

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



La seconde révolution quantique Enjeux de souveraineté et de partenariats



Notre site



TOME 1
MAI 2026

Publiées avec le soutien
de l'Institut Mines Télécom



RÉALITÉS INDUSTRIELLES

ISSN 2271-7978 (en ligne)

ISSN 1148-7941 (imprimé)

Série trimestrielle - Mai 2026

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)
Ministère de l'Économie, des Finances
et de la Souveraineté industrielle et numérique
120, rue de Bercy - Télédock 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
<http://www.annales-des-mines.org>

Grégoire Postel-Vinay
Rédacteur en chef

Alexia Kappelmann
Secrétaire générale

Daniel Boula
Secrétaire général adjoint

Magali Gimon
Assistante de rédaction et Maquettiste

Nuria Gorris
Cheffe de projet multimédia

Publication

Photo de couverture
©Shutterstock - Iarisa Stefanjuk

Iconographie
Alexia Kappelmann

Mise en page
Nuria Gorris

Impression
Dupliprint Mayenne

Membres du Comité de rédaction

Serge Catoire
Président du Comité de rédaction

Godefroy Beauvallet

Pierre Couveinhes

Jean-Pierre Dardayrol

Jean-Marc Grognet

Hervé Mariton

Stéphane Molinier

Grégoire Postel-Vinay

Françoise Roure

Rémy Steiner

Claude Trink

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

Sauf mention contraire, les photos des auteurs sont considérées comme « droits réservés ».

La seconde révolution quantique : Enjeux de souveraineté et de partenariats

Tome I – Enjeux et technologies

Sommaire interactif, pour accéder à l'article souhaité, cliquez dessus

4

Préface

Grégoire POSTEL-VINAY

5

Introduction : De la science à l'ingénierie quantique, l'ère de l'ingénieur-savant

Frédéric BARBARESCO, Fabrice DUPUY
& François GERIN

9

Avant-propos : Thales et le quantique

Patrice CAINE

Les enjeux industriels du quantique

13

La stratégie nationale quantique française : Bilan intermédiaire et perspectives

Loïc LE LOARER et Raphaël BOUGANNE

16

Le calcul quantique à l'épreuve de l'ingénierie : La pile logicielle comme enjeu de souveraineté

Neil ABROUG

19

Les enjeux de l'industrie naissante du calcul quantique

Pierre BONNET

22

La France et l'ordinateur quantique

Vincent BERGER et Giuseppe LEO

25

Un état des lieux des principales tendances et des principaux acteurs dans le domaine des technologies quantiques grâce aux brevets

Jérôme PLANTÉ-BORDENEUVE

32

Le réseau des Maisons du Quantique : Structurer la filière stratégique du calcul quantique

Jean-Baptiste LATRE

35

Le financement des activités et projets quantiques

Christophe JURCZAK

39

« Normaliser pour régner » à l'ère du quantique, un audacieux défi pour l'Europe

Margherita ISSOIRE

Les actions de l'Europe

43

Quantum Europe Strategy: Quantum Europe in a changing world

Oscar DIEZ

48

Le projet ADEQUADE dans le cadre du Fonds européen de défense

Daniel DOLFI, Frédéric NGUYEN VAN DAU & Arnaud BRIGNON

Quantique et défense

52

L'investissement dual au service de la souveraineté : L'exemple du calcul quantique

Jean-Baptiste PAING

56

Les actions de l'AID en soutien d'un plan quantique ministériel

Patrick AUFORT

59

Technologies quantiques pour les applications aéronautique, spatial et défense : Rapport du GIFAS

Sylvain SCHWARTZ, Mathias VAN DEN BOSSCHE & Frédéric BARBARESCO

63

Initiatives de l'OTAN dans les technologies quantiques

Olivier PERNAUDET et Jean-Marc PUEL

Les enjeux humains

66

Les formations initiales, de reconversion et les recrutements ("*Quantum skills*")

Thomas ANTONI

69

Attractivité de la Région Île-de-France pour les acteurs internationaux des technologies quantiques : Quels enjeux ?

Thomas FAUVEL

72

Traduction des résumés

75

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné
par François GERIN,
Frédéric BARBARESCO & Fabrice DUPUY

Préface

Par Grégoire POSTEL-VINAY

Ingénieur général des mines

Le progrès technique avance par bonds, suivant à des rythmes divers les découvertes scientifiques fondamentales, et au moins deux forces le tirent : de grandes espérances et de grandes peurs. L'internet en est un exemple, né de l'ARPANet pour répondre à des enjeux de défense, mais aussi promu par les attentes énormes de pouvoir communiquer et échanger des quantités massives d'informations à grande distance ; l'intelligence artificielle a suivi, sujet brûlant du début des années 1980, puis un peu oublié avant de ressurgir au premier plan lorsque les capacités de calcul ont été suffisantes.

Il en est ainsi aujourd'hui du quantique, dont la science naît en 1924, et qui connaît une seconde révolution dans la décennie 1980 : espérer se servir de l'information des états quantiques pour des mesures d'une énorme précision – les capteurs quantiques –, pour les communications quantiques, et enfin pour un saut qualitatif et quantitatif : les calculateurs quantiques. Et, à côté de cette triple espérance, apparaît l'aspect dual de la technologie, et la crainte des appareils de défense de se trouver dépassés et contournés s'ils ne figurent pas rapidement parmi ceux qui maîtrisent ces technologies et en tirent un avantage stratégique ; mais aussi que toute la confiance des échanges reposant sur la cryptographie classique pourrait se trouver bouleversée.

Cantonné à ses débuts à de rares et excellents spécialistes, dont des prix Nobel français, et bénéficiant de leurs progrès, le quantique a ainsi surgi dans la sphère politique vers la fin de la décennie 2010, ce qui donne lieu à des investissements intellectuels, scientifiques et techniques considérables.

En France, le programme France 2030 lance en 2021 une stratégie nationale ambitieuse, dotée d'1 milliard d'euros et qui porte sur les progrès pour les simulateurs et calculateurs dits « bruités », l'ordinateur quantique tolérant aux fautes (programme décennal PROQCIMA), les technologies et applications des capteurs quantiques, les communications quantiques, l'offre de technologies habilitantes, et la cryptographie post-quantique.

En Europe, plus de 11 milliards d'argent public (européen et national) ont déjà été engagés dans les technologies quantiques au cours des cinq dernières années, dont 2 mds€ de l'UE.

Aux États-Unis, l'activité est aussi fébrile, portée à la fois par des moyens publics et surtout, désormais, par les GAMAM ; et la stratégie nationale de sécurité, rendue publique fin novembre 2025, cite trois priorités essentielles : l'IA, le quantique, les biotechs (et tous apports utiles aux armées). Le plan américain pour la recherche quantique, encadré principalement par le National Quantum Initiative Act (NQIA) de 2018, connaît une phase de renouvellement majeure en 2026 avec le prolongement de son financement jusqu'en 2034 et une stratégie "*quantum-smart*", qui vise à passer de la recherche fondamentale à la réalisation d'applications concrètes (santé, finance, énergie) ainsi qu'à sécuriser la chaîne d'approvisionnement face à la compétition mondiale.

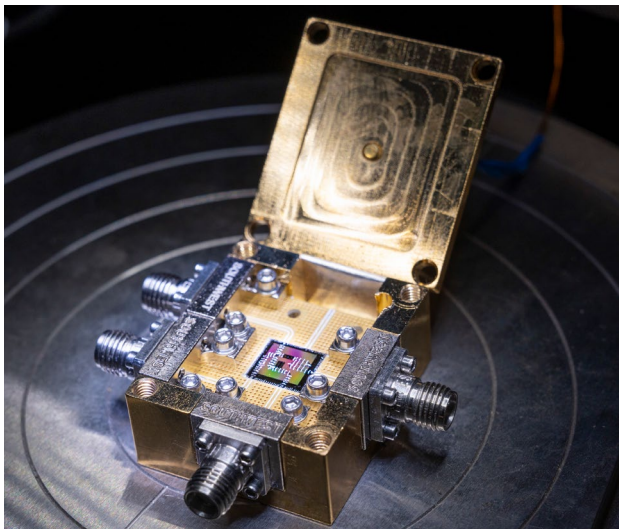
Le président chinois a également souligné l'importance cruciale des technologies quantiques, et son pays a des résultats remarquables dans le domaine de la communication et de l'informatique quantiques. Son plan quinquennal 2026-2030 identifie le quantique comme la première des sept industries d'avenir. L'objectif est qu'en 2030, le secteur ne dépende plus uniquement des subventions mais génère une valeur économique réelle (services *cloud*, capteurs industriels). En mars 2026, Pékin a annoncé une hausse de 10 % du budget pour la science (426 milliards de yuans, soit environ 54 milliards d'euros). Le quantique est l'un des trois secteurs prioritaires recevant la plus grosse part de cette augmentation.

*

Foisonnant, ce sujet a requis deux numéros des *Annales des Mines*, recouvrant sept thématiques : les enjeux industriels, les actions de l'Europe, les thématiques de défense, les enjeux humains, dans son premier tome ; les applications techniques de la seconde révolution quantique, les premiers services du quantique dans une dizaine de grands métiers, les concurrences et coopérations internationales dans le second. Je formule le vœu qu'il suscite tout l'intérêt et les vocations que ce sujet mérite.

De la science à l'ingénierie quantique, l'ère de l'ingénieur-savant

Par Frédéric BARBARESCO, Fabrice DUPUY & François GERIN
Coordinateurs du numéro



Prototype de puce Cat-Qubits mise au point par la start-up Alice & Bob (© Hubert RAGUET / Alice&Bob / LPENS / CNRS Images).

Les piliers de la mécanique quantique

La mécanique quantique, née en 1924, concerne les systèmes ou objets infiniment petits : les atomes, les ions, les électrons, les photons. La première propriété de l'état¹ d'un tel objet quantique est la **superposition** : c'est sa capacité à posséder plusieurs états simultanément. Par comparaison, prenons une pièce de monnaie : dans le monde classique, elle est soit sur « Pile », soit sur « Face » ; dans le monde quantique, tant que vous ne regardez pas la pièce, elle ne repose ni sur son côté pile, ni sur son côté face, mais dans une combinaison des deux. Et cette superposition cohérente peut **'s'effondrer'**, dès que l'on mesure ou que l'on observe l'état quantique.

La deuxième caractéristique abordée ici concerne l'**intrication**, un phénomène où les états quantiques de plusieurs éléments d'un ensemble (par exemple, deux pièces de monnaie) sont si fortement liés que l'état de l'un dépend instantanément de l'état de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare.

Si le monde quantique est si riche et contre-intuitif, nous n'avons pas encore un équipement quantique dans notre poche, du fait de la **décohérence**. Les états quantiques d'un tel système sont extrêmement fragiles ; le moindre changement de température, une vibration ou une onde électromagnétique peut briser la superposition, et

¹ Ou du moins c'est une propriété apparente, issue du formalisme mathématique conçu par Paul Dirac et John von Neumann.

Bienvenue dans le monde de l'infiniment petit, là où les règles du bon sens macroscopique s'effacent au profit d'une réalité aux lois microscopiques moins intuitives, mais régies pourtant par des équations très précises établies il y a plus d'un siècle. Après une rapide présentation du vocabulaire qui lui est propre, nous examinerons les trois grands domaines de réalité industrielle à venir, et les enjeux à relever pour passer d'une science maintenant centenaire à l'ingénierie quantique, qui nécessitera une nouvelle génération d'« ingénieurs-savants », comme au cours des siècles passés avec les révolutions industrielles de la machine à vapeur et de l'électricité.

détruire les précieuses superpositions et intrication au sein du système. C'est pour cette raison que les équipements quantiques actuels sont conservés dans des réfrigérateurs géants, à des températures proches du zéro absolu (- 273,15 °C).

Si la mécanique quantique est née il y a cent ans, et a donné lieu à des innovations comme le laser, l'horloge d'un satellite pour GPS, ou les transistors, la seconde révolution quantique, datée des années 1980, consiste à vouloir utiliser l'information des états quantiques dans au moins trois grands domaines : les capteurs quantiques, les communications quantiques, et les calculateurs quantiques.

Néanmoins, un enjeu de taille se joue pour la "*deep tech*" française, académique et industrielle, tant pour les ordinateurs et algorithmes quantiques, que pour les capteurs quantiques, les communications quantiques (la cryptographie et l'Internet quantiques) et les technologies habilitantes : l'ingénierie quantique. Cette seconde révolution quantique pourra devenir une réalité industrielle quand l'ingénierie permettra de passer à l'échelle et de pallier la fragilité des états quantiques.

Informatique quantique, ordinateurs quantiques

En informatique quantique, l'objectif principal est de construire des machines capables d'effectuer des

calculs en manipulant les états quantiques cohérents (superpositions et intrications) d'un grand nombre de qubits². La difficulté réside dans l'extrême fragilité de ces états, la décohérence effaçant rapidement l'information encodée dans l'état initialement cohérent. Prolonger les temps de cohérence tout en maintenant un contrôle opérationnel précis constitue l'un des défis les plus complexes de l'ingénierie moderne. Y parvenir exige des matériaux ultra-purs, un fonctionnement cryogénique à des températures souvent inférieures à quelques dizaines de millikelvins, et une isolation rigoureuse contre les perturbations électromagnétiques et vibratoires. Même les plus infimes imperfections de fabrication ou les fluctuations de température et de champs électromagnétiques peuvent induire une décohérence et des erreurs de calcul.

Étant donné que tous les qubits physiques seront intrinsèquement bruités, le calcul à grande échelle reposera de manière critique sur la correction d'erreurs quantiques (QEC). Pour ce faire, et contrairement aux systèmes classiques, la redondance ne pourra pas être implémentée par une simple duplication, les états quantiques ne pouvant être clonés. L'information doit donc être encodée sur des ensembles intriqués de qubits physiques pour former des qubits logiques résistants au bruit. La mise en œuvre de la correction d'erreur quantique à cette échelle est extrêmement exigeante : des milliers de qubits physiques peuvent être nécessaires pour réaliser un seul qubit logique tolérant aux pannes. Des solutions existent pour réduire ce nombre de qubits physiques, initiées en France et basées sur des boucles de rétroaction qui régulent les qubits bosoniques *via* les règles de la thermodynamique quantique dissipative.

Une autre difficulté réside dans le contrôle des qubits et le risque de diaphonie : l'opération de contrôle que vous effectuez sur un qubit « bave » sur ses voisins, créant une interférence indésirable. Pour garantir la tolérance aux pannes, les opérations des portes quantiques devront être exécutées avec une fidélité extrêmement élevée, généralement supérieure à 99,9 %.

La question de la mise à l'échelle est tout aussi fondamentale. Passer de dispositifs contenant quelques dizaines de qubits physiques à des dispositifs en comprenant des millions exige des paradigmes architecturaux entièrement nouveaux. Le câblage, le routage des signaux et la gestion thermique des grands systèmes cryogéniques imposent des contraintes d'ingénierie importantes. Les architectures modulaires, où plusieurs petits processeurs sont interconnectés par des liaisons photoniques, pourraient offrir une solution pratique pour cette mise à l'échelle. Une autre approche prometteuse réside dans l'intégration de technologies de qubits hétérogènes, telles que les circuits supraconducteurs, les ions piégés, les qubits de spin et les systèmes photoniques, au sein de plateformes hybrides.

Tout ceci sera abordé, notamment, dans les articles de Loïc LE LOARER et Raphaël BOUGANNE, « La stratégie nationale quantique française : bilan intermédiaire et perspectives », de Neil ABROUG, « Le calcul quantique à l'épreuve de l'ingénierie : La pile logicielle comme enjeu de souveraineté », de Pierre BONNET, « Les enjeux de l'industrie naissante du calcul quantique », et de Vincent

²En informatique quantique, un qubit, (*quantum* + *bit*), est un système quantique à deux niveaux, qui représente la plus petite unité de stockage d'information quantique. Ces deux niveaux, notés $|0\rangle$ et $|1\rangle$ selon le formalisme de Dirac, représentent chacun un état de base du qubit, et en font donc l'analogie quantique du bit.

BERGER et Giuseppe LEO, « La France et l'ordinateur quantique », puis dans le tome II à paraître en août.

Capteurs quantiques

Les capteurs quantiques exploitent la sensibilité des systèmes quantiques aux perturbations externes pour réaliser des mesures d'une précision sans précédent. Ces capteurs peuvent détecter des champs magnétiques et électriques, des gradients gravitationnels, des accélérations ou des intervalles de temps avec une sensibilité bien supérieure aux limites classiques. Cependant, cette même sensibilité qui leur confère une telle puissance les rend également vulnérables au bruit environnemental. Le défi fondamental consiste à préserver la cohérence suffisamment longtemps pour effectuer une mesure, malgré l'interaction constante avec l'environnement.

Les capteurs quantiques utilisent souvent des centres NV dans le diamant³, des ions piégés ou des ensembles d'atomes froids en configuration interférométrique. Dans tous les cas, le capteur doit être suffisamment couplé à la grandeur d'intérêt pour enregistrer un signal mesurable, tout en étant simultanément isolé des bruits parasites. L'obtention de cet équilibre délicat exige une conception soignée du blindage électromagnétique, une rétroaction active et un contrôle précis du point de fonctionnement afin que le capteur opère dans des régions de sensibilité réduite aux fluctuations.

À mesure que ces technologies mûrissent, la miniaturisation et l'intégration deviennent des enjeux cruciaux. Ce thème sera, notamment, présenté dans le tome II.

Communications quantiques

Les communications quantiques exploitent les principes de la mécanique quantique, notamment l'intrication quantique et le théorème de non-clonage, pour permettre la transmission sécurisée d'informations. L'application la plus connue, la distribution quantique de clés (QKD), permet à deux parties de partager des clés cryptographiques avec une sécurité théorique absolue. Au-delà de cela, les ingénieurs envisagent un internet quantique (en expérimentation au niveau de quelques villes), capable de distribuer l'intrication quantique entre des nœuds distants pour des communications sécurisées et pour permettre le calcul quantique distribué.

Le principal obstacle à un tel réseau est la perte et la décohérence des photons lors de la transmission. Les photons se propageant dans les fibres optiques sont absorbés et diffusés, limitant la distribution directe de l'intrication à quelques centaines de kilomètres. Les liaisons en espace libre et par satellite atténuent cette limitation, mais souffrent de la turbulence atmosphérique, de la divergence du faisceau et des erreurs de pointage. Pour surmonter ces difficultés, la communauté scientifique développe des répéteurs quantiques, qui s'appuient sur des nœuds intermédiaires équipés de mémoires quantiques pour stocker, et purifier. Cependant, cela requiert des mémoires quantiques présentant de longs temps de cohérence, un rendement élevé et des cycles de lecture-écriture rapides, des capacités qui restent encore techniquement difficiles à atteindre.

³https://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_azote-lacune

À un niveau supérieur, la synchronisation et le contrôle du réseau présenteront aussi des obstacles considérables. La distribution d'intrication et les protocoles de téléportation quantique exigent une synchronisation et une stabilité de phase extrêmement précises entre plusieurs nœuds du réseau, souvent à l'échelle de la nanoseconde. Les réseaux quantiques à grande échelle devront intégrer les canaux quantiques aux couches de communication classiques pour la coordination, le routage et la gestion des erreurs.

