Université de Science et Technologie de Chine » (习近平总书记考察中国科大), site internet de l'université, 28 avril 2016, disponible sur : <http://news.ustc.edu.cn>.

technologique et la capacité d'innovation » de la Chine, mais reconnaissait aussi les « nombreuses lacunes » (不少短板) et les « nombreux défis » (多重挑战) concernant l'innovation indépendante, les percées technologiques fondamentales, la sécurité des chaînes d'approvisionnement industrielles et les risques internationaux¹⁵.

En matière d'orientation et de coordination concrètes de la recherche, le ministère de la Science et Technologie (MST) a lancé en 2016 le « Projet spécial clé 'Contrôle quantique et information quantique' ». Depuis, il publie chaque année les lignes directrices et les appels à projets dans ce domaine. Les projets s'inscrivent dans six champs de recherche établis par le MST : (1) systèmes électroniques associés ; (2) petits systèmes quantiques ; (3) systèmes à bande interdite artificiels ; (4) communication quantique ; (5) informatique et simulation quantiques ; et (6) mesure de précision quantique¹⁶.

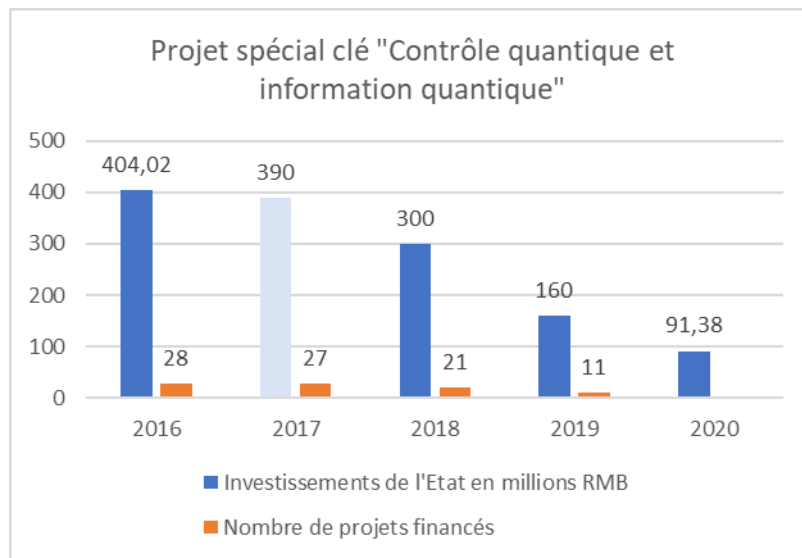
Entre 2016 et 2019, 87 projets de recherche (dont 31 pour des jeunes chercheurs) ont été lancés dans ce cadre. Un maximum de 10 projets sont financés chaque année pour un montant maximum de 50 millions de renminbi (RMB) – soit environ 6,5 millions d'euros – et une durée d'environ cinq ans.

D'après les chiffres officiels disponibles, le MST aurait ainsi investi 1,35 milliard de RMB (soit environ 176 millions d'euros) dans le « Projet spécial clé 'Contrôle quantique et information quantique' » entre 2016 et 2020. Les montants pour 2017 n'étant pas disponibles, il est néanmoins possible de dresser une estimation grâce au nombre de projets financés cette année-là et aux montants alloués en moyenne par projet les autres années.

On observe une baisse rapide des financements annuels du MST en cinq ans seulement. Cela pourrait s'expliquer d'une part par des investissements plus importants au lancement du projet spécial, puis un ralentissement naturel dû aux projets déjà en cours. On note en outre que les prévisions de financement pour 2020 étaient de 125 millions de RMB dans la version de travail du document, et qu'ils ont finalement été établis à 91,38 millions dans le document final.

15. « Xi Jinping a présidé la 24^e étude collective du Bureau politique du Comité central et a prononcé un discours » (习近平主持中央政治局第二十四次集体学习并讲话), Xinhua, 16 octobre 2020, disponible sur : www.gov.cn.

16. « Projet spécial clé de "Contrôle quantique et information quantique". Suggestions des lignes directrices pour les appels à projet annuels 2017 » (「量子调控与量子信息」重点专项2017年度项目申报指南建议), MST, 2017.



Source : rapports du MST 2017, 2018, 2019, 2020, chiffres consolidés par l'auteur.

Toutefois, ces budgets ne comprennent que les investissements de l'État dans le Projet spécial clé « Contrôle quantique et information quantique ». Ils ne prennent pas en compte, par exemple, le budget du programme QUESS (qui comprend le développement et le lancement du satellite Mozi, ainsi que la construction de quatre observatoires au sol¹⁷), ni les budgets propres de l'Académie des sciences de Chine, des universités, de l'armée et des gouvernements provinciaux, ni du secteur privé. On ne connaît pas le montant exact des investissements chinois dans le domaine quantique, mais au vu du nombre de programmes en cours et de l'intérêt manifeste du gouvernement central, il y a tout lieu de penser que les investissements chinois figurent parmi les plus importants au monde¹⁸.

L'écosystème de recherche et d'innovation quantique chinois

Pour réaliser ses ambitions, le gouvernement central s'en remet à un écosystème de recherche et d'innovation scientifique très dynamique dans le domaine quantique, dont l'épine dorsale est l'USTC.

Basée à Hefei, dans la province de l'Anhui (400 kilomètres [km] de Shanghai), l'USTC est placée sous la tutelle directe de l'Académie des sciences de Chine (CAS). Elle abrite le Département de physique quantique et de recherche en information quantique (fondé en 2001), qui est impliqué

17. Certaines sources avancent un coût total de 100 millions de dollars. Voir : <https://web.archive.org>.

18. Certains rapports chinois ou anglophones avancent des chiffres, tel que 10 milliards de dollars américains d'investissement de l'État chinois, mais sans fournir ni leurs sources, ni leur méthodologie, ni la période d'investissement, ni le détail de ces investissements. Voir par exemple : *Quantum Computing in Finance* (金融中的量子计算), Guanzihe (光子盒), juillet 2021. *Quantum Computing, When Will the Breakthrough Come?*, Rolland Berger, mai 2021.

dans la plupart des grands projets quantiques nationaux. Les travaux du Département sont divisés entre quatre grands domaines :

- **Fondamentaux de la physique quantique et de la communication quantique** : communication quantique urbaine et interurbaine, communication quantique par satellite, instrumentation.
- **Informatique et simulation quantique** : informatique quantique optique (ou photonique), informatique quantique supraconductrice, simulation quantique de boson ultra-froid.
- **Mesure de précision quantique** : interférence atomique, interférence multiphotonique, imagerie quantique.
- **Physique quantique théorique** : information et théorie de la communication quantique, théorie de la simulation quantique, théorie quantique.

Le Département de recherche en physique et information quantiques de l'USTC est dirigé par Pan Jianwei (潘建伟), le « père de la physique quantique » en Chine. Né en 1970, Pan a obtenu sa thèse de l'université de Vienne en 1999, sous la direction d'Anton Zeilinger, l'un des grands spécialistes mondiaux de l'intrication et de la « téléportation » quantique. En 2003, il s'établit à l'université d'Heidelberg en Allemagne dans le cadre d'une bourse d'excellence Marie Curie de l'Union européenne (UE) pour travailler sur l'optique quantique. Il rentre en Chine en 2008 pour travailler à l'USTC, où il avait été étudiant à la fin des années 1980. En 2011, il devient membre de l'Académie des sciences de Chine (CAS). Et en 2014, il prend la tête du Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics de la CAS, tout juste fondé et hébergé à l'USTC¹⁹.



Source : USTC

Autre étoile montante de l'USTC et héritier de Pan, Lu Chaoyang (陆朝阳) jouit déjà d'une renommée mondiale à moins de 40 ans (né en 1982). Docteur en physique du Laboratoire Cavendish de l'Université de Cambridge (2011), il est aujourd'hui professeur à l'USTC, spécialiste d'informatique et de communication quantique et l'un des chercheurs les plus cités au monde dans ces domaines. Il est aussi engagé politiquement en tant que membre de la Société Jiu San, l'un des huit partis politiques

19. Profil biographique de Pan Jianwei, site internet de la Division Physique quantique et information quantique de l'USTC : <https://quantum.ustc.edu.cn> ; « L'Internet quantique chinois combinera fibre optique et satellites », entretien avec Pan Jianwei, *La Recherche*, n° 531, janvier 2018.

dans l'orbite du PCC. Il est aussi membre de différentes fédérations aux niveaux municipal, provincial et national²⁰.

Le Département de recherche en physique et information quantiques de l'USTC est composé de 55 chercheurs seniors, dont plus de la moitié a effectué une partie de son cursus (doctorat ou post-doc) à l'étranger, le plus souvent en Europe (Allemagne et Autriche pour beaucoup). Il accueille également 171 doctorants et 24 post-doctorants, dont le plus grand nombre (27) dans la section informatique quantique supraconductrice²¹.

L'USTC est au cœur du Centre d'innovation collaborative des frontières de l'information et de la technologie quantiques (量子信息与量子科技前沿协同创新中心). Celui-ci réunit autour de l'USTC, l'université de Nankin, le Shanghai Institute of Technical Physics de la CAS, l'Institut des semi-conducteurs de la CAS et l'université nationale de Technologie de défense (NUDT). Cet écosystème a été mis en place en 2011 dans le cadre du « Plan d'amélioration des capacités innovantes pour les établissements d'enseignement supérieur » (ou « Plan 2011 ») des ministères de l'Éducation et des Finances. L'objectif du Centre est de « promouvoir vigoureusement l'amélioration des capacités d'innovation collaborative » dans les domaines quantiques de rupture, et de former un « pôle académique de renommée internationale », conformément au principe suivant : « l'urgence nationale : atteindre le rang mondial et devenir leader international » (国家急需、世界一流、国际引领)²².

Autre regroupement de centres universitaires, la Beijing Academy of Quantum Information Sciences (BAQIS) a été fondée en décembre 2017 à l'initiative de la municipalité de Pékin. Elle regroupe la CAS, l'université de Tsinghua et l'université de Pékin. Présidée par l'académicien Xue Qikun (薛其坤), la BAQIS se positionne comme une institution de recherche dynamique et proche des entreprises, qui recrute surtout des jeunes chercheurs et ingénieurs²³.

L'université Tsinghua à Pékin figure également parmi les centres universitaires importants dans le domaine quantique. Son Centre pour l'information quantique (量子信息中心), créé en 2011 sous la tutelle de l'Institut interdisciplinaire pour les sciences de l'information (IIIS), est dirigé par l'académicien Yao Qizhi (姚期智, ou Andrew Yao), éminent physicien lauréat du prix Turing (2000) passé par les plus grandes

20. Profil biographique de Lu Chaoyang : <https://quantum.ustc.edu.cn> ; Voir aussi : « Lu Chaoyang : Contribuer au pouvoir de jeunesse de la société Jiu San pour un pays puissant en science et technologie » (陆朝阳：为科技强国贡献九三青年力量), site internet de la Société Jiu San, 4 septembre 2020, disponible sur : www.93.gov.cn.

21. Site internet du Département de recherche en physique et communication quantiques de l'USTC : <https://quantum.ustc.edu.cn>.

22. « Aperçu du Centre d'innovation collaborative des frontières de l'information et de la technologie quantiques » (量子信息与量子科技前沿协同创新中心概况), Quantum2011, disponible sur : www.quantum2011.org.

23. Site internet de BAQIS : www.baqis.ac.cn.

universités américaines (MIT, Harvard, UCLA, Stanford, Princeton), avant de renoncer à sa nationalité américaine et de rentrer en Chine en 2015. Yao Qizhi est le directeur du Centre pour l'information quantique de Tsinghua, tandis que son directeur exécutif est Duan Luming (段路明), titulaire de la chaire Yao Qizhi à Tsinghua et spécialiste d'informatique quantique. Après avoir obtenu son doctorat de l'USTC en 1998, Duan Luming a lui aussi effectué une grande partie de sa carrière aux États-Unis, à l'université du Michigan, où il a notamment occupé la chaire Enrico Fermi jusqu'en 2018, avant de rentrer en Chine dans le cadre du programme « 1 000 Talents » de rapatriement des cerveaux²⁴.

Les entreprises chinoises du numérique montent elles aussi au créneau de la recherche et développement dans le domaine quantique, mais le plus souvent en étroite collaboration avec l'université, quand elles ne sont pas tout simplement des émanations privées de laboratoires universitaires (*spin-off*). Ces entreprises misent sur l'immense potentiel de débouchés économiques, notamment de l'informatique quantique.