Ce thème sera, notamment, présenté dans le tome II.

Technologies habilitantes et intégration des systèmes

Pour les ordinateurs, les capteurs et les communications quantiques, certains défis d'ingénierie sont universels. La science des matériaux demeure un facteur déterminant : impuretés, défauts et rugosité de surface raccourcissent les temps de cohérence et réduisent la fidélité des portes logiques. La cryogénie constitue une autre contrainte majeure ; le maintien de températures stables de l'ordre du millikelvin exige des systèmes de réfrigération complexes et coûteux, difficiles à industrialiser⁴. La théorie du contrôle quantique jouera un rôle de plus en plus central, fournissant le cadre mathématique nécessaire à la conception de séquences d'impulsions et d'algorithmes de rétroaction optimaux qui stabilisent la dynamique quantique en présence de bruit.

Enfin, l'intégration des systèmes pose des difficultés supplémentaires, car les sous-systèmes quantiques devront interagir de manière transparente avec l'électronique classique chargée du contrôle, de la mesure et du retour d'information. La synchronisation, la gestion thermique et l'intégrité du signal devront être garanties dans des conditions extrêmes. Même la vérification et la validation représentent un défi de taille, car la mesure perturbe inévitablement l'état quantique testé.

Ce thème sera notamment présenté dans le tome II.

Applications pour tout un chacun

Tous ces développements visent à fournir des applications à l'industrie et aux services, à des dates dépendant des technologies utilisées dans les différentes disciplines et décrites précédemment.

On a vu ci-dessus ce qu'il en est pour les ordinateurs quantiques qui devraient permettre de mener des calculs actuellement impossibles ou d'une durée incompatible avec les objectifs visés. Des applications sont ainsi imaginées dans le domaine aéronautique, spatial et défense (voir le rapport du GIFAS⁵), dans les domaines de la chimie et de la pharmacie pour la conception de molécules de grandes dimensions ("*block busters*"), pour des simulations sur des structures complètes d'objets ou de systèmes de grandes tailles (navires, réseaux électriques ou de télécommunications), comme aussi pour des simulations financières de grandes ampleurs.

Par ailleurs dans le domaine des capteurs, une liste non exhaustive d'applications comprend :

1. les systèmes de navigation inertielle ou hybride, en particulier dans l'aéronautique ;
2. la médecine avec des IRM portatifs quantiques pour l'examen du cerveau ou du cœur, et des biosenseurs quantiques permettant des diagnostics rapides sur des échantillons biologiques réduits ;
3. l'industrie, pour des contrôles non destructifs de pièces produites, allant jusqu'à la nanoélectronique, pour en garantir la qualité ;
4. enfin pour la Défense, allant de pair avec la navigation notamment autonome, la localisation plus précise des objets et personnes dans des environnements perturbés, des détections magnétiques (par exemple pour la géolocalisation en l'absence de GPS) et électromagnétiques à large bande.

Les communications devraient bénéficier comme indiqué ci-avant de la distribution quantique de clés (QKD), puis bénéficieront des codages post-quantiques contre les attaques cyber-quantiques sur les chiffrements actuellement en usage. Vous trouverez ces thèmes relatifs aux applications, notamment, dans le tome II.

Conclusion

Ce rapide aperçu montre ainsi le potentiel de développement des applications fondées sur les technologies quantiques. Les articles des deux tomes de ce numéro des *Annales des Mines* exposent des cas d'applications dans des secteurs variés.

En particulier, ce tome I met en valeur :

- les dépôts de brevets dans le monde entier (« Un état des lieux des principales tendances et des principaux acteurs dans le domaine des technologies quantiques grâce aux brevets » de Jérôme PLANTÉ-BORDENEUVE) ;
- l'importance de la normalisation volontaire (« "Normaliser pour régner" à l'ère du quantique, un audacieux défi pour l'Europe » de Margherita ISSOIRE) ;
- le rôle des Maisons du Quantique pour le développement des activités régionales dans ce domaine en France (« Le réseau des Maisons du Quantique : Structurer la filière stratégique du calcul quantique » de Jean-Baptiste LATRE), ainsi que les actions de la Région Île-de-France dans la compétition internationale (« Attractivité de la Région Île-de-France pour les acteurs internationaux des technologies quantiques : quels enjeux ? » de Thomas FAUVEL) ;
- les aspects financiers, clés pour le développement d'une industrie du quantique et des services associés, de plus en plus importants par rapport à la technologie ; il s'agit là d'un enjeu de taille pour la France et l'Europe (« Le financement des activités et projets quantiques » de Christophe JURCZAK) ;
- le rôle essentiel de l'Europe, dans le cadre de la "Quantum European Strategy", avec l'apparition de chaînes de valeur du domaine quantique, et dans l'attente du Quantum Act en 2026 ("Quantum Europe

⁴https://fr.wikipedia.org/wiki/Refroidissement_d%27atomes_par_laser

⁵https://www.gifas.fr/brochures?prod_pages%5BrefinementList%5D%5Btags.name%5D%5B0%5D=innovation

Strategy: Quantum Europe in a changing world" de Oscar DIEZ) ;

- les enjeux humains considérables de ce nouveau secteur économique, notamment en matière de formation et d'éducation (« Les formations initiales, de reconversion et les recrutements ("Quantum skills") » de Thomas ANTONI).

Enfin sont également présentées les actions menées dans le domaine de la Défense et des technologies duales en France par l'Agence d'Innovation Défense et particulièrement dans les programmes PROQCIMA et ALIQUANTE (« Les actions de l'AID en soutien d'un plan quantique ministériel » de Patrick AUFORT, et « L'investissement dual au service de la souveraineté : l'exemple du calcul quantique » de Jean-Baptiste PAING), par le secteur aéronautique et spatial (« Technologies quantiques pour les applications aéronautique, spatial et défense : rapport du GIFAS » de Sylvain SCHWARTZ, Frédéric BARBARESCO & Matthias VAN DEN BOSSCHE), ainsi qu'en Europe avec le projet Adequate (« Le projet ADEQUATE dans le cadre du Fonds européen de défense » de Daniel DOLFI, Frédéric NGUYEN VAN DAU & Arnaud BRIGNON), et au sein de l'OTAN (« Initiatives de l'OTAN dans les technologies quantiques » de Olivier PERNAUDET et Jean-Marc PUEL).

Thales et le quantique

Par Patrice CAINE

Président-directeur général du Groupe Thales

Dans cet article, Patrice Caine revient sur la place singulière qu'occupe Thales dans la course aux technologies quantiques : grâce à son implication de longue date dans ce domaine, ses partenariats académiques structurants, et une expertise unique pour les cas d'usage de défense et d'aéronautique, le Groupe se positionne comme acteur clé pour transformer les promesses de la seconde révolution quantique en atouts pour l'autonomie stratégique française et européenne.

Introduction

Toutes les révolutions technologiques ne se ressemblent pas. Certaines surgissent brutalement et bouleversent les usages en quelques mois ; d'autres se déploient lentement, longtemps en marge de l'actualité, avant de transformer en profondeur nos sociétés. Alors que l'IA générative et les modèles de langage illustrent la première catégorie, les technologies quantiques appartiennent clairement à la seconde.

Plusieurs décennies ont été nécessaires entre la formalisation de la théorie quantique au début du XX^e siècle et l'émergence de produits de rupture comme les transistors, les lasers ou les horloges atomiques. Ces briques élémentaires sous-tendent l'informatique moderne, les communications par fibre optique et les systèmes de positionnement par satellite. Il a fallu un long temps d'assimilation pour que les industriels s'approprient ce nouveau paradigme, en dégagent les implications concrètes, puis le traduisent en technologies fiables et industrialisables.

Un héritage industriel déjà quantique

Thales est l'un de ces acteurs industriels qui ont su inscrire le quantique au cœur de leur trajectoire technologique. L'histoire du Groupe est intimement liée à celle de la physique quantique appliquée.

Thales s'est, notamment, illustré dans la conception et la réalisation de circuits hyperfréquences à base de semi-conducteurs III-V. Cette technologie, très performante dans des conditions extrêmes, équipe aujourd'hui les radars militaires, ainsi que les détecteurs infrarouges utilisés par nos forces armées. Le Groupe a également contribué à la mise au point de lasers d'extrême puissance, d'horloges atomiques embarquées pour les systèmes de positionnement par satellite, ou encore de solutions d'imagerie par résonance magnétique.

Si Thales a su anticiper et accompagner ces transformations, c'est parce que le Groupe est en contact direct avec la science fondamentale. Depuis plus de quarante ans, il tisse des liens structurants avec le monde académique, au travers de partenariats stratégiques avec

le CNRS, le CEA, l'École polytechnique, l'ENS, l'Université Paris-Saclay, l'Institut d'Optique, Télécom Paris, Sorbonne Université, sans oublier l'École des Mines, ainsi que plusieurs universités européennes.

En 1995, Thales, le CNRS et l'Université Paris-Saclay ont cofondé le laboratoire commun Albert-Fert, mondialement reconnu pour ses recherches dans le domaine du quantique et des matériaux avancés. En interne, Thales Research & Technology rassemble une centaine d'experts quantiques, à l'interface entre recherche et industrie. Une analyse de la revue *Nature*¹ a d'ailleurs positionné Thales comme l'industriel européen leader en nombre de publications en physique en 2025. Ce lien étroit avec la science irrigue l'ensemble de l'entreprise, nous a permis d'être au rendez-vous de la première révolution quantique, et nous a préparés, en amont, à l'avènement de la seconde.

Préparer la seconde révolution quantique

Depuis une vingtaine d'années, Thales investit résolument dans les technologies émergentes de la « seconde révolution quantique ». Celle-ci repose sur la maîtrise active des propriétés quantiques de la matière et de la lumière – en particulier, la superposition et l'intrication – pour développer de nouvelles générations de capteurs, de communications sécurisées et de calculateurs.

Les travaux pionniers des prix Nobel français Alain Aspect et Claude Cohen-Tannoudji, d'une part, et de Serge Haroche, d'autre part, dans les années 1980-1990, en ont établi les fondements expérimentaux. Restait aux industriels à convertir ces avancées en technologies robustes, intégrables dans des systèmes complexes, et à en assurer le passage à l'échelle.

¹ *Nature Index 2025.*

Sur ce chemin, Thales dispose d'atouts très importants :

- Une connaissance intime des cas d'usage dans les domaines de la défense, de l'aéronautique et du spatial.
- Une maîtrise des technologies habilitantes critiques – cryogénie, photonique, optique, lasers... –, indispensables à l'embarquabilité, la stabilité et à la fiabilité des dispositifs quantiques.
- Un savoir-faire dans la conduite de programmes de R&D de long terme, mobilisant sur plusieurs années industriels, laboratoires académiques et agences publiques.

Notre stratégie quantique se structure autour d'un triptyque : capteurs, communications, calcul. Au sein de cet ensemble, les capteurs occupent aujourd'hui une place centrale.

Les capteurs quantiques au cœur de la stratégie de Thales

Les capteurs quantiques promettent des gains de sensibilité et de précision spectaculaires, entre 10 et 1 000 fois supérieurs aux technologies actuelles. Pour les applications de défense, l'avantage opérationnel induit est potentiellement décisif : meilleures capacités de détection, de navigation, de surveillance ou de guerre électronique, y compris dans des environnements contestés ou dégradés.

Thales est déjà l'un des leaders européens des capteurs avancés. Il entend consolider cette position en développant des capteurs quantiques de nouvelle génération capables de répondre à des exigences fortes en matière de miniaturisation, d'embarquabilité et de frugalité énergétique. Les cas d'usage visés vont de la navigation autonome indépendante des systèmes de positionnement par satellite, à la détection de radiofréquences, en passant par la magnétométrie de haute sensibilité.

Parmi les technologies les plus prometteuses développées par la R&D de Thales, on peut citer :

- les filtres interférentiels quantiques supraconducteurs (SQIF) ;
- les centrales inertielles à atomes froids sur puce ;
- les diamants à centres NV.

Filtres interférentiels quantiques supraconducteurs (SQIF)

Les filtres interférentiels quantiques supraconducteurs – des circuits intégrés refroidis par cryostat – se caractérisent par une sensibilité extrême aux variations du champ magnétique.

Contrairement aux antennes classiques, leur dimensionnement est largement indépendant de la longueur d'onde du signal. Ils ouvrent ainsi des perspectives de miniaturisation substantielles : des surfaces de plusieurs mètres carrés pourraient être réduites à quelques centimètres carrés.

Ces capteurs présentent en outre une large bande passante naturelle, la détection du flux magnétique étant, par principe, indépendante de la fréquence. Un seul capteur miniature pourrait ainsi couvrir de nombreuses gammes de radiofréquences, là où des installations classiques nécessitent plusieurs antennes de tailles différentes.

Les gains opérationnels attendus sont majeurs : allongement des distances de détection, meilleure sensibilité aux signaux faibles ou furtifs ainsi qu'une compacité accrue permettant l'intégration sur des plateformes contraintes en volume et en masse.

Les antennes SQIF développées par Thales sont actuellement au stade de maquettes, et pourront bientôt faire l'objet d'essais en conditions réalistes.

Centrales inertielles à atomes froids

Parallèlement, Thales développe des centrales inertielles quantiques à atomes froids, qui exploitent le caractère ondulatoire des atomes pour réaliser des interférences et mesurer d'infimes variations de mouvement (rotations et accélérations). En théorie, cette technologie permettrait des mesures jusqu'à 10^{11} fois plus précises que celles obtenues avec des gyrolasers classiques.

Cet écart s'explique par la physique : les atomes ont une masse, contrairement aux photons, ce qui leur confère une énergie bien supérieure. L'interférométrie atomique bénéficie de ce surplus d'énergie pour accroître la sensibilité. En pratique, les contraintes de miniaturisation, de robustesse et d'embarquement limitent ce gain à un facteur compris entre 10 et 100, ce qui reste suffisant pour atteindre, voire dépasser, la précision des systèmes de navigation par satellite (GPS, Galileo, etc.).

Intégrées dans des avions, des sous-marins ou des drones, ces centrales inertielles quantiques offriraient une capacité de navigation autonome en cas de brouillage, de dégradation ou de destruction des satellites, et permettraient de réduire les vulnérabilités liées au besoin fréquent de recalage.

Thales travaille activement à la mise au point de ces systèmes à atomes froids : l'un des enjeux est aujourd'hui de miniaturiser en s'appuyant sur la photonique intégrée, pour contrôler les impulsions laser nécessaires au refroidissement des atomes et à l'interférométrie.

Centres NV du diamant

Enfin, Thales travaille sur les centres NV (azote-lacune) dans le diamant pour l'analyse de signaux radiofréquence, la magnétométrie et la navigation. Le diamant est réputé pour sa grande pureté cristalline, mais il est possible de créer des défauts contrôlés dans son réseau. En remplaçant un atome de carbone par un atome d'azote (N) et en créant une lacune (V) adjacente, on obtient un centre NV : un système quantique extrêmement sensible aux champs électro-magnétiques.

Très compacts, les capteurs développés par nos équipes pourraient, à terme, équiper des drones, des sous-marins ou des bouées de surveillance pour détecter des cibles furtives. Cette technologie présente l'avantage de fonctionner à température ambiante, sans dispositif de cryogénie ni refroidissement par laser, ce qui simplifie grandement l'intégration et réduit les coûts d'exploitation.

Des démonstrateurs compacts transportables pour l'analyse radiofréquence ont déjà été présentés à plusieurs salons internationaux. Par ailleurs, des explorations préliminaires sont en cours pour évaluer le potentiel des centres NV dans des applications de navigation.

Construire un réseau quantique européen

Au-delà des capteurs, Thales se positionne comme un acteur important des technologies de communication quantique, en particulier, les réseaux d'information quantique (QIN) et la distribution quantique de clés (QKD).

Le principe de la QKD consiste à encoder des clés de chiffrement – celles qui sécurisent nos communications – sur des bits quantiques (qubits) plutôt que sur des bits classiques, en utilisant par exemple la polarisation de photons comme support d'information. Toute mesure sur un qubit modifie irrémédiablement son état : toute tentative d'interception par un tiers est donc immédiatement détectable, ce qui ouvre la voie à des communications d'un niveau de sécurité inédit.

Les QIN prolongent la logique de la QKD en cherchant à interconnecter plusieurs nœuds quantiques (capteurs, calculateurs, répéteurs...) au sein d'une véritable « infrastructure réseau » capable, à terme, d'offrir toute une gamme de services quantiques distribués.

C'est dans ce contexte que Thales et ses partenaires académiques ont réalisé, dès 2012, des premiers liens terrestres de communication quantique en Autriche. Plus récemment, Thales Alenia Space a signé un accord de collaboration avec la start-up SpeQtral pour tester la transmission de photons intriqués par satellite entre l'espace et la Terre, avec l'objectif d'interconnecter des réseaux quantiques terrestres situés sur différents continents.

Étant donné les investissements nécessaires et les enjeux de souveraineté associés, ces technologies doivent être abordées à l'échelle européenne. Thales est un partenaire industriel majeur du projet d'infrastructure européenne EuroQCI, qui vise à construire des réseaux de communication sécurisés par le quantique. Thales Alenia Space s'est vu confier le développement de la composante spatiale de ce projet.

Le Groupe est également membre du consortium NOS-TRADAMUS, piloté par Deutsche Telekom, en charge de déployer l'infrastructure d'essais de communication quantique de l'Union européenne. Là encore, l'enjeu est double : bâtir une capacité technologique européenne de premier plan et garantir la souveraineté numérique des États membres.

Anticiper les cas d'usage du calcul quantique

Le troisième axe stratégique de Thales sur le quantique est le calcul. Le Groupe ne développe pas directement de processeurs quantiques, mais se positionne comme coconcepteur d'algorithmes afin d'identifier les cas d'usage civils et militaires pertinents pour ses métiers et pour ses clients.

Nos travaux concernent, d'une part, l'application du calcul quantique pour l'ingénierie, d'autre part, l'utilisation en opération des algorithmes quantiques.

Les premiers cas d'usage explorés concernent, notamment, l'optimisation, la combinatoire et le traitement du signal. On peut citer entre autres exemples :

- la simulation électromagnétique avancée d'antennes et de radars ;

- l'optimisation de trajectoires (drones...) ou de déploiement de constellations de satellites ;
- l'amélioration de l'analyse d'images dans des environnements très bruités ;
- l'accélération de certains algorithmes de détection ou de classification ;
- la recherche et mise au point de nouveaux matériaux.

Thales se positionne également comme un acteur de référence du *benchmarking* des calculateurs quantiques, un sujet crucial pour dépasser les effets d'annonce et mesurer objectivement la performance réelle des machines pour des applications qui intéressent notre industrie.

Le Groupe pilote le projet BACQ (Benchmarks Applicatifs des Calculateurs Quantiques) au sein du programme MetriQsFrance du Laboratoire national de métrologie et d'essais. Thales représente aussi la France au sein du European Quantum Computing Benchmarking Coordination Committee. Le Groupe a contribué à la rédaction du chapitre consacré au *benchmarking* des calculateurs quantiques dans le rapport 2025 de l'Académie des technologies, ainsi qu'au rapport 2024 du GIFAS sur les technologies quantiques pour les applications aéronautiques, spatiales et de défense.