Origin Quantum est un *spin-off* du Key Laboratory of Quantum Information de la CAS, spécialisé dans l'informatique quantique. Il a été cofondé en 2017 à Hefei par Guo Guancan et Guo Guoping, deux professeurs de l'USTC, et est essentiellement constitué de jeunes chercheurs diplômés de l'USTC²⁵.

Le géant Alibaba collabore lui-aussi avec la CAS, *via* sa filiale Alibaba Cloud, dans le cadre du CAS-Alibaba Quantum Computing Laboratory, consacré à l'ordinateur quantique photonique. L'accord a été signé en juillet 2015 à Shanghai, entre le chef de la technologie du Groupe Alibaba, Jian Wang, le président de la CAS, Bai Chunli, ainsi que Pan Jianwei en tant que directeur du Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics de la CAS. En février 2018, la filiale Alibaba Cloud et la CAS ont lancé conjointement un service d'ordinateur quantique en ligne (sur le *cloud*) d'une puissance de 11 qubits²⁶, à l'instar des concurrents internationaux IBM, Amazon, Microsoft ou D-Wave.

Autre exemple dans le domaine de la communication quantique cette fois : QuantumCTek. Emanation de l'USTC fondée en 2009, QuantumCTek a été cotée à la Bourse de Shanghai à l'été 2020. L'entreprise est détenue à 11 % par Pan Jianwei, et présidée par Peng Chengzhi (彭承志), issu de l'USTC.

Pour finir, l'Armée populaire de libération (APL) possède elle aussi ses propres structures de recherche en physique quantique au sein de

24. Profil biographique sur le site de l'IIIS : <https://iiis.tsinghua.edu.cn>.

25. Site internet de Origin Quantum : www.originqc.com.cn ; Z. Li, "China's Origin Quantum has raised funds to catch up with IBM", *Nikkei*, 25 février 2021.

26. « Alibaba Cloud and CAS Launch One of the World's Most Powerful Public Quantum Computing Services », Alibaba Cloud, 1er mars 2018. Disponible sur : www.alibabacloud.com.

l'université nationale de Technologie de défense (NUDT). Celle-ci accueille le Groupe QUANTA qui dépend du Laboratoire clé d'État d'informatique de haute performance²⁷. Il est dirigé par Wu Junjie, rendu célèbre pour ses travaux sur l'évaluation et la standardisation de la suprématie quantique²⁸. La NUDT abrite aussi le Centre interdisciplinaire pour l'information quantique (量子信息学科交叉中心), fondé en 2015.

L'armée s'intéresse certes de très près à la physique quantique et à ses applications potentielles. Toutefois, elle n'apparaît pas, pour le moment, comme un acteur central. On peut émettre l'hypothèse qu'en raison du faible niveau de maturité technologique du domaine, des besoins en financement et de la rareté des talents, les autorités privilégient la centralisation des ressources dans quelques centres universitaires, au premier rang desquels l'USTC. En outre, la politique de « fusion civilo-militaire » lancée par Xi Jinping en 2015, vise à faciliter et encourager les liens entre innovation civile et militaire. On peut ainsi raisonnablement penser que la collaboration entre la NUDT et l'USTC est étroite.

D'après un article du *Quotidien de l'APL* de juillet 2021, l'armée serait particulièrement intéressée par les domaines de la communication quantique sécurisée, la cryptographie, les radars et l'imagerie quantiques, ainsi que les gyroscopes quantiques qui offriraient aux avions, navires, sous-marins et chars un système de positionnement extrêmement précis, peu encombrant et indépendant des satellites²⁹.

Les industriels chinois de la défense ne s'y trompent pas et l'USTC a signé en novembre 2017 avec le conglomérat étatique du domaine naval, China Shipbuilding Industry Corporation (CSIC), l'établissement de trois laboratoires de recherche conjoints sur la navigation quantique, la communication quantique et la détection quantique, tous trois basés à Wuhan³⁰.

L'USTC a également signé un accord de coopération stratégique avec le groupe d'électronique de défense China Electronics Technology Group Corporation (CETC), comprenant notamment une collaboration sur la détection et la communication quantiques³¹.

27. « Le Groupe QUANTA de la NUDT a accompli une nouvelle réalisation majeure pour développer une nouvelle puce informatique quantique optique programmable à base de silicium ! » (国防科技大学QUANTA团队再出重磅成果, 研发新型可编程硅基光量子计算芯片!), Qianzhan Wang (前瞻网), 1^{er} mars 2021.

28. C. Guo, "General-Purpose Quantum Circuit Simulator with Projected Entangled-Pair States and the Quantum Supremacy Frontier", *Physical Review Letter*, 4 novembre 2019.

29. « Les applications militaires de la technologie quantique attirent l'attention » (量子技术的军事应用引关注), *Quotidien de l'APL* (en ligne), 6 juillet 2021. Disponible sur : www.81.cn.

30. « La CSIC et l'USTC créent un laboratoire quantique commun » (中船重工与中国科大成立量子联合实验室), *Sina*, 28 novembre 2017, disponible sur : <http://news.sina.com.cn>.

31. « Quantum Dragon, How China Is Exploiting Western Government and Research Institutes to Leapfrog in Dual-Use Quantum Technologies », Strider Global Intelligence Team, novembre 2019. Voir

La CETC – et sa filiale reine en matière de radars, le 14^e Institut – est par ailleurs connue pour ses travaux sur les radars quantiques, qui font régulièrement l'objet d'annonces et d'articles dans la presse internationale. La première annonce par CETC en 2016 concernait l'essai d'un radar quantique d'une portée de 100 km. Cette technologie, qui repose sur l'émission de photons intriqués, est censée permettre de détecter avec précision n'importe quel objet y compris des chasseurs furtifs ou des missiles balistiques³². La CETC n'a toutefois pas publié d'article scientifique ni de données permettant d'appuyer ses dires. Dans la communauté scientifique, les spécialistes sont partagés. La plupart doutent de la faisabilité ou de l'efficacité d'un tel radar, y compris le premier théoricien du concept, l'américain Jeffrey Shapiro³³, tout comme le Conseil scientifique du Pentagone, qui estime que ce n'est pas une technologie prometteuse³⁴.

Toutefois, une équipe de scientifiques de l'université Tsinghua, dirigée par Zhang Chao, travaille sur un concept alternatif de radar quantique qui pourrait s'avérer plus crédible. Elle a publié en octobre 2021 dans une revue académique chinoise un article sur ce concept de radar basé sur un « vortex de photons micro-ondes³⁵ ».

aussi : « L'USTC et la CETC ont signé un accord de coopération stratégique » (中国科学技术大学与中国电子科技集团有限公司签署战略合作协议), USTC, 28 avril 2018.

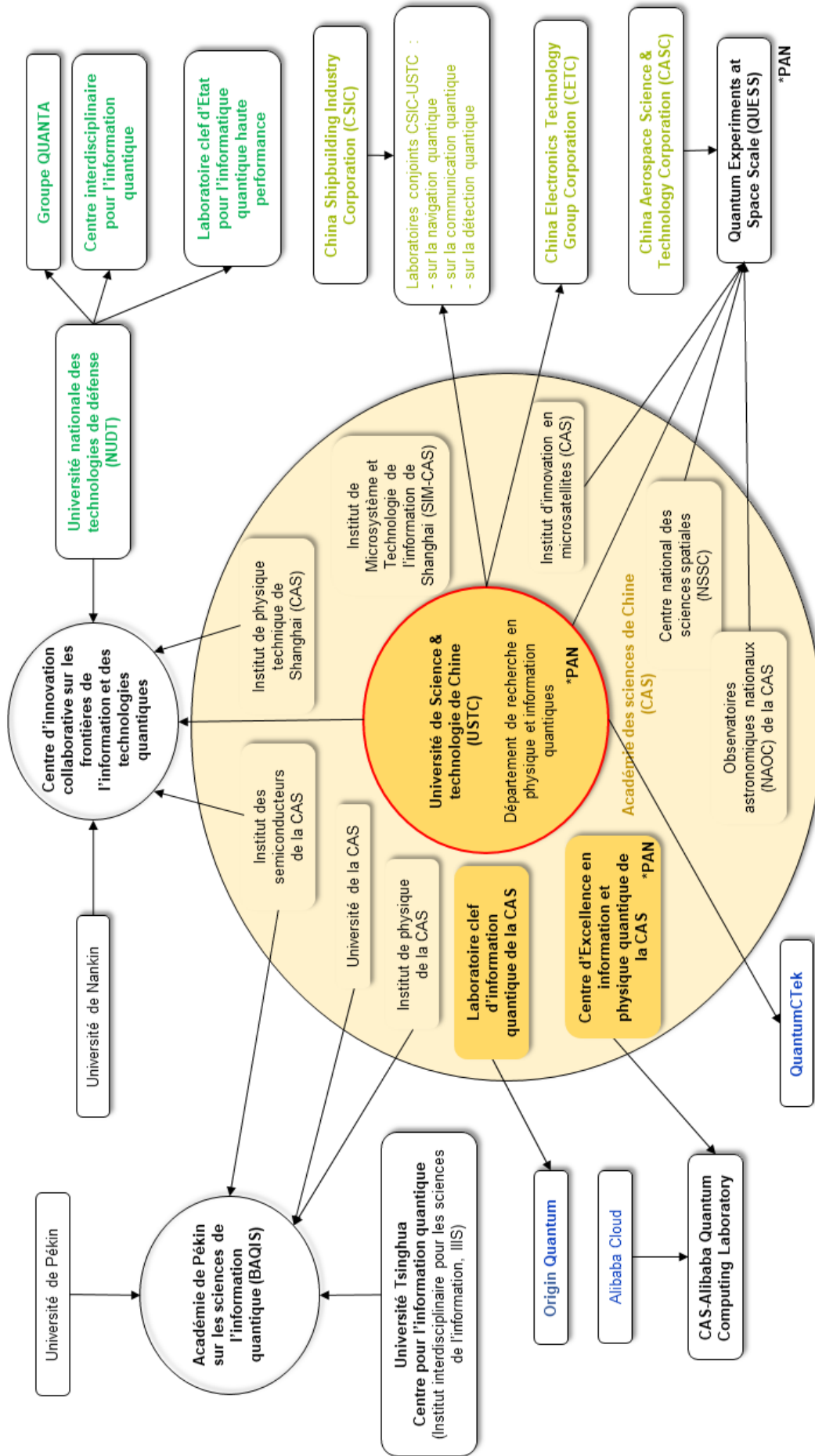
32. Z. Liu, « China's Latest Quantum Radar Won't Just Track Stealth Bombers, But Ballistic Missiles in Space Too », *South China Morning Post*, 15 juin 2018.

33. A. Cho, « The Short Weird Life—and Potential Afterlife—of Quantum Radar », *Science*, 23 septembre 2020.

34. « Pentagon's Defense Science Board Warns That Quantum Radar Will Not Be a Substantial Military Improvement », *Military and Aerospace*, 21 juin 2021.

35. C. Zhang Chao, Y. Wang et X. Jiang, « Quantum Radar with Vortex Microwave Photons » (涡旋微波量子雷达), *Journal of Radars* (雷达学报), octobre 2021.

Cartographie indicative de l'écosystème de science et technologie quantiques en Chine



Cartographie indicative des principaux acteurs impliqués dans la recherche et l'innovation quantique en Chine

- USTC, centre névralgique de la recherche en physique quantique en Chine
- Universités... Institutions de recherche appartenant aux armées
- Universités dans le giron de l'Académie des sciences de Chine (CAS) China... Entreprises d'Etat de défense
- Laboratoires conjoints de recherche dans le domaine quantique Quantum Entreprises privées impliquées dans l'innovation quantique
- Laboratoires de la CAS hébergés à l'USTC *PAN : institutions dirigées par Pr. PAN Jianwei

Source : cartographie réalisée par l'auteur.

État des lieux dans deux domaines clés : l'informatique et la communication quantiques

L'informatique et la communication quantiques sont les deux domaines d'innovation les plus prometteurs et constituent les principaux terrains de la compétition internationale. Dans ces deux domaines, la Chine figure parmi les puissances les plus avancées.

L'informatique quantique

La recherche dans l'informatique quantique est à la fois embryonnaire et en pleine effervescence. Différents concepts d'ordinateurs quantiques sont actuellement en développement et il est encore difficile de déterminer lequel apportera le plus d'avantages comparatifs.