En 2023, nous avons organisé un *hackathon* quantique à grande échelle, qui a mobilisé plus de 80 experts dans 5 pays simultanément, sur la base de cas d'usage fournis conçus par différentes activités du Groupe.

Dans le domaine de la défense, Thales collabore au programme PROQCIMA piloté par la Direction générale de l'Armement, et à un Groupe de travail de l'OTAN.

Faire émerger une base industrielle et technologique quantique en Europe

La seconde révolution quantique connaît aujourd'hui une phase d'accélération. Les premiers capteurs quantiques devraient être testés par les forces armées d'ici cinq ans et entrer en phase d'industrialisation d'ici une dizaine d'années. Pour réussir cette transition, une stratégie européenne cohérente est indispensable. Celle-ci devrait prochainement être matérialisée par un "Quantum Act" à l'échelle de l'Union.

À plusieurs occasions, Thales et d'autres industriels ont souligné auprès des pouvoirs publics la nécessité de synchroniser les efforts des États membres et de construire une véritable *supply chain* européenne du quantique. Les projets nationaux doivent être complémentaires, alignés, et s'inscrire dans une continuité recherche-développement-industrialisation.

Pour rester dans la course, l'Europe ne peut se permettre des initiatives dispersées. Il est impératif que les budgets de défense et de recherche soient coordonnés et que l'ensemble des acteurs – PME, start-ups, laboratoires, grands groupes – convergent autour d'une feuille de route partagée. Le temps presse : le ralentissement, voire l'arrêt, du dépôt de brevets dans certains domaines par les États-Unis et la Chine laisse penser que des applications sensibles ont atteint un degré de maturité suffisamment avancé pour que ces pays privilégient désormais le secret à la protection de la propriété intellectuelle.

Notre souveraineté dépendra aussi de notre capacité à bâtir une base industrielle résiliente couvrant toute

la chaîne de valeur : matériaux de base, terres rares, technologies habilitantes.

En particulier, les start-ups et PME spécialisées dans ces domaines doivent pouvoir atteindre une masse critique afin d'assurer leur pérennité, ce qui dépend fortement de la capacité de l'Europe à construire une vision industrielle coordonnée. Il faut éviter les duplications de capacités et structurer des marchés suffisamment larges à l'échelle de l'Union.

Cette exigence de mutualisation vaut aussi pour les technologies à double usage civil-défense. L'élargissement vers des marchés adjacents constitue d'ailleurs un levier efficace pour assurer la viabilité et la compétitivité de la filière européenne. La production de semi-conducteurs III-V en fournit un exemple : pour garantir notre souveraineté sur ces briques critiques, Thales et Airbus ont créé dès 1996 la filiale United Monolithic Semiconductors (UMS), dont les usines en France et en Allemagne auraient été difficilement compétitives si elles ne servaient que des applications de défense. Leur charge a donc été complétée par des marchés civils (médical, automobile...), permettant d'atteindre les volumes et les coûts nécessaires.

Notre souveraineté dépend de notre capacité à trouver, pour chaque maillon de la chaîne d'approvisionnement, la bonne équation industrielle et financière.

Inscrire le quantique dans la durée

Enfin, la responsabilité des industriels est de soutenir des cycles d'innovation longs. Les technologies quantiques de seconde génération nécessitent des programmes de R&D qui se déploient sur des horizons de dix à quinze ans. Les cycles de financement publics de trois ans, qui structurent la plupart des appels à projets, sont trop courts pour assurer la continuité nécessaire à la maturation de ces technologies.

Si l'Europe veut rester dans la course, elle doit assumer une vision de long terme, associant États, agences, industriels et investisseurs privés. Le décloisonnement entre civil et défense sera déterminant : le monde civil avance sur certains fronts, la défense sur d'autres. Le succès de la seconde révolution quantique reposera sur notre capacité à mutualiser les efforts, à partager les résultats, et à coordonner les priorités dans le cadre d'une feuille de route européenne ambitieuse.

Thales prendra sa part dans cet effort, fidèle à son rôle d'interface entre science et industrie : transformer les promesses du quantique en capacités concrètes, au service de la souveraineté, de la sécurité et de la compétitivité de l'Europe.

La stratégie nationale quantique française : Bilan intermédiaire et perspectives

Par Loïc LE LOARER et Raphaël BOUGANNE

Coordinateur et coordinateur adjoint de la stratégie nationale quantique

La mécanique quantique suscite un engouement mondial pour ses promesses technologiques : capteurs ultra précis, communications inviolables et calcul quantique capable de révolutionner la cryptographie ou la chimie. En 2021, la France a lancé une stratégie nationale ambitieuse, dotée d'1 milliard d'euros *via* France 2030, pilotée par le SGPI (Secrétariat général pour l'investissement). Cinq ans plus tard, le bilan est tangible : doublement des formations en quantique, percées scientifiques *via* le PEPR (Programme et équipement prioritaire de recherche) et des programmes phares comme PROQCIMA, visant l'industrialisation d'un ordinateur quantique tolérant aux fautes d'ici 2032. La France se positionne avec une diversité technologique unique.

Cependant, la suprématie financière remplace progressivement la suprématie technologique. Pour maintenir sa souveraineté, la France doit accélérer l'industrialisation et s'inscrire dans une dynamique européenne. L'enjeu d'ici 2030 est de préserver son *leadership*, en protégeant ses acteurs et en sécurisant ses chaînes d'approvisionnement.

Introduction

La mécanique quantique est ce domaine scientifique dont Richard Feynman, l'un des plus célèbres physiciens du XX^e siècle, a dit que personne ne la comprenait vraiment. Elle génère pourtant un désir si puissant parmi la communauté scientifique et son cortège militaro-industriel que de nombreux États et entreprises se sont engagés dans un virage technologique qui porte, la plupart du temps, sur une triple promesse : (i) des capteurs à la précision inégalée ; (ii) des communications inviolables ; et (iii), sans doute celle qui déchaîne le plus de passions, un nouveau paradigme de calcul capable de briser une bonne partie du chiffrement mondial ou résoudre des problèmes de simulation en chimie ou en sciences des matériaux jusqu'alors inaccessibles mêmes aux plus grands supercalculateurs.

Fin 2019, une mission parlementaire pilotée par Paula Forteza, Jean-Paul Hertemann et Iordanis Kerenidis a formulé 50 propositions pour bâtir une stratégie nationale ambitieuse dans les technologies quantiques. Ceci a abouti un an plus tard à l'annonce par le président de la République (en janvier 2021) d'un soutien public pluriannuel d'environ 1 milliard d'euros. Le pilotage de cette stratégie et son déploiement ont été confiés au Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), au sein duquel a été installée la coordination de la stratégie quantique nationale. La stratégie quantique est pleinement intégrée au plan d'investissement national dans l'innovation : France 2030.

Alors, cinq années plus tard, où en sommes-nous ?

Une stratégie pensée pour fédérer les acteurs sur l'ensemble du continuum formation-recherche-innovation

La France bénéficie d'une tradition formidable en mécanique quantique et d'un héritage exceptionnel que l'on peut illustrer de façon très schématique par les trois derniers prix Nobel de physique attribués à des Français, notamment : Serge Haroche en 2012, Alain Aspect en 2022 et Michel Devoret en 2025. Grâce à son tissu dense d'établissements d'enseignement supérieur et de recherche, et avec ses trois grands opérateurs de recherche et de développement technologique : le CNRS, le CEA et INRIA, une stratégie holistique a pu être déployée.

Cette stratégie est le croisement entre, d'une part, six axes technologiques :

- simulateurs et calculateurs dits « bruités » *noisy intermediate scale quantum* ;
- ordinateur quantique tolérant aux fautes *large scale quantum* ;
- technologies et applications des capteurs quantiques ;
- applications des communications quantiques ;
- offre de technologies habilitantes ;
- offre de cryptographie post-quantique ;

et, d'autre part, quatre axes de structuration de l'écosystème :

- développement des compétences et du capital humain ;

- prise de risques en recherche amont et collaborative ;
- amélioration de l'environnement entrepreneurial ;
- renforcement des infrastructures technologiques.

Un accompagnement global et intégré

La coordination nationale au SGPI, qui a la responsabilité de formuler les propositions d'investissement à la gouvernance du plan France 2030, est la clé de voûte de la stratégie, et son rôle ne se limite pas au financement et à la mise en place des programmes présentés ci-après.

La coordination nationale anime les parties prenantes de la communauté interministérielle (en particulier les ministères de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, des Armées et de l'Économie). Elle assure la cohérence de l'action de l'État à l'international (notamment au niveau de l'Union européenne). Elle agit en soutien des entreprises dans leurs approches des marchés export et pour leurs levées de fonds. Elle veille à protéger les intérêts de l'État face aux menaces de prédation étrangère.

Clairement identifiée et reconnue par l'ensemble des acteurs, la coordination nationale constitue un élément structurant pour assurer le bon déroulement de la stratégie et contribuer à fédérer les acteurs.

Le socle fondamental soutenu par deux outils génériques de France 2030

Afin d'accompagner le besoin de l'écosystème en profils de haut niveau, une vingtaine d'établissements publics d'enseignement supérieur se sont réunis dans le consortium QuanTEdu-France, pour renforcer l'offre de formation existante et doubler le flux de sortie d'ingénieurs et de docteurs dans les technologies quantiques. Ce consortium a été financé en subvention pour près de 60M€ par France 2030 sur l'appel à manifestation d'intérêt Compétences et Métiers d'Avenir.

La recherche fondamentale, quant à elle, a été soutenue à travers un dispositif dit « programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) » de près de 140M€ de subventions, structuré en 4 priorités : qubits à l'état solide, qubits atomiques, algorithmes et concepts en rupture. Le pilotage du PEPR quantique a été confié au CNRS, au CEA et à l'INRIA. Douze premiers projets ciblés ont été contractualisés en 2023, deux projets complémentaires ont démarré en 2023, 8 projets complémentaires ont été lancés en 2024. En quatre ans, le PEPR a contribué à créer 6 start-ups, il a produit 602 publications (en phase avec les indicateurs cibles), 48 brevets, 58 thèses CIFRE et 5 laboratoires communs en lien avec l'industrie.

L'innovation dans le domaine du calcul quantique soutenue à travers trois programmes cœurs : hybrid quantum infrastructure (HQI), Q-Loop et PROQCIMA

Piloté par GENCI, le CEA et INRIA, HQI a été lancé en 2022 avec un budget total de 72M€ de subventions avec pour objectif d'anticiper l'hybridation entre les capacités de calcul classique et quantiques. Il s'agit de fédérer un écosystème de développeurs autour des premiers processeurs quantiques conçus par des start-ups françaises. Ce programme a permis d'installer déjà deux machines quantiques bruitées au Très Grand Centre de Calcul (Ruby de Pasqal et Lucy de Quandela). Une troisième machine devrait être installée en 2027.

Le programme Q-Loop, piloté par l'IRT Nanoelec et avec un budget de 40M€, focalise ses efforts de développement sur l'électronique de contrôle et la correction d'erreurs. Ces briques indispensables pour le passage

à l'échelle des concepteurs de processeurs quantiques sont encore à des niveaux de maturité faibles, et les années qui viennent seront déterminantes.

Enfin, le programme phare de la stratégie française, PROQCIMA, un partenariat d'innovation lancé en 2024 pour une durée d'au moins dix ans, visant à soutenir en France l'émergence de deux acteurs capables de fournir à l'État un ordinateur quantique tolérant aux fautes. Cinq entreprises ont été retenues au départ (Alice&Bob, C12, Pasqal, Quandela et Quobly). Compte-tenu de son fort caractère dual, la maîtrise d'œuvre de ce programme de commande publique a été confiée au ministère des Armées. Il est doté d'un budget maximal de 500M€ sur dix ans.

L'environnement technologique du processeur structuré par des initiatives couvrant l'amont et l'aval de la chaîne de valeur

Trois programmes ont été mis sur pied afin de soutenir « l'environnement » du processeur, ce que l'on appelle les technologies habilitantes (pour 75M€ de subventions). Trois secteurs clés ont été identifiés et un accompagnement dédié mis en œuvre : (i) l'approvisionnement en isotopes stratégiques a été confié au CEA ; (ii) le développement et l'industrialisation de systèmes cryogéniques dédiés quantiques a été confié à un consortium incluant des industriels et des laboratoires de recherche ; (iii) le développement de lasers pour la manipulation des atomes a été confié à l'Institut d'Optique.

La mobilisation des acteurs français sur des travaux de standardisation normatifs et pré-normatifs a été soutenue à travers le programme MetriQs (13M€ de subventions). Un premier projet a été lancé en 2023 avec pour ambition de développer et diffuser un *benchmark* applicatif de paternité française, un second projet lancé en 2025 permettra de développer des plateformes de métrologie pour les qubits à l'état solide ; il rassemble tous les acteurs français sur secteur et permettra de caractériser les composants critiques pour le calcul quantique.

Enfin, un start-up studio (Quantum LaunchPad) et un programme de maturation technologique (QuantXium) ont été soutenus pour essaimer les découvertes des laboratoires.

Le bilan des cinq premières années de la stratégie est très encourageant

Les faits marquants que l'on peut retenir de ces cinq premières années de mise en œuvre sont :

- l'augmentation remarquable du nombre de formés en masters (+ 40 %) et thèses (+ 25 %) dédiées aux technologies quantiques permet de fournir les talents dont l'écosystème national a cruciallement besoin ;
- les entreprises françaises préparant un ordinateur quantique tolérant aux fautes sont positionnées sur cinq filières technologiques différentes, dont aucune ne présente d'avantages ou inconvénients incontestables par rapport aux autres à ce jour, plaçant la France au meilleur niveau mondial (seuls les États-Unis possèdent une telle diversité) ; ces entreprises ont toutes essaimé de laboratoires de recherche publics français ;
- la France est le 1^{er} pays de l'Union et le 3^e pays mondial (derrière les États-Unis et la Grande-Bretagne en excluant la Chine pour lequel une telle comparaison n'a pas de sens) en termes de levées de fonds d'entreprises du quantique (700M€), ainsi qu'avec deux

fonds dédiés de 100M€ et 200M€ qui soutiennent directement l'écosystème national ;

- le soutien aux filières industrielles a permis de renforcer l'autonomie en matière de composants critiques pour le quantique (cryogénie, isotopes, lasers, électronique), et a permis l'émergence de start-ups innovantes aux résultats scientifiques de premier plan.

Si l'on inclut également l'ensemble des outils de soutien dédiés aux projets de R&D des entreprises (via notamment les guichets i-Démo ou Première Usine de France 2030), un quart du milliard d'euros a été versé aux acteurs privés. Les trois autres quarts ont été distribués aux acteurs publics.

En 2025, les annonces relatives au développement d'un ordinateur quantique changent d'échelle

Il y a dix ans, la perspective d'un ordinateur quantique utile pour résoudre des problèmes majeurs (cryptanalyse, simulation de réactions chimiques) se plaçait sur un horizon lointain et incertain. Depuis, les capacités de calcul quantique croissent exponentiellement (à la manière de la loi de Moore) de même que l'efficacité des algorithmes permettant l'exploitation de ces capacités. Ainsi, la réalisation d'un ordinateur quantique utile est désormais attendue bien avant 2035.

Les feuilles de route des pays compétiteurs, dont la France, annoncent désormais des avancées technologiques qui rejoignent les prévisions les plus optimistes formulées au départ. Dans ce contexte, deux types d'annonces récentes outre-Atlantique changent la donne : d'une part, les entreprises y lèvent désormais des milliards de dollars, et, d'autre part, les estimations de ressource pour les premiers usages d'un ordinateur quantique pour le déchiffrement atteignent des niveaux compatibles avec les feuilles de route des constructeurs.

En Europe, la maturité technologique est encore comparable avec les concurrents internationaux, mais les annonces financières sont de moindre ampleur. La valorisation (financière notamment, mais pas uniquement) du calcul quantique atteint désormais de tels niveaux que : (i) les géants du numérique investissent et investiront directement dans les levées de fonds des entreprises du calcul quantique ; et (ii) la suprématie technologique laisse place à la suprématie financière. L'exemple du rachat d'Oxford Ionics, bien meilleur technologiquement, par IonQ le montre bien. L'importance du coût marginal et de l'utilité du calcul quantique par rapport au calcul classique sont donc à mesurer à l'aune de l'accroissement brutal des moyens financiers déployés outre-Atlantique. Pour autant, il ne s'agit pas d'une bulle mais d'investissements nécessaires pour débloquent les verrous technologiques et industriels (en vue de capter le marché).

Depuis 2021, la stratégie quantique a tenu ses promesses : la France fait partie des nations les plus compétitives mondialement, et peut jouer un rôle de locomotive au niveau européen. Une telle situation constitue une exception dans un paysage technologique largement dominé par les États-Unis et la Chine. Malgré les succès remportés jusqu'ici, les entreprises françaises restent menacées en permanence. L'offre de capitaux en Europe est fortement limitée, rendant tout exercice de levée de fonds une épreuve périlleuse pour nos pépites, quand les concurrents outre-Atlantique s'en sortent avec aisance. La capacité à convaincre des investisseurs dépend de plusieurs facteurs que l'investissement public sert à déclencher :

- des résultats scientifiques et technologiques pionniers, qui passent par l'accès à une recherche au meilleur niveau mondial ;
- des recrutements de talents, qui passent par l'attractivité des projets de l'entreprise et sa capacité à proposer des salaires compétitifs (certains deviennent extrêmement élevés) ;
- de la visibilité temporelle, structurée par un soutien étatique affirmé dans la durée et une part publique dans le carnet de commandes des entreprises.

La maturité de l'écosystème français n'est pas suffisante pour garantir ces conditions sans intervention significative de l'État ; l'attractivité du marché américain et la stratégie offensive de son administration font porter des risques fondamentaux sur la souveraineté des programmes français.

Dès lors, de nouvelles actions pour la stratégie nationale font surface

La souveraineté, tant militaire qu'économique, sur le calcul quantique nécessite de maîtriser les cœurs de calcul, les chaînes d'approvisionnement en amont et les applications en aval. Dès lors, tous les outils de politique économique doivent être envisagés, y compris la poursuite des subventions et des programmes ministériels, le renforcement de la commande publique, mais aussi l'intervention en fonds propres. Les synergies avec l'Union européenne et les écosystèmes privés seront également indispensables. De premières grandes orientations découlent ainsi du bilan des cinq premières années et du constat d'accélération mondiale.

En premier lieu, il s'agira de trouver les moyens d'accélérer les feuilles de route vers l'ordinateur quantique tolérant aux fautes¹. Ceci pourrait passer par l'accompagnement de projets d'innovation orientés industrialisation, par le financement d'une recherche amont dédiée aux verrous technologiques à moyen terme et par le soutien à une démarche européenne d'acquisition de machines. Ce premier pilier devrait également encourager une approche « système » qui intègre les technologies habilitantes, la mémoire, l'interconnexion et le logiciel.

En second lieu, et dans le cadre du Quantum Act² à venir, un chemin de *leadership* européen pourrait être identifié, sur le calcul, les capteurs et les communications. Parvenir à une telle situation nécessitera de protéger le marché européen contre les prédatations étrangères et d'encourager les consolidations autour d'acteurs européens non soumis à des réglementations extraterritoriales.

Enfin, il conviendrait bien sûr de poursuivre les efforts déjà entrepris autour de la formation, des approvisionnements stratégiques, du contrôle export et de la normalisation.

Conclusion

D'ici à 2030, le chemin emprunté par la France et l'Union européenne sera déterminant pour fixer leur place dans l'échiquier mondial des technologies quantiques. Pour pouvoir positionner la France en *leader*, les efforts nationaux doivent être poursuivis et renforcés dans un cadre européen qui donne une place claire à la protection de ses acteurs.

¹ Voir par exemple https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/06/202505_ordinateur_quantique.pdf

² En 2026 : <https://www.european-quantum-act.com/>

Le calcul quantique à l'épreuve de l'ingénierie : La pile logicielle comme enjeu de souveraineté

Par Neil ABROUG

Directeur du Programme quantique, Inria

Ancien coordinateur de la Stratégie nationale quantique française

Les ordinateurs quantiques ne sont plus une promesse de laboratoire. Leur développement a engagé une transition décisive : de la physique vers l'ingénierie de systèmes. Dans ce nouveau régime, la question n'est plus seulement « Qui produira les meilleurs qubits ? », mais « Sur quelle pile logicielle les développeurs construiront-ils leurs applications, et qui la contrôlera ? » Depuis 2019, Inria a structuré une stratégie résolument positionnée sur les couches logicielles et algorithmiques du calcul quantique, en cohérence avec la stratégie nationale et dans le cadre d'une réponse européenne coordonnée. Cet article en décrit la genèse, les réalisations et les perspectives.

De la physique à l'ingénierie : la bascule stratégique

Pendant près d'une décennie, le débat sur l'informatique quantique a été dominé par la course au *hardware* : nombre de qubits, fidélité des portes logiques, durée de cohérence, maîtrise de la cryogénie. Cette lecture n'est plus suffisante en 2026, et marque une dynamique plus silencieuse et peut-être plus déterminante pour la compétition technologique mondiale : la bataille des plateformes logicielles.

Le parallèle avec l'intelligence artificielle est éclairant. La domination de NVIDIA dans l'IA ne s'est pas construite uniquement sur la performance des processeurs graphiques, mais sur l'écosystème CUDA (compilateurs, bibliothèques, outils de débogage, communauté de développeurs, etc.), qui a imposé son langage de programmation comme standard de fait. Le calcul quantique connaîtra le même « moment CUDA » : la couche *middleware* (compilateurs quantiques, moteurs de correction d'erreurs, *runtimes*, outils d'orchestration de l'hybridation quantique-classique, etc.) est en train de devenir le point de contrôle stratégique de tout l'écosystème. C'est là que se fixeront les standards, que s'établira la portabilité entre plateformes matérielles, et que se forgera la dépendance ou l'autonomie des utilisateurs.

Ce scénario cesse d'être hypothétique. En février 2026, l'entreprise chinoise Origin Quantum a rendu disponible en téléchargement libre Origin Pilot OS, présenté comme le premier système d'exploitation quantique localement installable au monde : une couche d'intégration couvrant l'ordonnancement des ressources, la calibration automatique des qubits et la compatibilité avec trois technologies matérielles distinctes. La stratégie reproduit celle

de DeepSeek dans l'IA : s'emparer des couches d'intégration par l'ouverture, là où les acteurs occidentaux débattent encore de la gouvernance de leurs standards.

Ce que signifie construire un ordinateur quantique utilisable

Le calcul tolérant aux fautes : l'horizon industriel

Les machines actuelles, dites NISQ (*noisy intermediate-scale quantum*), sont limitées par le bruit physique : les qubits commettent des erreurs à chaque opération, et la profondeur des circuits exploitables reste faible. Pour qu'un ordinateur quantique surpasse structurellement les supercalculateurs classiques sur des problèmes industriels réels (conception de matériaux, simulation moléculaire, optimisation de réseaux, etc.), il doit fonctionner en régime tolérant aux fautes (*fault-tolerant quantum computing*, FTQC). Dans ce régime, des qubits logiques sont construits à partir de nombreux qubits physiques et protégés par des codes correcteurs actifs, permettant d'exécuter des circuits arbitrairement longs avec une fidélité garantie.

Des avancées récentes compriment les estimations du nombre de qubits physiques nécessaires. Des travaux menés, notamment, par les équipes Inria sur les codes LDPC (*low-density parity-check*) quantiques permettent de réduire significativement l'*overhead* par rapport aux approches de référence (codes de surface). Ces progrès, que l'équipe Curiosity approfondit du côté des nouveaux paradigmes de contrôle des qubits logiques, ouvrent la voie vers un jalon intermédiaire (le *fault-tolerant application scale quantum*,

FASQ, concept introduit par John Preskill fin 2024), qui vise à démontrer d'ici 2030 le fonctionnement robuste de qubits logiques avec un taux d'erreur résiduel de l'ordre de 10^{-4} , seuil en deçà duquel un avantage quantique applicatif commence à être accessible.

La pile logicielle : compilateurs, hybridation HPC et co-design

La pile logicielle quantique est la chaîne qui relie l'algorithme de l'utilisateur au processeur physique. Elle comprend le compilateur (traduction du circuit abstrait en séquences de portes physiques optimisées pour l'architecture cible), le moteur de correction d'erreurs (exécuté en temps réel), le *runtime* (gestion de l'hybridation avec les ressources HPC) et les outils de développement exposés aux utilisateurs finaux. Pour la quasi-totalité des applications prévisibles, l'ordinateur quantique fonctionnera non pas de manière autonome, mais comme co-processeur spécialisé au sein d'un centre de calcul haute performance.

Le co-design (la co-conception simultanée du *hardware* et du *software*) est clé dans toute démarche d'ingénierie quantique. Un compilateur qui ignore les contraintes de connectivité d'un processeur supraconducteur produit des circuits sous-optimaux. Une architecture matérielle non pensée pour les besoins de la correction d'erreurs multiplie inutilement les ressources physiques. C'est pourquoi les partenariats entre équipes logicielles et constructeurs ne sont pas optionnels : ils sont constitutifs de la trajectoire vers le FTQC. Il faut également accepter une réalité pratique : le logiciel développé pour les premières machines FASQ sera transitoire. Ces couches « jetables » représentent non un gaspillage, mais l'investissement nécessaire pour maîtriser les architectures de demain.

La stratégie d'Inria dans le quantique : genèse et réalisations

Une impulsion fondée sur une analyse rigoureuse

La stratégie quantique d'Inria a été définie en 2019, dans le contexte de la préparation de la mission parlementaire confiée à Paula Forteza, Jean-Paul Herteman et Iordanis Kerenidis. Le rapport de l'Académie nationale des sciences américaine (Quantum Computing: Progress and Prospects ; 2019) a joué un rôle structurant dans cette définition. Il montrait avec précision que l'enjeu de souveraineté technologique n'était pas uniquement matériel : il appelait à investir en urgence sur l'écosystème logiciel et algorithmique, sans lequel les ordinateurs quantiques ne pourraient pas être opérants. Il identifiait les approches NISQ comme terrain d'expérimentation immédiat indispensable pour enclencher un cycle vertueux d'investissement, et la cryptographie post-quantique comme priorité de déploiement à court terme.

Sur cette base, Inria a fait du calcul quantique une priorité explicite de son contrat d'objectifs et de performances 2019-2023, puis de celui de 2024-2028, non comme une concession à l'air du temps, mais comme un choix stratégique cohérent avec sa mission de renforcer la souveraineté numérique par la recherche et l'innovation.

Une montée en puissance mesurable

En six ans, Inria est passé de 6 à 32 permanents scientifiques dans le quantique, et de 3 à 8 équipes-projets. Ces huit équipes – COSMIQ (cryptographie post-quantique et correction d'erreurs), MOCQUA (modèles de calcul quantique), PhiQus (information quantique et ML hybride), QInfo (certification de dispositifs bruités), QuaCS (langages et compilation HPC/Q), Quantic (ingénierie quantique expérimentale), QAT (simulation, *benchmarking* et correction d'erreurs) et Curiosity (contrôle quantique et qubits logiques) – couvrent l'ensemble de la pile, des fondements mathématiques jusqu'aux démonstrateurs physiques. L'investissement total sur la période 2019-2025 est estimé à plus de 40 millions d'euros, répartis entre financements France 2030 (environ 50 %), autofinancement propre (environ 33 %) et financements européens (environ 17 %).

Dans le cadre de son rôle d'Agence de programmes dans le numérique, Inria co-pilote plusieurs dispositifs de la stratégie nationale : le PEPR Quantique (avec le CNRS et le CEA), finançant la recherche fondamentale et appliquée ; le programme HQI (Hybrid Quantum Initiative, avec le CEA), offrant aux chercheurs et industriels un accès à des environnements de calcul hybride quantique-HPC ; et le défi QLoop (avec le CEA / IRT Nanoelec), mettant en œuvre la démarche de co-design. Inria apporte également un soutien logiciel aux start-ups engagées dans le programme PROQCIMA de la DGA. Enfin, Inria a lancé en 2025, avec l'ensemble de ses partenaires européens, une initiative qui vise à construire un programme FTQC ambitieux à l'échelle européenne, capable de catalyser l'écosystème de recherche et les donneurs d'ordre autour du soutien à l'émergence en Europe de champions de rang mondial du quantique.

Des partenariats industriels ancrés dans la souveraineté

La stratégie industrielle d'Inria a été guidée par un principe clair : construire des liens durables avec l'écosystème national de start-ups, en évitant les dépendances vis-à-vis d'acteurs extra-européens. Inria a développé un partenariat de longue durée avec Alice & Bob (supraconducteurs, qubits chats), dans lequel l'équipe Quantic, spécialisée en ingénierie quantique expérimentale, joue un rôle central de transfert entre recherche fondamentale et développement industriel. Des partenariats ont également été formalisés en 2025 avec Pasqal (atomes neutres), Quandela (photonique intégrée) et Qobly (spin supraconducteurs), et donnent aujourd'hui lieu à des *workshops* et construction de feuilles de route communes de recherche. Des travaux exploratoires sont en cours avec Bull pour une équipe-projet conjointe qui renforcerait l'alignement entre développements logiciels d'Inria et plateformes de calcul de Bull.

La dimension européenne : Initiative FTQC et la souveraineté par les standards

Le défi géopolitique : Le QBI américain et le risque d'extraterritorialité

Depuis novembre 2025, la DARPA a promu onze entreprises en phase B de son Quantum Benchmarking Initiative (QBI), avec un budget de 15 millions de dollars par

participant pour cette étape, avant une phase C pouvant atteindre 300 millions de dollars. Cette initiative exige la communication de feuilles de route et de spécifications techniques détaillées, exposant les participants au risque d'une application extraterritoriale du droit américain (réglementations ITAR/EAR) susceptible de contraindre leur liberté de commercialisation. Sans réponse coordonnée, les start-ups européennes sont placées devant un choix structurellement inégal, et le QBI structure *de facto* les standards de performance mondiaux, indépendamment des choix de participation européens.

Une réponse coordonnée pour le FTQC européen

C'est dans ce contexte qu'Inria, en coordination avec ses partenaires allemands (VDI-TZ), danois (Fondation Novo Nordisk), néerlandais (Quantum Delta NL) et finlandais (VTT), a conçu et promu une initiative FTQC, dont les premiers travaux se fondent dans le cadre d'une *Support and Coordination Action* (CSA) auprès du Quantum Flagship de l'Union européenne. Elle se structure autour de trois piliers : un mécanisme de *roadmapping* inspiré de l'ITRS pour cartographier les inconnues technologiques et aligner les trajectoires sans désigner prématurément de vainqueur ; un programme d'acquisition et de recherche synchronisés sur le modèle de l'OSRD, concentrant progressivement les ressources sur les acteurs les plus avancés ; et une gouvernance du socle logiciel *open source* selon les principes de l'OSI, garantissant que les interfaces, compilateurs de référence et suites de *benchmarks* restent ouverts et gouvernés en commun.

Ce dernier pilier mérite d'être expliqué. L'OSI a démontré qu'une définition certifiée de l'*open source*, assortie d'une gouvernance communautaire transparente, peut briser les monopoles logiciels et générer des écosystèmes interopérables durables. Appliqué au quantique : les standards sont ouverts, les acteurs industriels peuvent proposer des distributions certifiées, des optimisations propriétaires et des garanties de service. L'ouverture des standards n'est pas l'ennemie de l'industrialisation : elle en est la condition de durabilité face à un verrouillage futur.

Conclusion

La seconde révolution quantique est une révolution d'ingénierie autant que de physique. Elle se joue dans les compilateurs, les moteurs de correction d'erreurs, les protocoles d'hybridation quantique-classique et les architectures d'intégration ; couches sur lesquelles Inria a choisi, dès 2019, de concentrer sa stratégie. Ce positionnement sur l'écosystème logiciel et algorithmique, en appui d'un tissu de start-ups *hardware* nationales, constitue un choix de souveraineté délibéré. Il s'agit de s'assurer que, lorsque les ordinateurs quantiques entreront dans le régime FTQC, la France et ses partenaires européens disposent non seulement d'accélérateurs matériels performants, mais des outils, des standards et des compétences pour les programmer, les optimiser et les intégrer dans leurs chaînes de valeur. Cette ambition demande aujourd'hui à être coordonnée à l'échelle européenne, avant que la fenêtre pour écrire soi-même les règles du jeu ne se referme.

Références bibliographiques

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE (2019), *Quantum Computing: Progress and Prospects*, Washington D.C., The National Academies Press.

BRAVYI S. *et al.* (2024), "High-threshold and low-overhead fault-tolerant quantum memory", *Nature*, 627, pp. 778-782.

BEVERLAND M. E. *et al.* (2022), "Assessing requirements to scale to practical quantum advantage", arXiv:2211.07629.

Les enjeux de l'industrie naissante du calcul quantique

Par Pierre BONNET

Chargé de mission, Direction générale des Entreprises

Les applications futures du calcul quantique devraient révolutionner le monde du calcul numérique, fondamental pour de larges pans de notre économie et de notre système de défense (cryptanalyse, simulation physique, logistique, pharmaceutique, entre autres). Au regard des enjeux technologiques et économiques, et malgré les questions scientifiques restantes, l'industrie naissante du calcul quantique commence à se structurer. Nous en détaillons ici la chaîne de valeur divisée en trois briques aux enjeux industriels distincts : « cœur de calcul », « système complet » et « logiciel quantique ». Nous mettons en avant la nécessaire structuration internationale du domaine.

Il est difficile de dire que le calcul quantique est déjà une industrie à part entière, tant les défis scientifiques restants rendent incertaines les voies technologiques qui seront suivies et les outils industriels qui émergeront. Si la production d'ordinateurs quantiques est encore à ce jour une production d'outils de recherche perfectionnés, proches du prototype ou du démonstrateur, nous pouvons cependant esquisser certains enjeux qui seront vraisemblablement au cœur des questions qui façonneront une future industrie quantique, et à la hauteur du potentiel disruptif de cette technologie. À l'image du numérique classique, nous pouvons distinguer un aspect matériel, implémentant physiquement les éléments d'information (quantiques) et que nous appellerons ici « cœur de calcul quantique », d'un aspect non matériel, réalisant une algorithmique spécifique aux éléments d'information quantique. Ces algorithmes ainsi que les programmes, pilotes, logiciels d'accès et d'orchestration, etc., seront ici appelés génériquement « logiciels quantiques ». Enfin, de nombreux matériels, fondés ou non sur la mécanique quantique, sont nécessaires à opérer physiquement les cœurs de calcul pour en faire un système complet (mémoire quantique, lien quantique, amplificateur, câblage, etc.), que nous nommerons « système ». Chacune de ces trois briques (cœur de calcul, logiciels, système) semble avoir une logique industrielle propre. Elles sont toutes imbriquées et nécessaires pour améliorer la résolution de problèmes concrets à l'aide de calculateurs quantiques.

La production des cœurs de calcul quantique

La physique fondamentale offre un certain nombre de systèmes quantiques superposés (spin électronique, photon, état d'excitation d'un atome, atome artificiel sur circuit supraconducteur...) dont la « domestication » technologique permet d'envisager de les utiliser pour

traiter une information quantique. Aucun de ces systèmes n'émerge à ce jour comme solution évidente, ce qui génère la grande incertitude sur les voies technologiques à suivre et toutes les chaînes de valeur associées. Pour autant, ces cœurs de calcul sont pressentis comme étant, pour les années à venir, le centre de la valeur ajoutée du calcul quantique, en tant que brique la plus fondamentale.

Une typologie d'acteurs économiques est apparue. Aux États-Unis, les cœurs de calcul quantique sont portés par de très grandes entreprises du numérique (Google, IBM, Microsoft, Amazon) ainsi que par quelques start-ups déjà introduites en bourse (IonQ, Rigetti, ainsi que la canadienne D-Wave). En Europe, ces cœurs sont construits par des start-ups plus petites comme les françaises Alice & Bob, C12, Quandela et Quobly, comme AQT (Autriche) et Qilimanjaro (Espagne) et dont certaines ont récemment annoncé leur entrée en bourse (la finlandaise IQM et la française Pasqal).

Les outils de production sont donc variés et adaptés à de très petites séries. Par exemple, la plupart, à l'exception notable des atomes neutres, utilise des dispositifs sur puce, mais en réalité avec une grande diversité de matériaux et de procédé : silicium enrichi, supraconducteur, photonique. Ainsi, à l'exception des géants du numérique américains qui peuvent dans certains cas utiliser des moyens existants pour leurs produits non quantiques, les entreprises doivent s'appuyer sur des partenariats (par exemple avec des fondeurs de semi-conducteurs), et construire des centres de R&D et de prototypage plutôt que des usines de production de masse.

La production d'un système complet de calcul quantique

De la même manière qu'un cœur de calcul classique (au sein d'un GPU par exemple) doit être intégré dans un système pour en faire un ordinateur, les cœurs de calcul quantique nécessitent de nombreuses briques adjacentes : générateur de signaux, amplificateur, mémoire, câblage,

cryogénie, entre autres. La structuration de la chaîne de valeur n'est pas encore connue : deux modèles pourraient se dégager, voire s'hybrider. Les briques systèmes pourraient être construites par des fournisseurs et directement intégrées par les fabricants de cœurs de calcul, ou ces deux branches de l'industrie pourraient exister en parallèle et être fournisseurs d'entreprises d'intégration, pouvant provenir du monde classique.

Cette structuration sera probablement très dépendante de la technologie du cœur de calcul. Par exemple, les cœurs de calcul à base d'atomes neutres étant très éloignés de la microélectronique, il semble probable que le fournisseur du cœur soit également l'intégrateur. À l'opposé, pour les qubits de spins sur silicium, les plus nombreuses briques en lien avec la microélectronique pourraient favoriser des modèles existants avec des entreprises distinctes dans le dessin des cœurs, leur fabrication, leur intégration.

Dans tous les cas, la structuration de la production des briques systèmes devrait être mondialisée et diversifiée. Si les enjeux sont moins la résolution de problèmes fondamentaux – comme pour les cœurs –, la recherche et le développement technologique seront indispensables pour rendre possible le passage à l'échelle des ordinateurs quantiques. Les technologies les mieux établies apparaissent plutôt dans des entreprises de grande taille (par exemple Air Liquide pour la cryogénie et Radiall pour certains câblages) alors que celles nécessitant encore de la recherche assez amont voient préférentiellement le jour dans des start-ups (on peut citer en France : Silent Waves, Welinq ou Isentroniq).