Deux grands concepts technologiques focalisent le plus l'attention : les processeurs quantiques photoniques et les processeurs quantiques supraconducteurs. Exploitant le principe de superposition, les premiers consistent à intriquer des photons uniques (particules de lumière) dans leur état quantique, pour transmettre des informations. La principale difficulté réside dans la manipulation de photons uniques et leur intrication.

Les processeurs quantiques supraconducteurs exploitent eux aussi le principe de superposition, mais les particules utilisées sont cette fois-ci des électrons dans leur état quantique. Pour reproduire cet état quantique qui permet la supraconduction, il est nécessaire d'abaisser la température du processeur proche du zéro absolu (autour de -270 °C). C'est là le principal défi : maintenir l'état quantique du système par une température très basse, essentiellement grâce à de l'hélium liquide (qui nécessite de l'hélium-3, très rare sur Terre et très cher, et donc un autre enjeu de compétition croissant).

La Chine est l'un des pays les plus avancés dans le domaine des processeurs photoniques. En décembre 2020, les équipes du professeur Pan Jianwei et Lu Chaoyang de l'USTC ont annoncé avoir atteint l'avantage quantique avec un processeur photonique³⁶, nommé Jiuzhang (九章)³⁷.

36. H. Zhong *et al.*, "Quantum Computational Advantage Using Photons", *Science*, 18 décembre 2020.

37. Jiuzhang provient de *Jiǔ zhāng suànshù* 九章算術, *Neuf chapitres sur l'art mathématique*, un traité chinois compilé du I^{er}-II^e siècle av. J.-C.

L'expérience, dite « d'échantillonnage de bosons », a été réalisée en 200 secondes alors qu'elle aurait nécessité, en théorie et d'après les auteurs de l'expérience, autour de 2,5 milliards d'années avec l'actuel troisième supercalculateur du monde, Sunway TianhuLight³⁸.

En juillet 2021, la Chine a franchi une autre étape importante sur la voie de l'informatique quantique : la démonstration de l'avantage quantique avec un processeur supraconducteur. Un an et demi après que Google a annoncé le premier avoir franchi cette étape en décembre 2019, avec son processeur Sycamore de 53 qubits, les équipes de Pan Jianwei ont elles aussi annoncé y être parvenues avec le processeur Zuchongzhi (祖冲之)³⁹ de 66 qubits. Le calcul réalisé (similaire à celui de Sycamore : un échantillonnage aléatoire de circuits quantiques pour l'analyse comparative) a été effectué en un peu plus d'une heure par Zuchongzhi, contre une estimation d'au moins 8 ans pour un supercalculateur classique⁴⁰.

Les Chinois semblent suivre l'exemple des Américains en affichant ce type de comparaison entre le temps de calcul d'un ordinateur quantique et celui d'un ordinateur classique. Pourtant, de l'avis de nombreux physiciens, ces comparaisons sont en réalité peu pertinentes car elles ne tiennent pas compte des marges d'erreurs élevées des qubits et du phénomène de décohérence qui brise l'intrication entre ces derniers⁴¹. En outre, chez Google comme à l'USTC, la performance de l'ordinateur quantique est évaluée sur le seul et unique calcul pour lequel il a été programmé. Si l'avantage quantique peut donc être relativisé, il n'est en tout cas vérifiable que pour un seul calcul qui n'a ni portée scientifique, ni applicative.

La communication quantique

Plus encore qu'en informatique, la Chine est véritablement la puissance en pointe en matière de communication quantique. Dans ce domaine, la Chine a réalisé, pas à pas depuis 15 ans, des percées scientifiques remarquables.

La communication et la cryptographie quantiques sont étroitement liées. L'idée fondamentale est de créer une clé de chiffrement, transmise par des photons intriqués entre deux interlocuteurs. Cette technique s'appelle la « distribution quantique de clé » (ou *Quantum Key Distribution*, QKD en anglais) et consiste en l'échange d'une clé de chiffrement transmise par un canal quantique, tandis que le message chiffré est transmis *via* un canal classique.

38. D. Garisto, « Light-Based Quantum Computer Exceeds Fastest Classical Supercomputers », *Scientific American*, 3 décembre 2020, disponible sur : www.scientificamerican.com.

39. En référence au mathématicien et astronome chinois du 5e siècle, Zu Chongzhi.

40. Y. Wu *et al.*, « Strong Quantum Computational Advantage Using a Superconducting Quantum Processor », *arXiv*, 29 juin 2021.

41. X. Waintal *et al.*, « What Limits the Simulation of Quantum Computers? », *arXiv*, 24 mars 2020. Échange avec Pierre Lemonde, physicien, directeur de recherche au CNRS, Institut Néel.

La QKD offre, en théorie, une sécurité inconditionnelle, c'est-à-dire résistante à toute tentative d'espionnage, quelle que soit la technologie de déchiffrement même dans un avenir lointain. En effet, les propriétés quantiques de la clé de chiffrement font qu'il est impossible de copier la clé et que toute interaction d'un acteur tiers avec celle-ci romprait l'état quantique du système et alerterait instantanément les deux interlocuteurs.

La cryptographie actuelle, en grande partie basée sur la cryptographie dite asymétrique (protocole RSA), repose sur la factorisation de très grands nombres, une opération très difficile à résoudre pour un ordinateur classique, et donc difficilement déchiffirable. Toutefois, il a été démontré dans les années 1990 (l'algorithme de Shor) que les ordinateurs quantiques pourront facilement résoudre ces opérations et casser les clés de chiffrement asymétrique que l'on utilise aujourd'hui. Ainsi, tous les messages interceptés par un État, y compris depuis plusieurs décennies, pourraient être un jour déchiffrés. D'où l'importance stratégique de la communication quantique, qui elle, résisterait même aux ordinateurs quantiques.

C'est, là encore, Pan Jianwei, qui a mené les plus grandes avancées en matière de communication quantique. Au sein de l'USTC, c'est lui qui a conduit les recherches pour lancer en 2013 la construction de la « Ligne de communication quantique sécurisée interurbaine Pékin-Shanghai » (量子保密通信京沪干线). Celle-ci a été achevée fin 2016 et inaugurée en septembre 2017 lors d'une visioconférence sécurisée par QKD, entre les quatre villes desservies par la ligne : Pékin, Jinan, Hefei et Shanghai. Elle est la plus longue ligne de communication quantique du monde avec plus de 2 000 km⁴². Elle est aujourd'hui opérationnelle pour la transmission d'informations gouvernementales, financières ou liées à la défense nationale.