La production des logiciels quantiques

Au-delà des aspects matériels, les ordinateurs quantiques nécessitent ce que nous appellerons ici de façon générique « logiciel », dont nous pouvons distinguer plusieurs catégories.

Logiciels bas niveau et interfaces

Un certain nombre de logiciels « bas niveau » sont nécessaires au fonctionnement interne des ordinateurs quantiques. Ces logiciels concernent, notamment, la commande des signaux sur les cœurs de calcul pour y implémenter des portes logiques ainsi que pour gérer une partie de la correction d'erreur. Ces logiciels semblent faire partie du métier des fabricants de cœur de calcul et de certains de leurs fournisseurs sur la commande physique des qubits.

Ces logiciels s'étendent progressivement aux compilateurs de code, aux langages de programmations et à certains kits de développement, qui restent aujourd'hui très proches des constructeurs mais devraient s'en détacher progressivement. Ayant vocation à s'interfacer avec les utilisateurs, les enjeux de normalisation, la question de l'*open source* et la possibilité ou non d'avoir des connecteurs logiciels agnostiques du matériel sous-jacent sont prégnants pour l'industrie.

Algorithmes et applications

Les algorithmes quantiques théoriques sont essentiellement issus de la recherche en mathématique et en informatique. Les enjeux industriels apparaissent, d'une part, dans leur implémentation pratique sur un ordinateur quantique donné, avec ses contraintes physiques, et, d'autre part, dans leur spécialisation pour un cas

d'usage précis. Les donneurs d'ordre à même de structurer l'écosystème sont donc de deux natures : les fabricants de cœur de calcul dans la spécification de ce qui est possible et optimisé sur leurs machines ; et les utilisateurs applicatifs dans la spécification du besoin. Un certain nombre de start-ups sont apparues comme intermédiaires entre ces deux types d'acteurs en créant des logiciels applicatifs spécialisés permettant à l'utilisateur final de s'abstraire des spécifications matérielles, par exemple en France : Qubit Pharmaceuticals pour la découverte de molécules, QbitSoft sur des problèmes logistiques ou ColibriTD sur des problèmes de simulation par éléments finis.

Hybridation, émulateurs, modalités d'accès

Implémenter les codes utiles sur les machines quantiques nécessite d'en organiser l'accès, ces ressources devant rester rares encore de nombreuses années. Une première modalité devrait être inspirée de calcul haute performance, où les tâches des utilisateurs sont envoyées sur les machines à l'aide de logiciels d'orchestration spécialisés. Ce type de logiciel pourrait par exemple être produit par les intégrateurs de machines classique et quantique (Bull, etc.), avec également des produits d'émulation d'ordinateur quantique et d'hybridation entre ordinateurs classique et quantique. Une seconde modalité, potentiellement complémentaire, est celle de l'informatique en nuage afin de rendre les ressources quantiques disponibles à la demande pour les utilisateurs. À des fins de démonstrations de leur produit, la plupart des fabricants de cœur de calcul quantique offre cette possibilité, parfois *via* des entreprises spécialisées dans l'informatique en nuage (Scaleway et OVHcloud par exemple).

Plusieurs schémas d'accès semblent pouvoir ainsi au global coexister : (i) les centres de calcul scientifique, notamment publics, pourraient souhaiter accéder aux ordinateurs quantiques directement pour en utiliser les réglages fins ; (ii) de grandes entreprises déjà utilisatrices de calcul haute performance pourraient dans un premier temps implémenter leur propres codes sur des machines d'accès distant *via* le *cloud* ; (iii) des entreprises ayant des problèmes concrets de calcul sans équipe sur les algorithmes et les logiciels bas niveau tireraient profit d'accès *via* des entreprises intermédiaires spécialisées sur des verticales applicatives (chimie, assurance, logistique par exemple).

Une industrie à penser à l'échelle européenne

Au regard de la diversité des briques technologiques et des problèmes de recherche fondamentale et appliquée restants, la coopération internationale semble indispensable au développement du calcul quantique, en particulier à l'échelle européenne. Les États membres de l'Union européenne ont ainsi adopté une déclaration quantique en décembre 2023, la Commission a travaillé à une stratégie quantique pour l'Europe publiée en juillet 2024 et un Quantum Act est annoncé pour 2026.

Une politique européenne ambitieuse est attendue, en particulier sur le calcul quantique, avec un enjeu fort de consolidation industrielle afin de faire émerger des champions d'envergure mondiale, nourris par de la commande intérieure, et couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur décrite précédemment. Plusieurs axes de politiques publiques européennes favoriseraient cette

consolidation. En premier lieu, un écosystème de financement de l'innovation quantique doit être renforcé afin de permettre la croissance des pépites existantes, avec des levées de fonds de plusieurs centaines de millions d'euros, tout en préparant des *exit* en Europe afin de pérenniser ces acteurs. D'autre part, l'achat public, s'il est dimensionnant et correctement planifié¹, permettrait une traction de la chaîne de valeur, par exemple en achetant des machines quantiques ambitieuses construites avec des composants européens, stimulant ainsi toutes les briques « système » et regroupant progressivement les offreurs de cœur de calcul. Enfin, un écosystème applicatif doit être constitué et orienté vers de telles machines européennes, en impliquant à la fois le monde académique et les usages industriels concrets. Ces trois axes – investissement dans les acteurs européens, achat public de machines quantiques européennes et usage européen de ces machines – pourraient permettre de créer un écosystème solide, à même de renforcer la souveraineté numérique européenne.

Conclusion : les applications

Nous avons montré qu'il était à ce jour difficile de prévoir précisément la structuration de la chaîne de valeur du calcul quantique, même si certaines grandes briques apparaissent. Dans quels sens iront les consolidations industrielles ou dans quels maillons se concentrera la valeur ajoutée restent des questions ouvertes. Pour autant, le calcul quantique n'ayant pas un intérêt concret en lui-même, si ce n'est le progrès de la science, mais uniquement par les applications industrielles qui en seront faites (cryptanalyse, découverte de médicaments, amélioration de chaîne logistique, simulation aérodynamique...), il est probable que ces industries tractent la chaîne de valeur dès que le retour sur investissement sera perçu comme suffisant. D'ici là, la place des pouvoirs publics, notamment européen pour les applications civiles et les armées pour les applications à visée militaire, sera prépondérante.

Au regard du potentiel de disruption technologique, économique et militaire du calcul quantique, et à l'heure où les voies à suivre sont encore très incertaines, l'intervention publique est pleinement justifiée. La maîtrise des trois briques – cœur de calcul, logiciel et système – rend possible une souveraineté technologique dans le domaine, renforçant l'autonomie stratégique française et européenne. La dynamique et les logiques industrielles de chacune de ces briques étant différentes, leur bonne imbrication sera un enjeu transversal majeur.

Bibliographie, pour aller plus loin

Rapports sur l'informatique quantique

BACULARD P.-L., VALDMAN S., LEROUGE G. (2025), L'avenir quantique commence maintenant, Quelle feuille de route pour les entreprises ?, Paris, Le Lab Quantique et Bain & Company, livre blanc, <https://www.bain.com/contentassets/87284092136847dba80c07cff6932d46/250907---livre-blanc-bain-x-llq.pdf>

FORTEZA P. *et al.* (2020), Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas, Rapport de la mission parlementaire, [https://quantique.france2030.gouv.](https://quantique.france2030.gouv.fr/wp-content/uploads/2024/05/Rapport-Mission-Quantique.pdf)

[fr/wp-content/uploads/2024/05/Rapport-Mission-Quantique.pdf](https://quantique.france2030.gouv.fr/wp-content/uploads/2024/05/Rapport-Mission-Quantique.pdf)

INPI (2024), *L'informatique quantique dans les brevets en 2024*, file:///C:/Users/akappelmann-adc/Downloads/INPI_EtudeQuantique_nov.2024_1.pdf

LAMBERT C., BONHOMME T., ROUCAIROL G. (dir) (2025), *État de l'art de l'ordinateur quantique tolérant aux fautes, Questions et défis*, Rapport de l'Académie des technologies, https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/06/202505_ordinateur_quantique.pdf

OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES (2022), Conclusions sur la stratégie quantique française, https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/ots/15b4933_rapport-information.pdf

SCHWARTZ S. (coord.) (2024), Rapport sur les technologies quantiques pour les applications Aéronautique-Spatial-Défense, Paris, GIFAS, https://quantique.france2030.gouv.fr/wp-content/uploads/2024/05/Rapport_Technologies_Quantiques-GIFAS_mai_2024.pdf

Sur l'Europe

COMMISSION EUROPÉENNE (2025), Quantum Europe Strategy: Quantum Europe in a Changing World, Communication from the commission to the European Parliament and the Council, file:///C:/Users/akappelmann-adc/Downloads/Quantum_Europe_Strategy_final_doc_7SzpKuzc1iptYllbq2vEjPFTM_117890.pdf

RÈGLEMENT (UE) 2026/150 DU CONSEIL du 16 janvier 2026 modifiant le règlement (UE) 2021/1173 établissant l'entreprise commune pour le calcul à haute performance européen, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202600150

Site internet d'EuroHPC, en particulier la liste des ordinateurs quantiques acquis : https://www.eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-quantum-computers/our-quantum-computers_en

¹ À l'instar de ce que fait EuroHPC pour le calcul haute performance.

La France et l'ordinateur quantique

Par Vincent BERGER

Haut-commissaire à l'Énergie atomique (HCEA)

Et Giuseppe LEO

Professeur de classe exceptionnelle à l'Université Paris Cité

La France a investi de manière significative dans le domaine de l'information quantique, et tout particulièrement dans les recherches visant à la réalisation d'un ordinateur quantique (*quantum computer*, QC). Quoique l'effort français semble modeste par rapport à celui des US ou de la Chine, la France dispose d'une communauté de physiciens quantiques et d'informaticiens de niveau mondial, qui permet de jouer dans les premiers rôles qualitativement. La recherche française n'a pas à rougir de son positionnement dans le monde, même si les mesures bibliométriques purement quantitatives semblent lui accorder un rôle secondaire.

Les cinq start-ups françaises, financées sur des technologies différentes, ont des résultats intéressants à l'échelle mondiale et emploient des scientifiques de haut niveau. Il est encore trop tôt pour déterminer quelle technologie va l'emporter, chacune ayant ses difficultés propres.

Introduction

L'ordinateur quantique (QC) promet des capacités inédites de calcul, en exploitant les lois probabilistes de la physique quantique et de ses qubits.

Dans les dix dernières années, cette perspective a suscité un grand intérêt scientifique, industriel, militaire, politique et sociétal, afin de résoudre certains problèmes spécifiques intraitables pour les ordinateurs classiques les plus puissants.

Pour construire un QC, il faut un support physique pour les qubits, des portes logiques quantiques capables de les manipuler, et des algorithmes susceptibles d'être implémentés par une combinaison de ces portes. À ce jour, même s'il existe des réalisations ponctuelles de ces trois ingrédients, on est encore loin d'un QC. Le fameux état de superposition d'un qubit ou le fonctionnement des portes quantiques sont en effet extrêmement fragiles. Ils peuvent être détruits ou faussés par n'importe quelle perturbation (une vibration de la matière ou une fluctuation électromagnétique). Cette fragilité explique pourquoi les QC font appel à des basses températures, pour que les vibrations thermiques de la matière les perturbent le moins possible.

Aujourd'hui, une course mondiale est engagée, avec des solutions matérielles et technologiques très diverses, pour réaliser des qubits et des portes robustes et fidèles, et de plus nombreux (quelques centaines ou milliers de qubits ou plus selon les problèmes à traiter).

Le positionnement de la France dans la compétition internationale

Sur l'information quantique en général, champ qui comprend le QC mais aussi les capteurs ou les communications quantiques, les États-Unis et la Chine sont

de loin, et sans surprise, les deux puissances les plus dynamiques¹. La Chine compte 23 % des publications mondiales sur le QC, et les USA 22 %, tandis que les Allemands en comptent 5 %, l'Italie 3 %, la France et l'Espagne 2 % chacun².

Malgré ce positionnement modeste avec ces données quantitatives, les acteurs français réussissent toutefois des réalisations reconnues à l'échelle internationale, tout comme l'école française de physique quantique dont ils sont issus est très réputée, cette école ayant régulièrement donné des prix Nobel.

Côté innovation et investissements, la thématique de l'information quantique est très dynamique (multiplication par cinq du nombre de brevets³ sur le sujet dans les dix dernières années). Les financements des entreprises, sous les 500 M\$/an entre 2017 et 2019, ont brusquement augmenté en 2021 pour s'élever à 2,5 Mds\$/an, valeur reproduite en 2024, en grande majorité pour viser la réalisation d'un QC et de son *software*.

Le Quantum Technology Monitor (QTM) 2024 publié par McKinsey⁴, repris aussi par une étude de l'OCDE,⁵ souligne que les gouvernements à travers le monde jouent un rôle important dans le financement et le développement des technologies quantiques. En 2024, l'investissement public mondial dans celles-ci était estimé à 42 Mds\$.

¹ MIT (2025), « Quantum Index Report ».

² La Chine est davantage présente sur les communications quantiques (39 % des publications mondiales, contre 12 % aux USA).

³ Les cinq premières institutions porteuses de ces brevets sont IBM, Google, Microsoft, Intel et Baidu. Les brevets chinois concernent surtout les communications quantiques.

⁴ McKinsey, « Quantum Technology Monitor 2024 », « Quantum Technology Monitor 2025 ».

⁵ OECD (janvier 2025), A quantum technologies policy primer.

Le 21 janvier 2021, le président de la République a présenté un plan d'investissement national de 1,8 Md€ sur cinq ans dans le quantique (1,05 Md€ de l'État, 200 M€ des crédits UE et 550 M€ prévus du secteur privé), pour mettre la France dans « les trois premiers mondiaux » de ce domaine.⁶ Depuis 2021, en particulier, la recherche française sur le quantique est dynamisée par un PEPR (Programme et équipements prioritaires de recherche) Quantique⁷, qui finance avec 150 M€ sur une durée de six ans quatre axes de recherche : le QC, les algorithmes quantiques, les communications quantiques et capteurs quantiques (voir Tome II à paraître en août 2026).

En 2024, « France 2030 » a également financé un programme dénommé PROQCIMA (voir l'article de Loïc Le Loarer et Raphaël Bouganne, pp. 13-15 ; et l'article de Jean-Baptiste Paing, pp. 52-55), qui soutient notamment cinq start-ups dans le but d'atteindre un QC universel tolérant aux fautes : Alice & Bob, C12, Pasqal, Quandela et Quobly.

Avec 500 M€ de dotation, PROQCIMA affiche l'ambition de disposer, d'ici 2032, de deux prototypes de QC avec 128 qubits logiques. Avec la technologie qui sera sélectionnée parmi les cinq, l'ambition ultime de ce programme est de passer à l'échelle industrielle avec 2048 qubits logiques avant 2035.

Les applications attendues de l'informatique quantique

Pour les ordinateurs classiques, les problèmes les plus difficiles ont souvent à faire avec une explosion combinatoire, une complexité insurmontable. Un QC peut apporter un avantage décisif dans le temps de calcul pour différents problèmes.

Une application très connue est fournie par l'algorithme quantique de Shor⁸, qui parvient à factoriser rapidement un produit de deux nombres premiers $n = ab$, application cruciale pour « casser » la cryptographie actuelle.

Depuis la proposition de Shor, le domaine de l'algorithmique quantique a progressé et de nouvelles applications ont été imaginées. Des dizaines voire des centaines (si l'on considère des variantes proches les unes des autres) d'algorithmes quantiques existent aujourd'hui. Les problèmes que pourrait résoudre un QC sont généralement classés en différents domaines :

- les problèmes d'optimisation (du type « voyageur de commerce », par exemple le transport de l'électricité dans les réseaux) ;
- l'inversion de matrices et la résolution de problèmes aux valeurs propres (qui interviennent dans des calculs de stabilité de systèmes faisant appel à des grands systèmes d'équations, par exemple en hydrodynamique) ;
- des simulations en physique quantique : cela peut concerner par exemple la chimie et la conception de nouvelles molécules, par exemple pharmaceutiques ;

- la factorisation des grands nombres (par l'algorithme de Shor).

N'oublions pas qu'au-delà de ces applications, les recherches sur le QC pourraient permettre d'approfondir la compréhension de la physique quantique en général, notamment la notion de décohérence et la théorie de la mesure.

En attendant que des machines quantiques soient réellement disponibles, l'exécution d'algorithmes quantiques peut être simulée sur des ordinateurs classiques, programmés pour se comporter comme des émulateurs d'un petit QC. Ceci est possible à condition que le nombre de qubits reste très faible. Cela permet de valider ainsi des algorithmes quantiques à petite échelle (jusqu'à quelques dizaines de qubits).

Parallèlement, les algorithmiques classiques poursuivent aussi leurs progrès avec des recherches en intelligence artificielle ou sur de nouvelles méthodes de compression de données extrêmement efficaces. Par exemple, sur les supercalculateurs actuels, l'inversion de grandes matrices est désormais possible pour des tailles de 10^5 lignes \times 10^5 colonnes. Au fur et à mesure que l'on se rapproche de la réalisation concrète d'un QC, le défi de battre l'ordinateur classique est donc de plus en plus élevé.

Les défis du calcul quantique

Le problème essentiel du QC est l'accumulation des sources d'erreurs au fur et à mesure du calcul⁹.

Un QC manipule des qubits qui prennent des valeurs continues¹⁰ : c'est donc une machine analogique. Chaque opération est affectée par une précision finie, et une erreur s'amplifie donc d'une opération à l'autre, jusqu'à pouvoir rendre le résultat final faux, à la différence d'un ordinateur classique qui « nettoie » le bruit à chaque opération élémentaire, à chaque fois qu'un bit est transformé exactement en un 0 ou un 1. Dans un QC, le bruit n'est jamais nettoyé, il s'accumule et s'accroît tout au long du calcul.

Selon l'état de l'art du *hardware* quantique actuel, les taux d'erreur à chaque opération sont encore trop élevés de plusieurs ordres de grandeur pour permettre d'implémenter correctement un algorithme quantique.

Un deuxième défi pour réaliser un QC concerne l'architecture physique de l'ordinateur. Un algorithme nécessite de faire interagir des qubits dont les supports physiques sont éloignés. Il faut donc transporter un état de qubit d'un support à un autre, ou déplacer ce support lorsque c'est possible¹¹. Cette nécessité de mettre en lien des qubits parfois éloignés apporte des risques supplémentaires de dégradation de l'information, qui s'ajoutent aux problèmes de décohérence

⁶ « Emmanuel Macron veut mettre la France dans le trio de tête mondial des technologies quantiques », *Le Monde*, 21/01/2021.

⁷ <https://www.cnrs.fr/fr/pepr/quantique>

⁸ SHOR P., (1994) "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring", *SFCS '94 Proc. 35th Annual Symp. on Foundations of Computer Science*, 124.

⁹ WAITAL X. (2024), "The quantum house of cards", *PNAS* 121, e2313269120.

¹⁰ Distinction entre un QC à variables discrètes (DV) et un QC à variables continues (CV) : contrairement aux ordinateurs quantiques basés sur des systèmes à variables discrètes DV (la polarisation est horizontale ou verticale ; elle est discrète : 0 ou 1), l'ordinateur quantique à variables continues CV manipule des oscillateurs harmoniques quantiques, le qubit étant encodé dans les états cohérents des oscillateurs.

¹¹ C'est le cas du QC fonctionnant avec des atomes neutres, où un atome peut être déplacé à l'aide de lasers, de manière à l'approcher d'un autre atome pour permettre un transfert d'information quantique entre les deux.

précédents. Elle peut également demander des temps de transport ou d'échange de l'information qui peuvent devenir prohibitifs.

Pour faire face aux sources d'erreur, des codes sont envisagés pour leur correction. Les algorithmes de correction d'erreur quantiques utilisent une certaine redondance de l'information, comme c'est déjà le cas pour les ordinateurs et les systèmes de communication numériques classiques. On obtient un qubit logique « robuste » en utilisant plusieurs qubits physiques qui travaillent ensemble pour protéger l'information des perturbations. La disponibilité d'un nombre suffisant de qubits logiques construits à partir d'un nombre encore plus grand de qubits physiques nous amènerait dans ce que l'on appelle le régime de calcul quantique tolérant aux fautes (*fault-tolerant quantum computing* - FTQC).

Le nombre de qubits physiques nécessaires pour créer un qubit logique reste trop grand, et le régime FTQC constitue encore un domaine de recherche en soi. Des efforts ont été consacrés à des étapes de R&D intermédiaires, avec des QC dits NISQ (*noisy intermediate scale quantum*), intéressants mais ne permettant pas encore de réaliser un QC capable de résoudre des problèmes concrets.

Présentation de cinq start-ups françaises

L'extraordinaire diversité des solutions envisagées rend difficile le *benchmark* entre les différentes technologies, pour savoir laquelle pourrait *in fine* s'imposer.

Chez Alice & Bob, les qubits sont des états magnétiques de circuits supraconducteurs. Une limite de la technologie des supraconducteurs pourrait être leur température extrêmement basse (par rapport à leurs concurrents), ou le nombre important de connexions microondes, ce qui pourrait induire, lors du passage à l'échelle, des coûts prohibitifs.

Chez C12, les qubits sont des spins d'électrons piégés dans des nanotubes de carbone. Une des limites de cette modalité technologique pourrait être la préparation extrêmement lente, pour le moment, des nanotubes de carbone, dont il faut vérifier séquentiellement, individuellement, le bon fonctionnement.

Chez Pasqal, les qubits sont des états d'excitation électronique d'atomes piégés et manipulés optiquement. Une limite des systèmes à atomes neutres pourrait être le temps de manipulation de ces derniers, limité par les performances des systèmes optiques qui les contrôlent.

Chez Quandela, les qubits sont encodés dans le chemin emprunté par un photon au sein d'un ensemble de guides d'onde optiques. Cette modalité technologique est limitée par les pertes optiques dans le système, ou encore le rendement quantique des détecteurs.

Chez Quobly, les qubits sont des spins d'électrons dans une nanostructure sur silicium. La difficulté majeure de Quobly sera de réaliser plusieurs qubits vraiment identiques, ce qui reste un défi de la technologie silicium sur isolant.

Parmi les différentes technologies, la technologie supraconductrice est choisie par 37 % des entreprises dans le monde qui visent la réalisation d'un QC, alors

que les technologies photoniques, semiconductrices, à atomes neutres ou à ions piégés sont choisies par un nombre d'entreprises entre 10 et 20 % dans chaque catégorie.

Selon McKinsey (QTM 2025), les investissements mondiaux dans les supraconducteurs (1033 M\$ en 2023-2024) ou dans les technologies photoniques (886 M\$ en 2023-2024) sont trois fois supérieurs à ceux consacrés aux autres voies.

La fidélité d'une porte à 2 qubits sera un indicateur clef à surveiller dans les différentes technologies. Par contre, même s'il est utile de confronter certains paramètres physiques (le nombre de qubits, leur temps de cohérence, la fidélité des portes, etc.) et certains paramètres agrégés (la correction d'erreurs), la seule comparaison vraiment pertinente sera la capacité à réaliser un jour, en un temps donné, un véritable calcul quantique. Ce type d'action est au cœur du projet français BACQ (*benchmarks for application-centric quantum computing*), actuellement en cours de développement¹², au sein du programme national MetriQs-France (voir le Tome II à paraître en août 2026). Il vise à fournir un ensemble de tests orientés vers les applications, permettant une évaluation multicritère objective des performances de l'informatique quantique.

Conclusion

Il est encore très délicat à ce stade de déterminer objectivement quelle technologie va l'emporter, et même à quelle échéance l'une d'entre elles sera capable de démontrer le fonctionnement d'une supériorité quantique. C'est trop tôt.

La créativité reste impressionnante dans le quantique. Des avancées décisives et difficiles à prévoir sont susceptibles de bouleverser encore les évaluations actuelles de ces différentes technologies. La démonstration de qubits logiques d'une robustesse satisfaisante sera sans doute une étape décisive dans un futur proche. Les avancées pourront aussi provenir de l'algorithme, qui progresse également rapidement.

Disposer de ces différentes start-ups permet à la France d'être en mesure de suivre efficacement les progrès à l'étranger, et de se tenir prête à s'approprier les innovations et les développements qui peuvent survenir de travers le monde.

¹² BARBARESCO *et al.* (2024), <https://cnrs.hal.science/LNE/hal-04518023v1>

Un état des lieux des principales tendances et des principaux acteurs dans le domaine des technologies quantiques grâce aux brevets

Par Jérôme PLANTÉ-BORDENEUVE

Thales - Direction Technique

L'analyse des brevets et demandes de brevets représente l'un des meilleurs indicateurs d'innovation au niveau mondial. Dans cet article, nous identifions les principales tendances ainsi que les principaux acteurs dans le domaine des technologies quantiques grâce à une analyse des brevets et demandes de brevets déposés par les différents acteurs de ce domaine.

Introduction : les brevets comme indicateur d'innovation

Les brevets font partie des indicateurs clés pour décrire le niveau d'innovation d'une organisation ou même d'un pays. En effet, un brevet, après sa délivrance, va protéger une invention en attribuant un **monopole** au déposant de l'invention, et ceci pendant une période pouvant aller jusqu'à 20 ans sous réserve du paiement des annuités. **La protection des inventions par un brevet permet donc de différencier fortement les contenus technologiques et techniques des déposants (entreprises, académiques, organisations de recherche, ...)**, leur offrant ainsi de **forts différenciateurs** sur leurs marchés.

Un brevet n'a une valeur juridique que pour le pays ou la région dans lequel il est délivré. La délivrance est accordée après une procédure d'examen par un Office national ou régional (pour la France l'INPI – Institut national de la propriété industrielle). Pour protéger une invention dans plusieurs pays, des demandes de brevets vers d'autres pays ou vers une zone régionale peuvent être effectuées après le premier dépôt.

Par exemple, un premier dépôt en France peut être suivi par le dépôt d'une demande de brevet aux USA et en Inde, afin que l'invention soit également protégée dans ces deux pays. L'invention (on parle dans ce cas de « famille de brevets ») sera ainsi protégée par trois demandes de brevets (France, États-Unis, Inde) qui pourront devenir des brevets si la délivrance est accordée par chacun des Offices. Nous utiliserons également l'expression de « **famille internationale de brevets** » quand le premier dépôt est suivi **d'au moins une demande de dépôt vers un autre Office**, hors du pays d'origine, ce qui est le cas dans notre exemple puisque la demande initiale a ensuite été étendue vers deux Offices.

Par ailleurs, et c'est tout l'intérêt de l'étude des brevets au niveau mondial, **la délivrance d'un brevet**

à travers le monde, quel que soit l'Office du pays ou de la zone géographique, s'effectue selon les mêmes conditions de brevetabilité – notamment la nouveauté, l'activité inventive ou l'application industrielle (même si ces critères peuvent être appréciés de manière légèrement différente d'un pays à l'autre). **Les brevets représentent donc une source d'information homogène sur le monde entier.**

L'analyse des brevets et demandes de brevets représente donc probablement **le meilleur indicateur d'innovation au niveau mondial**¹.

Pour donner les ordres de grandeur sur le nombre de brevets, **plus de 3,7 millions de demandes de brevets ont été déposées dans le monde en 2024**, en hausse de **4,9 % par rapport à 2023** (source « Office Mondial de la Propriété Intellectuelle »), la Chine représentant environ 49 % de l'ensemble de ces demandes de brevets.

Par abus de langage, le terme « brevets » couvrira les brevets obtenus après la délivrance par un Office, ou les « demandes de brevets », examinées par un Office.

Les brevets et les technologies quantiques

Premières tendances basées sur l'ensemble des familles de brevets

Dans cet article, nous analyserons les tendances et les principaux acteurs par zone géographique et par domaine des technologies quantiques :

¹Une limite existe toutefois : sur les applications sensibles ayant un certain degré de maturité, notamment dans la défense, on constate le ralentissement, voire l'arrêt, du dépôt de brevets par les États-Unis et la Chine, ce qui laisse supposer que ces pays privilégient dans ces domaines le secret à la protection de la propriété intellectuelle.

- **L'informatique quantique** (des différentes technologies de qubits aux algorithmes et logiciels quantiques).
- **Les communications quantiques** (incluant le chiffrement quantique et les réseaux quantiques, avec tous les éléments nécessaires au fonctionnement des réseaux quantiques).
- **Les capteurs quantiques.**

Le nombre total de familles de brevets sur l'ensemble des domaines du quantique s'élève à près de **27 000 familles de brevets publiés** en vigueur au 31 décembre 2025.

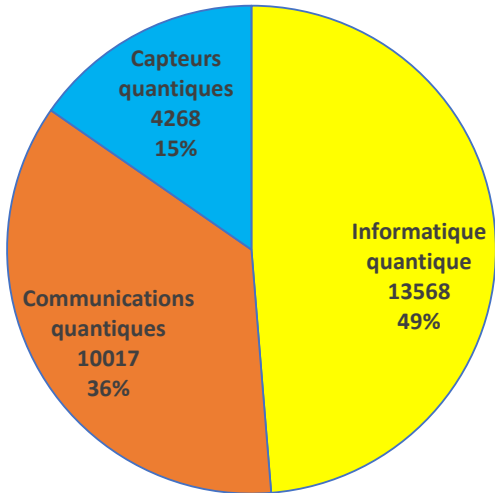


Figure 1 : nombre de familles de brevets par domaine quantique.

Une demande de brevet fait l'objet d'une publication normalement 18 mois après le dépôt. Les demandes de brevets publiées au 31 décembre 2025 ont fait l'objet d'un dépôt 18 mois auparavant, soit fin juin 2024.

La Figure 1 montre la répartition des familles de brevets par domaine :

Le **domaine de l'informatique quantique domine fortement**, avec près de 50 % de l'ensemble des brevets déposés à travers le monde dans le domaine quantique, suivi par le domaine des **communications quantiques** (avec 36 %) et des **capteurs quantiques** qui représentent 15 % du total.

Le nombre de premiers dépôts croît fortement d'année en année : **+28 % en moyenne entre 2019 et 2023**, avec un léger ralentissement de croissance entre 2022 et 2023 à 23 %. **Cette croissance est très élevée quand on la compare à la croissance moyenne des premiers dépôts tous domaines confondus.**

Note de la Figure 2 ci-dessous : l'année 2024 n'est pas significative, car incomplète. Elle montre néanmoins que 2024 sera à nouveau une année de forte croissance.

Par ailleurs, la répartition par domaine quantique évolue légèrement dans le temps **au bénéfice du domaine « informatique quantique »** (en passant de 16 % des premiers dépôts en 2016 à **56 % en 2023**), la **part du domaine « communications quantiques » baissant à 32 % en 2023.**

En termes de répartition par pays ou zone géographique, **la Chine représente près de 60 % des familles de brevets dans le domaine quantique**, suivie par **les États-Unis et l'Europe**, comme indiqué dans la Figure 3 ci-après :

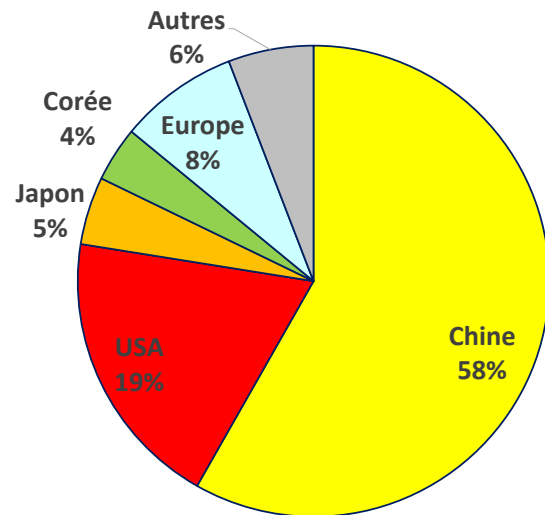
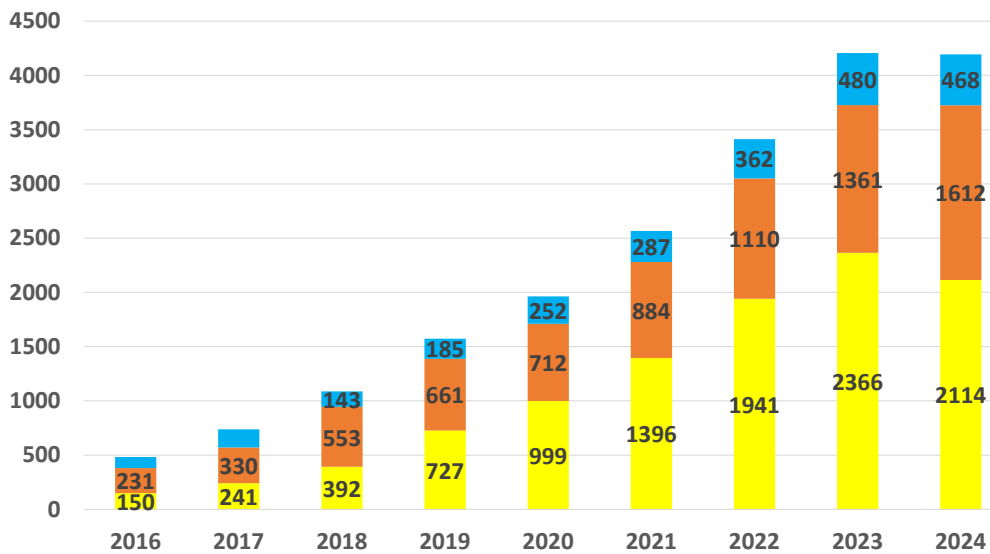


Figure 3 : nombre de familles de brevets par pays ou région d'origine.



■ Informatique quantique ■ Communications quantiques ■ Capteurs quantiques

Figure 2 : nombre de familles de brevets par domaine quantique et par date de premier dépôt.

Une situation plus favorable pour les États-Unis et l'Europe en se basant sur les « familles internationales de brevets »

Néanmoins, la position de la Chine doit être relativisée. Un brevet permet en effet de protéger une invention pour le pays dans lequel le brevet est délivré.

Une invention « de valeur » sera donc protégée **dans plusieurs pays**, à travers des extensions dans différents Offices (on parle donc dans ce cas de « **famille internationale de brevets »**).

Si nous considérons ces « familles internationales de brevets », la situation devient complètement différente puisque **la part de la Chine passe de près de 58 % des familles de brevets à seulement 12 %** (voir Figure 4).

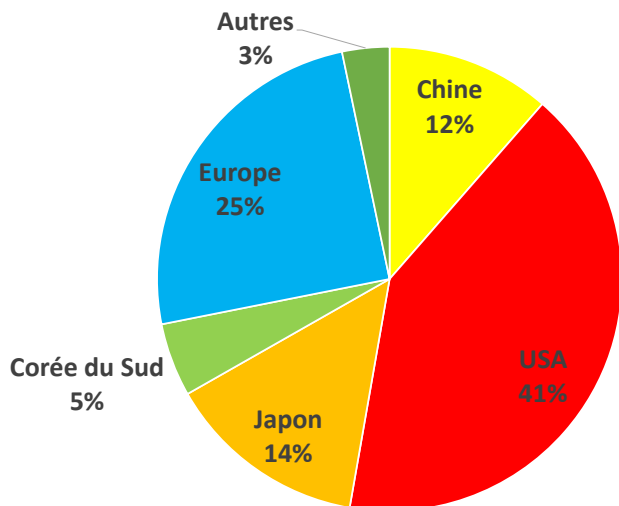


Figure 4 : pourcentage de familles internationales de brevets par pays ou région d'origine.

La Chine passe ainsi de la première place à la quatrième place, derrière les USA, l'Europe et le Japon.

Il faut noter que **l'Europe est la zone géographique avec le plus fort taux de familles internationales de brevets**, comme indiqué dans le Tableau ci-dessous.

Pour les premiers dépôts de demande de brevet effectués **en Chine, seulement 5 % font l'objet d'une extension** (ce qui revient à dire également que **95 % des premiers dépôts** de demande de brevet restent applicables **uniquement** sur le territoire chinois). Ce ratio de 5 % pour la Chine **n'est pas spécifique aux technologies quantiques** et se retrouve dans d'autres secteurs technologiques.

Nous allons maintenant détailler la situation par domaine (voir Figure 5 ci-contre).

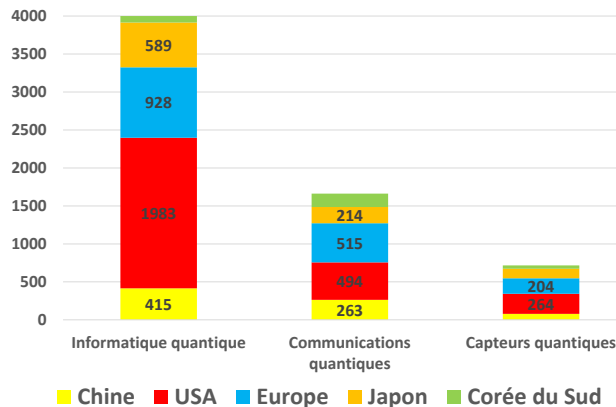


Figure 5 : nombre de familles internationales de brevets par domaine quantique et par pays ou région d'origine.

En conclusion sur cette partie :

- Nous pouvons avoir une **double vision dans le domaine quantique sur le poids de la Chine : numéro 1 incontesté en considérant toutes les familles de brevets, mais numéro 4 en considérant les familles internationales de brevets.**
- **Le domaine de l'informatique quantique est le domaine prédominant** par rapport aux deux autres. En se basant sur les « familles internationales de brevets », le poids du domaine « informatique quantique » **s'élève à plus de 60 %.**
- Les États-Unis sont très largement en tête sur ce domaine, suivis par l'Europe.
- Dans les domaines des communications quantiques et des capteurs quantiques, les **États-Unis et l'Europe sont très proches** l'un de l'autre en nombre de familles internationales de brevets, et sont en tête par rapport aux autres pays.