Il convient toutefois de préciser que cette ligne n'est en réalité pas intégralement quantique, ni donc intégralement inviolable. En effet, la clé étant constituée d'une série de photons circulant dans une fibre optique, le signal lumineux diminue de façon exponentielle avec la distance. Seul 1 % du signal (les photons) atteint une distance de 100 km, tandis que le reste est absorbé. Pour pallier cette contrainte physique, la ligne est dotée de 32 « nœuds » ou relais tous les 70 km, à travers lesquels l'information quantique est régénérée.

42. « Le Projet national communication quantique secrète "Ligne Pékin-Shanghai" a passé l'acceptation technique générale » (国家量子保密通信“京沪干线”项目通过总技术验收), USTC, 4 septembre 2017.

Les projets de prolongation de ce réseau vont bon train. La construction de la ligne Wuhan-Hefei a été lancée en 2016 et mise en service en 2018, tandis qu'un réseau national est en projet s'étendant à travers tout le pays sur un total de 35 000 km, jusqu'à Urumqi, la capitale de la Région autonome ouïghoure du Xinjiang et jusqu'à Lhasa au Tibet. Ce réseau viserait à généraliser la communication quantique sécurisée pour les entreprises, le gouvernement et l'armée⁴³.



43. H. Qin, "Towards Large Scale Quantum Key Distribution Network and Its Applications", ITU QIT4N Workshop, Shanghai, 5-7 juin 2019.

Satellite Mozi : vers l'internet quantique

Pour faire face à la déperdition du signal lumineux dans la fibre optique – barrière physique d'une communication quantique inviolable – une première solution actuellement à l'étude est les « répéteurs quantiques » qui permettraient de téléporter l'état quantique d'une particule à une autre afin de transporter l'information sur de longues distances. Une autre solution est la communication quantique en espace libre, car la diminution du signal lumineux y est beaucoup plus faible. C'est de là qu'est venue l'idée d'un satellite quantique à Anton Zeilinger et Pan Jianwei.

Pan a confié au magazine *La Recherche* : « En 2007, Anton Zeilinger [...] envisageait, tout comme moi, de construire un satellite. Il espérait convaincre l'Agence spatiale européenne, et moi, l'agence chinoise. Nous nous sommes mis d'accord pour collaborer au premier projet qui serait financé.⁴⁴ » C'est finalement la Chine qui a financé le projet. En Europe, certains considèrent qu'un tel projet était trop coûteux pour seulement expérimenter à très grande échelle des principes physiques déjà démontrés en laboratoire. Selon le physicien français Pierre Lemonde, l'Agence spatiale européenne avait refusé cette mission « précisément en raison de son manque d'ambition scientifique ». Une telle mission n'apporterait « guère plus sur le plan fondamental que des expériences terrestres réalisées depuis plus de vingt ans par plusieurs laboratoires dans le monde⁴⁵ ».

Il convient toutefois de se demander si la motivation initiale des scientifiques et du gouvernement chinois était la recherche fondamentale ou l'innovation technologique en capitalisant sur les connaissances établies (cf. *infra*). En 2011, dans le cadre du 12^e plan quinquennal de la RPC, le Programme prioritaire stratégique des sciences spatiales est lancé et confié au Centre national des sciences spatiales (NSSC) de la CAS⁴⁶. Parmi les programmes planifiés figure le Quantum Experiments at Space Scale (QUESS, ou Expériences quantiques à l'échelle spatiale) dirigé par Pan Jianwei et en collaboration partielle avec Anton Zeilinger et l'université de Vienne.

Le satellite Mozi, du nom du philosophe chinois du 5^e siècle av. J.-C., est ainsi lancé par la Chine en août 2016 et placé avec succès en orbite héliosynchrone (500-600 km d'altitude). Dès septembre 2016, les scientifiques chinois réalisent les premières expériences de QKD du satellite vers la station au sol de Xinglong (à 100 km au nord-est de Pékin), sur une distance entre 600 et 1 200 km, un record⁴⁷. À la même période, d'autres

44. « L'Internet quantique chinois combinera fibre optique et satellites », entretien avec Pan Jianwei, *La Recherche*, art. cit.

45. S. Balme et P. Lemonde, « Un rêve d'hyperpuissance scientifique », *La Recherche*, n° 557, mars 2020.

46. Strategic Priority Program on Space Science, NSSC, CAS : <http://english.cssar.cas.cn>.

47. S. Liao et al., « Satellite-to-Ground Quantum Key Distribution », *Nature*, 9 août 2017, disponible sur : www.nature.com.

expériences de QKD ont été réalisées entre la station spatiale chinoise Tiangong 2 (lancée en septembre 2016 et désorbitée en juillet 2019) et l'observatoire de Nanshan (proche d'Urumqi au Xinjiang), à une distance de 719 km⁴⁸.

Ils sont ensuite parvenus à distribuer des clés quantiques constituées de paires de photons intriqués, depuis Mozi vers trois stations au sol espacées de plus de 1 100 km les unes des autres : entre Delingha (Qinghai) et Lijiang (Yunnan) à 1 200 km de distance, et entre Delingha et Nanshan (Xinjiang) à 1 120 km⁴⁹.



48. S. Liao *et al.*, « Space-to-Ground Quantum Key Distribution Using a Small-Sized Payload on Tiangong-2 Space Lab », *Chinese Physics Letters*, 10 août 2017, disponible sur : <http://cpl.iphy.ac.cn>.

49. J. Yin *et al.*, « Satellite-Based Entanglement Distribution over 1,200 Kilometers », *Science*, 16 juin 2017.

Pour cette nouvelle percée expérimentale, le satellite Mozi a fait la une du magazine *Science* en juin 2017 et le programme QUESS a obtenu le prestigieux prix Newcomb Cleveland 2018 de l'American Association for the Advancement of Science (AAAS)⁵⁰.

En septembre 2017, la veille de l'inauguration de la ligne de communication quantique sécurisée Pékin-Shanghai, le président de la CAS, Bai Chunli et son homologue de l'Académie des sciences d'Autriche, Anton Zeilinger, ont tenu la première visio-conférence intercontinentale (7 600 km) protégée par une clé de chiffrement quantique, transmise *via* le satellite Mozi⁵¹.



En outre, les équipes du programme QUESS sont parvenues à réaliser des expériences de téléportation quantique, dont les résultats ont été publiés dans *Nature* en 2017⁵². Le principe de l'expérience est, d'abord, d'intriquer des millions de paires de photons sur Terre, puis d'envoyer la moitié des photons intriqués depuis l'observatoire de Ngari au Tibet (5 100 m d'altitude) vers le satellite Mozi, au moment de son passage orbital. Enfin, on mesure l'état du photon resté au sol et celui du photon intriqué dans le satellite. Les chercheurs sont ainsi parvenus à téléporter l'état quantique de photons de la Terre vers l'espace à une distance entre 500 et 1 400 km.

En 2020, les scientifiques chinois ont fait un pas de plus vers la communication quantique inviolable. L'expérience est proche de celles réalisées pour la visioconférence entre Pékin et Vienne en 2017, à la différence importante que Mozi ne fonctionne plus comme un relais de communication auquel on fait confiance, qui délivre et « connaît » les clés quantiques distribuées vers Vienne et Pékin. Dans la nouvelle configuration, qui repose essentiellement sur l'intrication, Mozi distribue des paires de photons intriqués vers deux stations au sol distantes de 1 120 km, Delingha et Nanshan. Ainsi, Mozi intrique et émet les photons distribués, sans en « connaître » l'état. Il importe alors peu que l'on fasse « confiance » ou non au satellite (il peut être construit ou appartenir à un pays étranger par exemple), puisque le satellite ne possède pas les clés de chiffrement, renforçant encore la sécurité de la communication entre les deux stations au sol⁵³. Pour le moment toutefois, le débit disponible dans

50. « Advancement in Quantum Entanglement Earns 2018 AAAS Newcomb Cleveland Prize », AAAS, 31 janvier 2019, disponible sur : www.aaas.org.

51. S. Liao *et al.*, “Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network”, ArXiv, 2018, disponible sur : <https://arxiv.org>.

52. J. Ren *et al.*, “Ground-to-Satellite Quantum Teleportation”, *Nature*, 9 août 2017.

53. J. Yin *et al.*, “Entanglement-Based Secure Quantum Cryptography over 1,120 Kilometres”, *Nature*, juin 2020, disponible sur : nature.com.

cette configuration est significativement plus faible (0,1 bit/s) que lorsque Mozi agit comme un relais de confiance (1 kbit/s)⁵⁴.

En février 2019, les chercheurs ont annoncé que le satellite Mozi, initialement prévu pour une durée de vie de deux ans (jusqu'en août 2018), continuerait d'opérer pendant au moins deux ans⁵⁵ (jusqu'à environ début 2021). Début 2022, Mozi est toujours en orbite et semble toujours opérationnel.

Les chercheurs du QUESS sont néanmoins explicites sur leur ambition de lancer d'autres satellites à court terme. L'objectif serait, d'une part, d'augmenter le nombre de satellites quantiques en orbite, tout en miniaturisant les instruments emportés et en réduisant la masse de la charge utile afin de rationaliser le coût du lancement. Une constellation de trois à cinq satellites permettrait, selon eux, de créer un réseau mondial de distribution de clés quantiques sécurisées⁵⁶. D'autre part, les scientifiques chinois envisagent d'élever l'altitude des orbites des prochains satellites (Pan a évoqué une altitude de 10 000 km), afin d'augmenter la couverture terrestre qui est aujourd'hui de seulement 1 000 km de diamètre pour une durée de 6 minutes avec Mozi⁵⁷.

Au-delà de ces expériences scientifiques sur la communication quantique sécurisée se dessine déjà le rêve de l'internet quantique. L'internet quantique reposerait sur une architecture spatiale (constellation de satellites) et des stations au sol, et serait relié au réseau de fibre optique terrestre à l'instar de la ligne Pékin-Shanghai. C'est notamment ce qu'indique Yin Juan, professeure à l'USTC et conceptrice en chef de l'instrument d'intrication quantique du satellite Mozi : « Notre objectif est de construire un système de réseau de communication sécurisé quantique étendu Terre-espace intégré complet, et de réaliser un lien fluide avec le réseau de communication classique, combiné avec lui, pour permettre une communication sécurisée et confidentielle⁵⁸ ». En septembre 2021, l'entreprise QuantumCTek (émanation de l'USTC) a présenté lors de la Conférence sur l'industrie quantique de Hefei, un prototype de station satellite quantique portable⁵⁹. Pesant moins de 100 kg et déployable en moins de 12 heures, elle doit permettre à l'utilisateur de recevoir une QKD

54. J. Yin, « "Mozi" - le long chemin pour chasser les étoiles » (« 墨子号——漫漫追星路 »), *Sina*, 10 mars 2021, disponible sur : <https://finance.sina.com.cn>.

55. « "Mozi" devrait travailler sur 2 ans pour initier davantage de coopération internationale » (« 墨子号”预计超期工作2年以上 展开更多国际合作 »), *Xinhua*, 15 février 2019, disponible sur : www.xinhuanet.com.

56. Étant donné qu'une QKD a seulement besoin d'être émise une fois, la couverture satellite n'a pas besoin d'être permanente comme celle de la géolocalisation par exemple.

57. J. Yin, « "Mozi" - le long chemin pour chasser les étoiles » (« 墨子号——漫漫追星路 »), *Sina*, *op. cit.*

58. *Idem.*

59. "China Advances Industrial Application of Quantum Technology", *Xinhua*, 19 septembre 2021, disponible sur : <http://english.www.gov.cn>.

en tout lieu (dans la limite de la couverture satellitaire) et ainsi de bénéficier d'une communication quantique sécurisée.

Ainsi, les expériences chinoises du programme QUESS n'ont effectivement pas conduit à des percées scientifiques fondamentales, mais l'orientation technologique du programme ne fait pas de doute et présente aujourd'hui des pistes d'applications prometteuses et stratégiques. Un réseau de communication quantique sécurisé global représenterait pour la Chine un avantage considérable sur le reste du monde, d'une part pour ses propres communications sécurisées (réseau d'ambassades à travers le monde, forces armées) ; et d'autre part pour ses applications commerciales (finance, banque en ligne, communication inter- et intra- entreprises, etc.), qui offrirait un atout aux entreprises chinoises et étrangères qui s'en doteraient, autant qu'elles les rendraient dépendantes au fournisseur étatique chinois de service de QKD.