Étude par domaine quantique

Dans les chapitres suivants, les données utilisées seront liées uniquement **aux familles internationales de brevets.**

Domaine « informatique quantique »

Le domaine de l'informatique quantique connaît une progression forte jusqu'en 2022, avec **un plateau en 2023 dû à une baisse des premiers dépôts aux USA** à cette date. **L'Europe continue d'augmenter significativement ses premiers dépôts**, notamment grâce à la politique dynamique de ses start-ups comme nous le verrons dans les Figures 6 et 7 p. 28.

Pays	Chine	USA	Japon	Corée du Sud	Europe	Total	Total tous pays
Nombre de familles de brevets (total)	15 674	5 196	1 440	1 343	2 258	26 749	26 921
Nombre de familles internationales de brevets	765	2 721	927	339	1 646	6 475	6 603
% de familles internationales de brevets	5 %	52 %	64 %	25 %	73 %	24 %	25 %

Voir la Figure 7 pour les principaux acteurs selon le nombre de familles internationales de brevets.

Les sociétés sont identifiées avec une couleur liée à leur pays ou région d'origine.

La première organisation européenne est **IQM Finland**, suivi du **Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA)**, de **Pasqal**, d'**INFINEON**, d'**Atos / Bull** et du **Centre national de la recherche scientifique (CNRS)**.

IQM Finland et **Pasqal** sont deux start-ups qui ont pour objectif le développement d'un ordinateur quantique.

Infineon est un *leader* mondial des semi-conducteurs.

Atos / Bull travaille de son côté essentiellement sur les émulateurs quantiques.

Le **CEA** est un acteur majeur de la recherche fondamentale et appliquée dans le domaine du calcul quantique.

Le **CNRS** est un acteur majeur de la structuration européenne autour des technologies quantiques.

Il faut noter le très bon classement du **CEA** et du **CNRS** sur ce domaine, qui sont les seules organisations européennes de recherche / académiques à apparaître dans cette liste.

Si nous filtrons les différentes technologies de qubits, nous voyons que les investissements sont aujourd'hui dirigés majoritairement vers les **qubits supraconducteurs** (voir Figure 8 ci-contre).

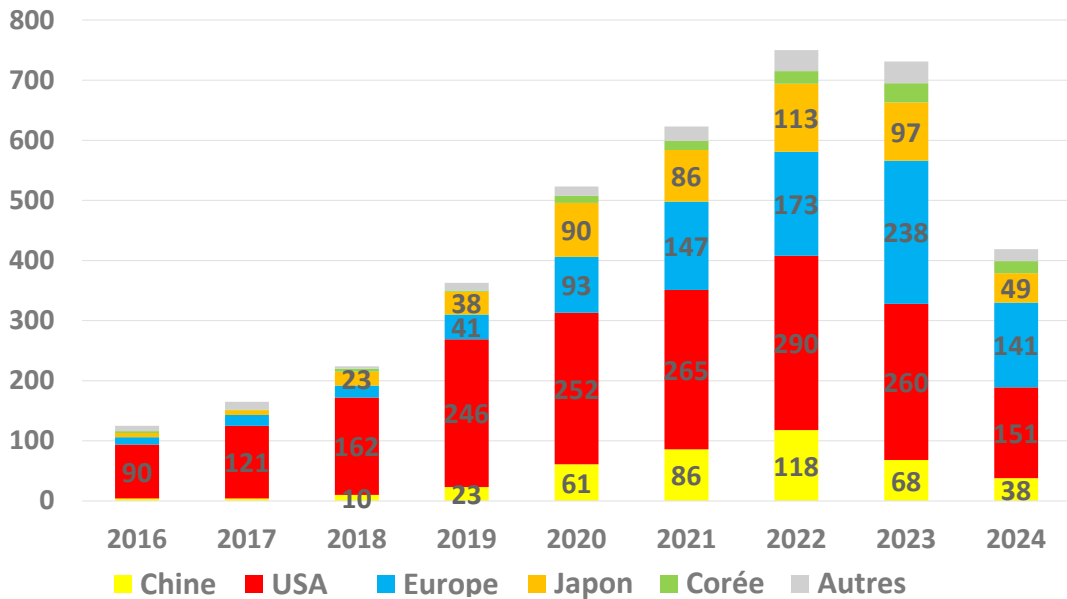


Figure 6 : nombre de familles internationales de brevets par date de premier dépôt et par pays ou région d'origine dans le domaine de l'informatique quantique.

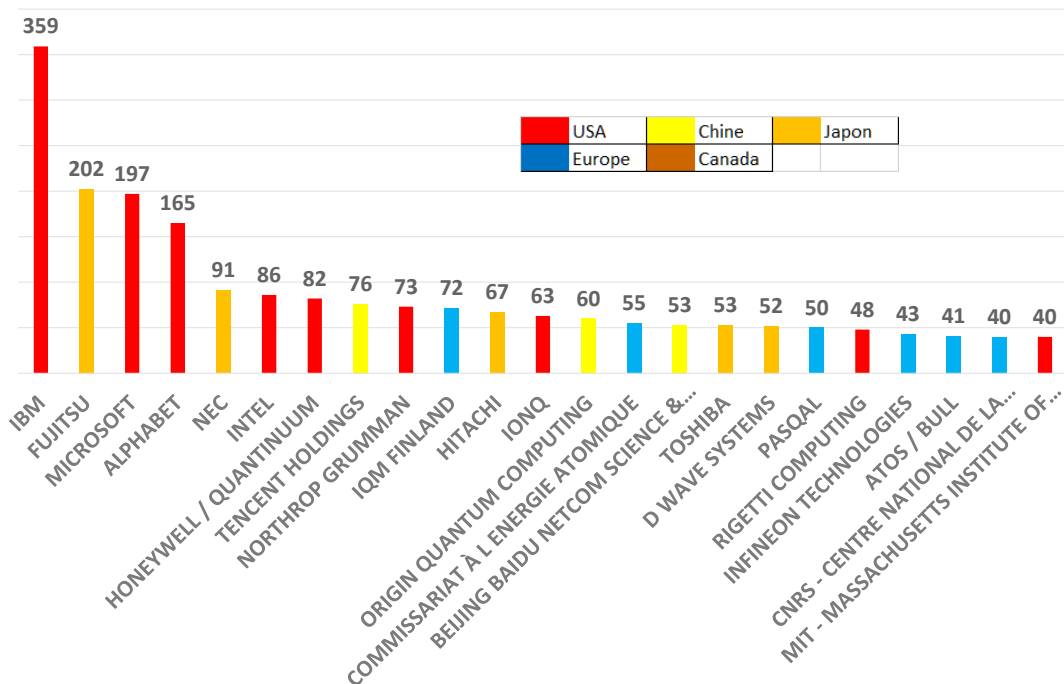


Figure 7 : principaux déposants dans le domaine de l'informatique quantique en nombre de familles internationales de brevets.

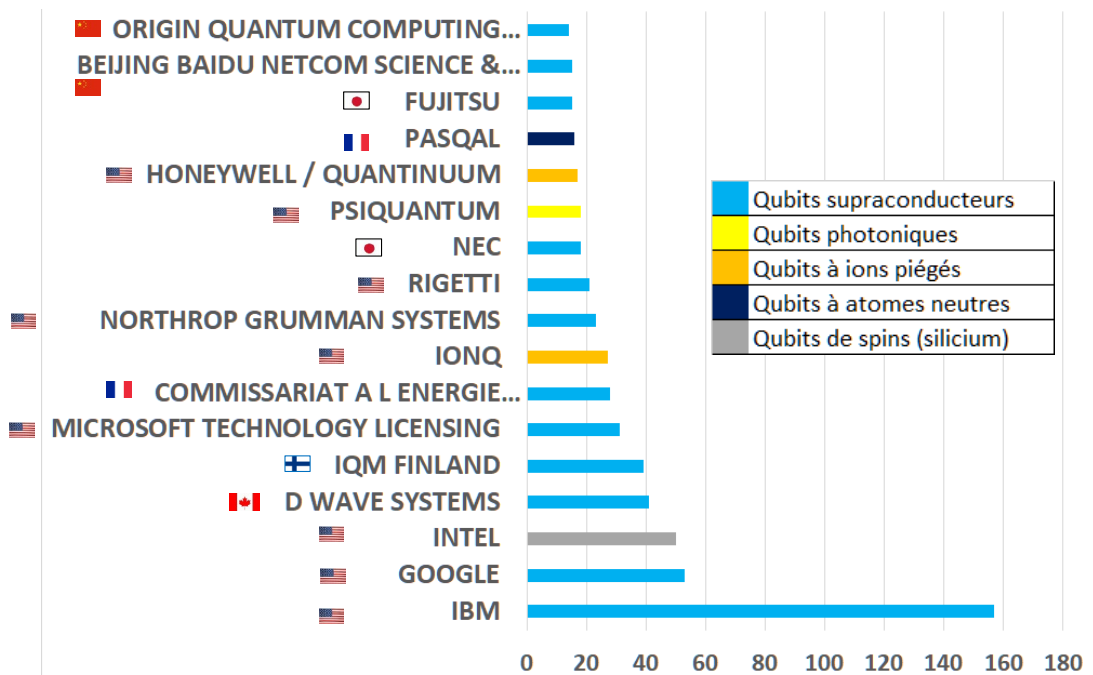


Figure 8 : principaux déposants sur les technologies de qubits en nombre de familles internationales de brevets.

La course vers le premier ordinateur quantique « industriel » **reste très ouverte entre les différents acteurs**. De plus, les différentes technologies de qubits ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients.

En Europe,

- **IQM Finland** développe un ordinateur quantique basé sur des **qubits supraconducteurs**.
- **Pasqal** développe un ordinateur quantique basé sur des **atomes neutres**.

D'autres start-ups européennes sont également très actives dans cette course (notamment, en France, ALICE & BOB, QUANDELA, ...), avec un nombre de familles internationales de brevets plus réduit.

Domaine « communications quantiques »

Le nombre de famille internationale de brevets continue de croître sur une base régulière dans ce domaine, comme indiqué dans la Figure 9 ci-dessous.

L'Europe est le premier déposant dans ce domaine depuis 2021 en nombre de familles internationales.

La Figure 10 p. 30 présente les principaux acteurs selon le nombre de familles internationales de brevets.

L'Europe compte plusieurs sociétés *leaders* dans ce domaine avec, notamment, **ID Quantique** (société suisse détenue par IONQ), **Arqit** (société britannique), **Thales**, **Nokia** ainsi qu'**Airbus**.

Thales a déposé des brevets qui couvrent les domaines des « distribution quantique de clés » ainsi que les « réseaux de télécommunications quantiques ».

Domaine « capteurs quantiques »

Dans ce domaine, **l'Europe est également le premier déposant depuis 2020** en nombre de familles internationales comme indiqué dans la Figure 11 p. 30.

Le nombre de familles internationales de brevets dans ce domaine est plus faible que pour les domaines de

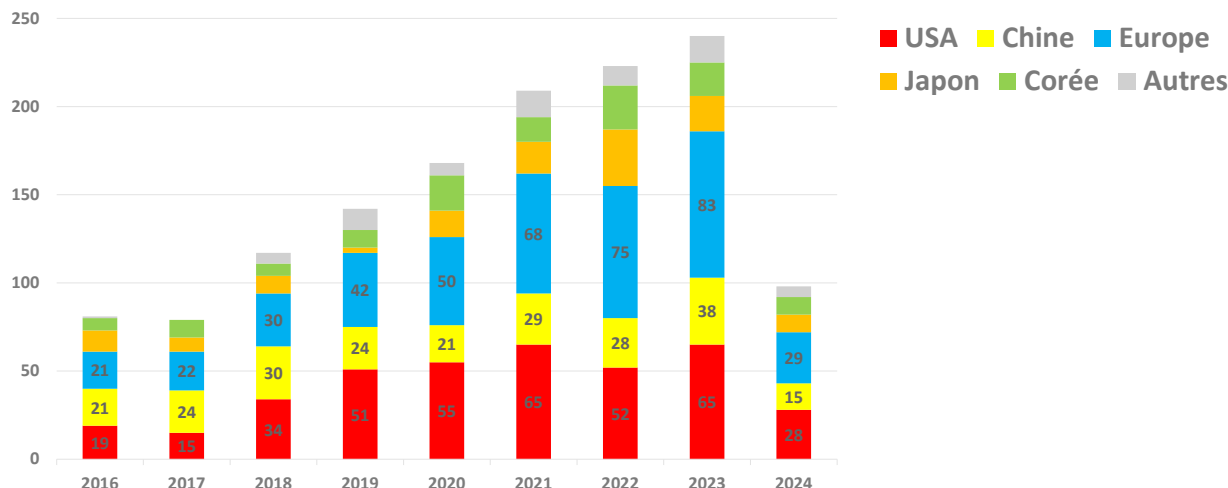


Figure 9 : nombre de familles internationales de brevets par date de premier dépôt et par pays ou région d'origine dans le domaine des communications quantiques.

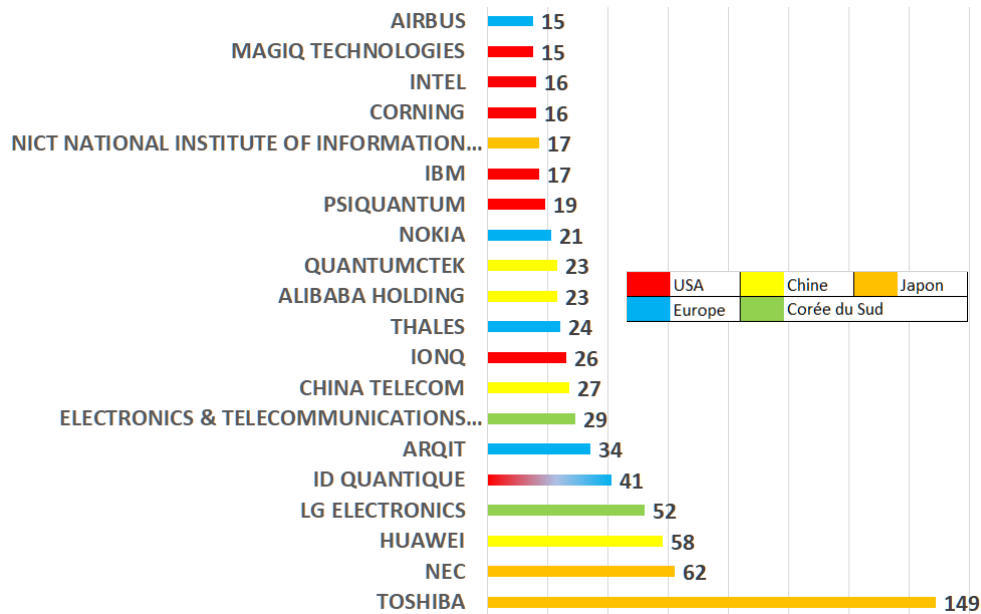


Figure 10 : principaux déposants dans le domaine des communications quantiques basé sur le nombre de familles internationales de brevets

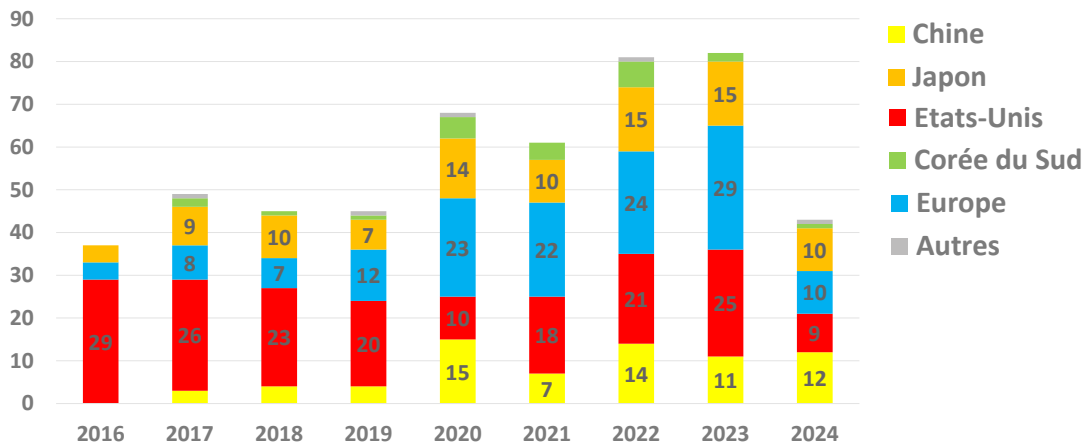


Figure 11 : nombre de familles internationales de brevets par date de premier dépôt et par pays ou région d'origine dans le domaine des capteurs quantiques.

l'informatique quantique ou des communications quantiques, notamment parce que ces technologies sont très liées à des domaines de souveraineté nationale.

La Figure 12 p. 31 montre les principaux acteurs selon le nombre de familles internationales de brevets.

L'Europe est donc très bien positionnée dans ce domaine avec comme sociétés **Thales** en France, **Element Six** au Royaume-Uni, **Bosch** et **Q.ANT** en Allemagne ou **Exail Technologies** également en France, ainsi que le **CNRS** qui est le premier académique européen dans ce domaine.

Thales en France développe des capteurs quantiques utilisant, notamment, les propriétés des « atomes froids » sur puce ou des filtres interférentiels quantiques supraconducteurs.

Element Six est une société britannique qui fournit les cristaux de diamant avec défauts lacunaires (« centres NV »), qui sont utilisés dans certains capteurs quantiques.

Les brevets des sociétés **Bosch** et **Q.ANT** en Allemagne portent essentiellement sur les capteurs quantiques à base de « centres NV ».

Les brevets de la société **Exail Technologies** en France portent sur des capteurs mettant en œuvre des « atomes froids » dans un espace sous ultra-vide.

Conclusion

L'Europe se positionne de façon forte dans les trois domaines, informatique quantique, communications quantiques et capteurs quantiques, **avec une croissance significative ces dernières années dans chacun de ces domaines. Elle est même devenue leader devant les autres pays dans les domaines des communications quantiques et des capteurs quantiques**, en nombre de familles internationales de brevets.

Les principaux acteurs européens, en nombre de familles internationales de brevets, se retrouvent dans la Figure 13 p. 31, avec une couleur correspondant aux différents domaines quantiques.

La France se place très favorablement dans ce tableau des principaux acteurs européens, selon le nombre de familles internationales de brevets, avec, notamment :

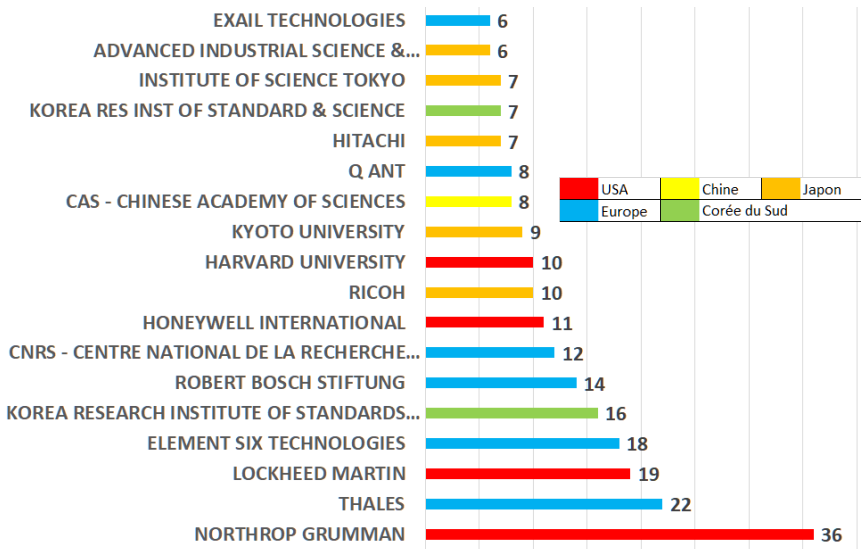


Figure 12 : principaux déposants dans le domaine des capteurs quantiques en nombre de familles internationales de brevets.