Toutefois, la mise en œuvre de tels services demeure pour l'heure hypothétique et l'horizon de temps incertain. L'UE, naguère sceptique, s'est néanmoins elle-même engagée sur la voie de la communication quantique avec l'initiative d'Infrastructure de communication quantique européenne (EuroQCI), en juin 2019. À l'instar des projets chinois, EuroQCI envisage un segment terrestre et un segment spatial pour sécuriser les communications stratégiques et sensibles au sein de l'UE (institutions politiques, secteur de la santé, réseaux énergétiques...)⁶⁰. En mai 2021, la Commission européenne a sélectionné deux consortia d'industriels européens chargés de formuler des propositions quant aux orientations techniques à privilégier⁶¹. Le segment spatial demeure encore au stade d'étude.

60. « The European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) Initiative », Commission européenne, disponible sur : <https://digital-strategy.ec.europa.eu>.

61. Le premier consortium est mené par Airbus Defence and Space et comprend les entreprises Leonardo, Orange, PwC France et Maghreb, Telespazio, le Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM). Le second, nommé QSAFE, est mené par Deutsche Telekom et composé de Thales Alenia, l'Institut Autrichien des Technologies (AIT), Telefónica Investigación y Desarrollo SA. Communiqués de presse disponibles sur : www.airbus.com et www.thalesgroup.com.

Conclusion

Il existe un débat lancinant sur la capacité de la RPC à innover et à réaliser de véritables percées scientifiques et technologiques. Le débat s'articule autour de deux hypothèses contradictoires. La première pose que, par essence, il n'est pas possible de réaliser de véritable saut technologique dans un État autoritaire, en raison de la surveillance et de la pression exercée sur les scientifiques, de l'aversion au risque des chercheurs et des gestionnaires de recherche qui préfèrent faire profil bas plutôt que de s'exposer à d'éventuels échecs, critiques ou sanctions. La recherche scientifique, au contraire, requiert nécessairement de sortir de tout carcan idéologique et intellectuel. De plus, si de nombreux chercheurs chinois se forment à l'étranger puis reviennent au pays, le système autoritaire chinois pâtit d'un grave manque d'attractivité pour les chercheurs étrangers. La Chine fait ainsi face à un obstacle structurel qui l'empêche de devenir un grand pôle scientifique international⁶².

La seconde hypothèse, antagoniste à la première, suit une logique plus quantitative et anticipe que la RPC va mécaniquement devenir une grande puissance scientifique et technologique, en raison de l'augmentation rapide du nombre de scientifiques et d'ingénieurs et de leur niveau de savoir-faire, du nombre de brevets déposés, et de l'inflation des budgets de recherche⁶³.

Les avancées remarquables de la Chine en matière d'expérimentation et d'application de la physique quantique semblent démontrer que la RPC est capable de progrès rapides, et demain sans doute, de percées technologiques.

On note toutefois que les scientifiques chinois se sont jusqu'à maintenant davantage illustrés par des expérimentations novatrices plutôt que par des découvertes fondamentales. Ces découvertes demeurent encore largement l'apanage de l'Europe et de l'Amérique du Nord.

Eu égard au carcan idéologique, Xi Jinping lui-même a reconnu la nécessité d'accorder une plus grande liberté aux scientifiques pour favoriser l'innovation. Dans un discours de mai 2021, devant une assemblée de scientifiques et en présence de l'ensemble des membres du Comité permanent du Bureau politique, il a déclaré que : « davantage d'autonomie [devait] être donnée aux institutions de recherche » et que « les

62. Échange avec Pierre Lemonde, physicien, directeur de recherche au CNRS, Institut Néel.

63. Sur ce sujet, voir : S. Balme et P. Lemonde, « Un rêve d'hyperpuissance scientifique », *op. cit.*

scientifiques [devaient] jouir d'une plus grande marge de manœuvre pour décider des orientations techniques et de la manière d'utiliser les fonds⁶⁴ ».

Ces incitations sont encourageantes, mais elles apparaissent en même temps contradictoires avec le resserrement idéologique à l'œuvre en RPC, particulièrement tangible depuis 2017. L'université, où l'étude de la « pensée de Xi Jinping » se généralise, ne fait pas exception, et l'industrie du numérique a récemment connu une reprise en main musclée par le PCC. Ce climat semble *a priori* délétère pour une innovation technologique libre et ouverte, à moins que certains secteurs scientifiques stratégiques ne soient sanctuarisés, à l'instar de la physique nucléaire et des missiles balistiques durant l'ère maoïste. Le cas échéant, la physique quantique a toutes les chances de figurer sur la liste des domaines préservés.

Quoi qu'il en soit, le potentiel de rupture technologique que promettent les applications quantiques dans les secteurs économique, industriel et militaire en fait d'ores et déjà un champ de rivalité dans la compétition stratégique sino-américaine. Fin 2021, les États-Unis ont d'ailleurs inscrit des entreprises chinoises du secteur quantique sur leur liste de contrôle des exportations. C'est l'exemple de QuantumCTek, l'entreprise *spin-off* de l'USTC cotée à la Bourse de Shanghai, déjà évoquée plus haut⁶⁵. Ce type de sanctions, déjà appliquées aux secteurs de la 5G, des semi-conducteurs et des entreprises chinoises de défense de manière générale, vise à empêcher l'exportation ou la réexportation de matériel susceptibles d'aider la Chine à développer des technologies qui pourraient *in fine* menacer la sécurité nationale américaine.

Dans le contexte de compétition technologique internationale et de rivalité croissante entre la Chine et les États-Unis, la France et l'UE doivent ainsi poursuivre et renforcer leurs efforts engagés dans la recherche, afin de ne pas se trouver à l'avenir tributaire ou vulnérable à l'égard de technologies américaines ou chinoises.

64. "Xi Focus: Xi Stresses Sci-Tech Self-Strengthening at Higher Levels", Xinhua, 29 mai 2021, disponible sur : www.xinhuanet.com.

65. D. Sevastopulo, "US Blacklists Chinese Quantum Computing Companies", *Financial Times*, 24 novembre 2021. Liste des entités disponible sur : www.bis.doc.gov.



27 rue de la Procession 75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org