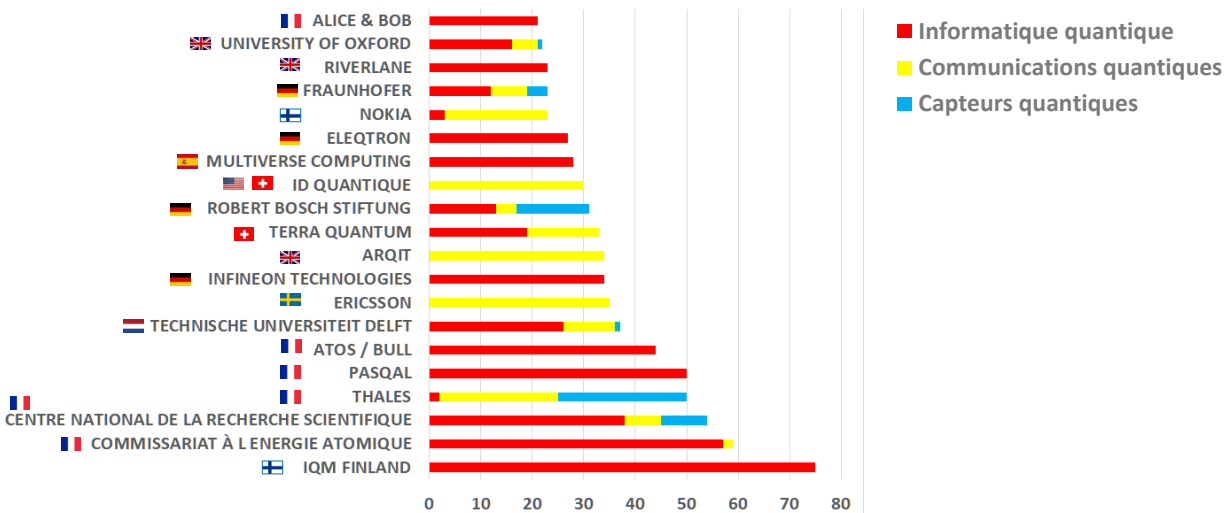


Figure 13 : principaux acteurs européens par nombre de familles internationales de brevets dans les domaines quantiques.

- les deux principaux acteurs publics en recherche et innovation, à savoir le **Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives** et le **Centre national de la recherche scientifique, qui occupent les premières places devant les autres organisations européennes de recherche ou académiques** ;
- et les sociétés suivantes :
 - **Thales⁽¹⁾**, première société européenne dans le domaine des capteurs quantiques et parmi les trois premières sociétés européennes dans les communications quantiques ;
 - **Pasqal**, start-up de l'informatique quantique, avec une croissance très forte du nombre de familles de brevets, qui développe un ordinateur quantique utilisant une technologie de qubits basé sur des « atomes neutres » ;
 - **Atos / Bull** pour des systèmes d'émulation quantique ;
 - **Alice & Bob**, start-up de l'informatique quantique qui développe un ordinateur quantique utilisant une technologie de qubits supraconducteurs.

Note : pour avoir plus de détail sur la stratégie de Thales dans le quantique, voir dans ce numéro l'avant-propos de Patrice Caine (pp. 9-12).

Bibliographie

- EUROPEAN QUANTUM INDUSTRY CONSORTIUM (2025), Global patent landscape in quantum technologies, January.
- EZRATTY O. (2025), *Understanding Quantum Technologies*, le lab quantique.
- INPI (2024), L'informatique quantique dans les brevets en 2024, novembre.
- OFFICE EUROPÉEN DES BREVETS (2025), Mapping the global quantum ecosystem, December.

Le réseau des Maisons du Quantique : Structurer la filière stratégique du calcul quantique

Par Jean-Baptiste LATRE

Coordinateur national des Maisons du Quantique

Le réseau des Maisons du Quantique structure la filière française du calcul quantique en fédérant cinq initiatives régionales et en facilitant l'accès aux machines NISQ expérimentales. Piloté par GENCI dans le cadre de HQI France, il soutient la diffusion des connaissances, la formation des utilisateurs et le dialogue entre académiques et industriels. Assurant la coordination territoriale entre les régions, il harmonise les besoins communs et spécificités locales, favorise la coopération scientifique et prépare l'appropriation industrielle. En s'insérant dans les programmes européens et en nouant des partenariats internationaux, il contribue à transformer l'excellence scientifique française en un outil de souveraineté technologique durable.

Stratégie nationale quantique et initiative HQI France

L'engagement français dans la seconde révolution quantique s'est structuré autour de la **Stratégie nationale pour les technologies quantiques**, inscrite dans le cadre de France 2030. L'ambition est claire : transformer une excellence scientifique reconnue en **capacités industrielle et stratégique durables**.

L'initiative **HQI (France Hybrid HPC Quantum Initiative)** est pilotée conjointement par le CEA, l'INRIA et GENCI. Le réseau des **Maisons du Quantique** est piloté par GENCI et fait partie de HQI.

HQI comporte deux volets complémentaires :

- Le premier volet concerne **la recherche et le développement technologique** : soutien aux équipes académiques, consolidation des compétences en ingénierie quantique et en algorithmique, structuration de projets à fort potentiel. Il vise à maintenir la France au meilleur niveau scientifique international.
- Le second volet porte sur **l'acquisition et l'exploitation de machines quantiques** dites NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), encore expérimentales. L'objectif est de permettre aux communautés scientifiques et industrielles de se confronter concrètement à ces dispositifs, d'en explorer les usages et d'identifier des cas d'application crédibles.

C'est dans ce second cadre que s'inscrit le réseau des Maisons du Quantique, en particulier pour la dissémination : **diffusion** des connaissances, **formation** d'utilisateurs, **animation** de communautés régionales, et **facilitation** du dialogue entre fournisseurs technologiques, chercheurs et industriels. L'accès à des machines encore

imparfaites devient ainsi un **instrument d'apprentissage collectif**.

Rapprocher des initiatives locales préexistantes

Le réseau des Maisons du Quantique repose sur une **logique d'agrégation** plutôt que de création institutionnelle. Il s'appuie sur des dynamiques territoriales souvent déjà établies : cinq régions ont été sélectionnées pour le projet, avec chacune leurs spécificités de partenaires et de format d'association.

L'enjeu est **d'accroître la lisibilité de ces écosystèmes**. Pour un industriel extérieur au champ académique, l'identification des compétences pertinentes peut s'avérer complexe. Les Maisons jouent un rôle de **point d'entrée structurant**, facilitant l'accès aux expertises et aux infrastructures.

Cette mise en cohérence répond à une contrainte propre au quantique : **le coût élevé des équipements et la rareté des compétences**. La coordination réduit les coûts de transaction, favorise l'émergence de projets transverses et renforce l'attractivité internationale des pôles concernés.

Des besoins communs avec des particularités locales

Plusieurs besoins convergents apparaissent au-delà de la diversité des acteurs et projets régionaux.

Le premier concerne la **participation commune à des événements** de l'écosystème quantique, avec, par exemple, l'organisation, en marge de la conférence

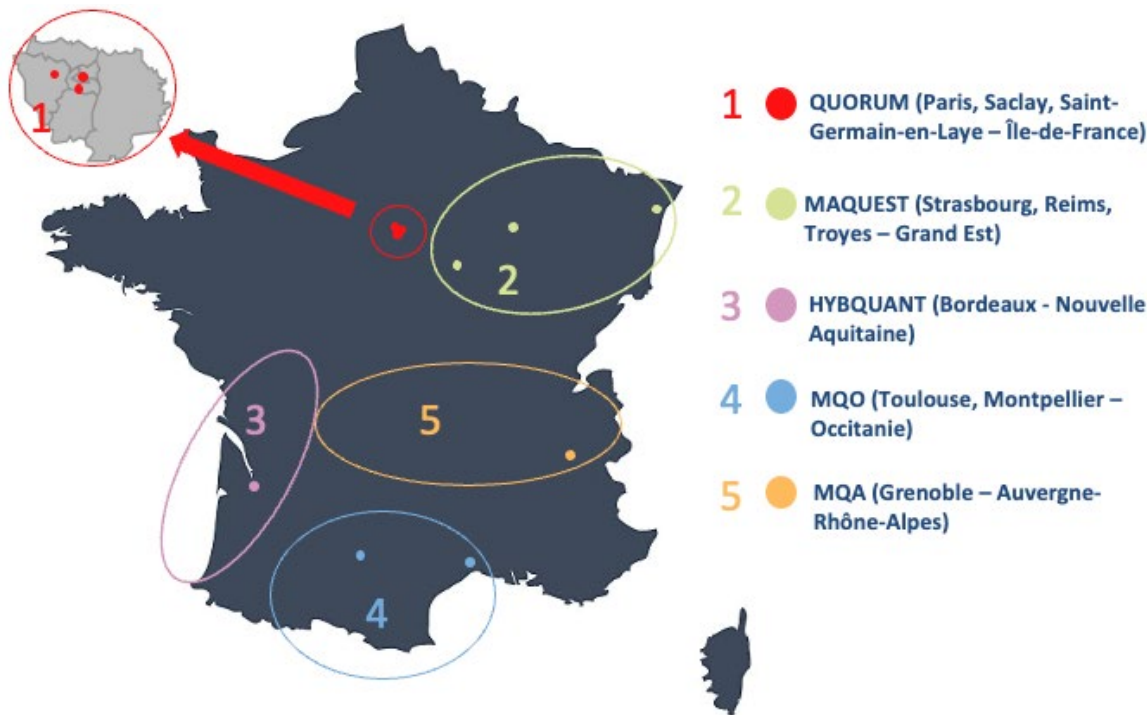


Figure 1 : Le réseau des Maisons du Quantique.

QUEST-IS, d'une journée dédiée aux collaborations internationales entre écosystèmes.

Le second est celui des **compétences**. Les technologies quantiques exigent des profils hybrides, à l'interface des mathématiques, de la physique et de l'ingénierie. La cohérence entre la formation initiale et continue constitue un enjeu stratégique, tant pour soutenir la croissance des entreprises que pour permettre aux grands groupes d'intégrer progressivement ces technologies.

Enfin, la **structuration du dialogue avec l'industrie** est déterminante. Les promesses du calcul quantique suscitent un intérêt croissant, mais les trajectoires technologiques demeurent incertaines. Les Maisons du Quantique contribuent à organiser l'expérimentation et l'évaluation des cas d'usage.

Chaque territoire conserve néanmoins ses spécificités scientifiques et industrielles. La cohérence nationale doit composer avec cette diversité sans l'effacer.

Format actuel et futur proche

À ce stade, les Maisons du Quantique fonctionnent principalement comme des **structures d'animation et de coordination**. Elles organisent rencontres scientifiques et industrielles, soutiennent des projets collaboratifs, et participent à la diffusion des compétences liées aux machines NISQ.

Leur **gouvernance** associe établissements académiques, organismes de recherche, collectivités et partenaires industriels. Cette configuration reflète la **nature transversale du quantique**, à la fois scientifique, technologique et stratégique.

À court terme, un **renforcement de l'accompagnement à la maturation technologique et à l'appropriation industrielle** est attendu. La **montée en compétence des utilisateurs**, au contact de machines encore expérimentales, constitue un investissement dans le temps long.



6.2M€ pour soutenir 5 projets

Figure 2 : Présentation des objectifs de l'initiative Maisons du Quantique.



Figure 3 : Signature d'un MoU entre le réseau des Maisons du Quantique (représenté par GENCI) et Quantum^{BW}, le 7 octobre 2025, à la foire Quantum Effects de Stuttgart.

Connexion avec les initiatives européennes et internationales

Le développement des technologies quantiques s'inscrit dans une **compétition mondiale** marquée par des **investissements massifs**. L'échelle nationale demeure indispensable pour structurer un écosystème, mais elle doit s'articuler avec les dynamiques européennes et internationales.

Les Maisons du Quantique ont vocation à **s'insérer dans les programmes collaboratifs européens**, notamment ceux de l'entreprise commune EuroHPC, pour l'acquisition de machines quantiques, afin d'atteindre une masse critique scientifique et financière et de contribuer à l'émergence de standards communs. Elles entretiennent également des **liens avec des initiatives étrangères structurantes**, notamment avec un mémorandum d'entente (MoU) signé entre la France et la région du Bade-Wurtemberg en Allemagne avec Quantum^{BW}, ou des collaborations en construction avec la Plateforme d'Innovation Numérique et Quantique PINQ² au Canada, illustrant une **volonté de coopération bilatérale renforcée**.

Cette ouverture est naturellement associée à une **vigilance particulière sur les briques technologiques sensibles**. L'équilibre entre coopération internationale et maîtrise stratégique constitue l'un des enjeux structurants de la politique quantique française.

Le réseau des Maisons du quantique apparaît ainsi comme un **instrument d'organisation collective** adapté à un champ technologique scientifiquement exigeant et à horizon de maturation long. En articulant **dissémination, coordination territoriale et accès aux premières machines expérimentales**, il contribue à **transformer un avantage scientifique en levier de souveraineté technologique**.

Le financement des activités et projets quantiques

Par Christophe JURCZAK
Quantonation

Le financement des technologies quantiques a connu, en moins d'une décennie, une trajectoire sans précédent : d'un investissement quasi inexistant à un secteur levant plus de 6 milliards de dollars par an en capital-risque, soutenu par 56 milliards de dollars d'engagements publics mondiaux. Pourtant, ce succès relatif masque une tension structurelle. Si les mécanismes de financement actuels sont bien calibrés pour accompagner la naissance de ces technologies, ils ne sont pas conçus pour leur passage à l'échelle. Dans cet article, nous soutenons que l'architecture de financement doit évoluer avec la maturité technologique : le quantique est aujourd'hui moins en manque de preuves scientifiques que de capitaux de croissance nés en Europe, d'investisseurs capables d'accompagner l'industrialisation sur le temps long, et de marchés boursiers offrant aux entrepreneurs et investisseurs fondateurs les conditions de liquidité qu'ils requièrent.

Une technologie qui n'a jamais cessé d'avancer

En mars 2026, Pasqal — *leader* français de l'informatique quantique — a annoncé une valorisation de 2 milliards de dollars dans le cadre d'une levée de fonds en amont de son accès aux marchés publics¹. Ce moment s'inscrit dans une série de jalons qui illustrent la maturité croissante du secteur : en 2025, Multiverse Computing — dont Quantonation est actionnaire depuis l'amorçage — bouclait une Série B de 189 M€ menée par GP Bullhound ; Quantinuum levait 600 M\$ à une valorisation de 10 milliards ; PsiQuantum clôturait une Série E d'un milliard de dollars. En février 2026, Quantonation achevait la clôture² de son second fonds à 220 M€ — dépassant son objectif initial de 200 M€ —, constituant à ce jour le plus grand fonds dédié aux technologies quantiques à l'échelle mondiale. Ces données convergent vers une même question, qui s'impose à tous les acteurs du secteur : au stade où les entreprises cherchent à lever des centaines de millions et à offrir de la liquidité à leurs fondateurs et investisseurs de long terme, vers quels marchés et vers quels instruments se tourner ?

Cette dynamique reflète une trajectoire de fond, non une mode passagère. Les technologies quantiques ont progressé d'une manière que leurs détracteurs n'avaient pas anticipée — et ce, sur plusieurs fronts simultanément : *hardware*, correction d'erreurs, applications industrielles, et désormais accès au capital de croissance. On a longtemps dit que le quantique était « à cinq ans de ses applications » — formule qui a fini par désigner moins un horizon réel qu'une posture de scepticisme commode.

¹ <https://www.pasqal.com/newsroom/pasqal-is-entering-a-new-phase-of-development-with-new-financing-expected-of-at-least-e340-million-in-anticipation-of-its-public-listing/>

² <https://www.bloomberg.com/news/articles/2026-02-18/novo-holdings-acs-back-220-million-quantonation-ventures-fund>

Ce n'était pas un échec de la physique. C'était un défi d'écosystème : le passage à l'industrialisation requiert une convergence que la physique seule ne garantit pas — des chaînes d'approvisionnement, des partenariats industriels, des standards, et surtout des capitaux adaptés à chaque étape de maturité.

C'est ce que j'ai formalisé sous le concept de "Perpetual Five-Year Technologies"³ (PFYT) : des domaines où la faisabilité scientifique est établie, mais où le déploiement à grande échelle est systématiquement repoussé par des contraintes d'ingénierie, de filière et d'écosystème. Le quantique est l'exemple le plus visible, mais ce cadre s'applique également aux interfaces cerveau-machine, à la fusion nucléaire civile et à beaucoup d'autres technologies. Dans tous ces domaines, les progrès sont réels et non linéaires : longs paliers d'accumulation suivis de seuils de franchissement, où les goulots d'étranglement ne se révèlent souvent que lorsque les précédents ont été levés. Le financement de ces technologies ne peut pas être pensé comme celui d'un logiciel. Il doit être pensé comme celui d'une infrastructure industrielle de long terme — avec des instruments qui accompagnent la courbe de maturité.

Un continuum de financement qui a produit des résultats

Depuis la création de Quantonation en décembre 2018 — il y a plus de sept ans — et la mise en place progressive du Plan quantique français dans le cadre de France 2030, doté de 1,8 milliard d'euros, le secteur a su construire un premier continuum de financement dont les résultats sont aujourd'hui mesurables.

³ <https://www.quantonation.com/wp-content/uploads/2025/12/PFYT-Quantonation-white-paper-2025.pdf>

Côté public, en capital, Bpifrance est intervenue à tous les stades de ce continuum : fonds d'amorçage pour les premières *spin-offs* académiques, co-investissement aux stades Série A et B en accompagnement de fonds spécialisés, et en tant qu'investisseur de croissance. Le Fonds européen d'investissement (FEI) et Bpifrance interviennent à la fois comme investisseurs directs dans les entreprises et comme souscripteurs de fonds de capital-risque spécialisés — contribuant ainsi à structurer l'ensemble du continuum de financement. Par ailleurs, le mécanisme EIC Accelerator — combinant subventions et prises de participation en fonds propres — s'est révélé particulièrement adapté aux besoins des *deep techs* en phase de validation : de nombreuses entreprises du secteur quantique européen en ont bénéficié, illustrant la complémentarité entre instruments publics et capital-risque privé.

Ce continuum a produit des résultats concrets et vérifiables. Le premier fonds de Quantonation, 27 entreprises accompagnées, affiche un multiple qui le place en termes de performance dans le premier quartile mondial. Parmi les entreprises du portefeuille, plusieurs illustrent la dynamique en cours : Pasqal a progressé de ses premiers stades à une valorisation supérieure au milliard d'euros ; Multiverse Computing et Qblox, fournisseur néerlandais d'électronique de contrôle quantique, sont des exemples de sociétés avec revenus commerciaux annuels au-delà de 10 millions d'euros. À l'échelle mondiale, plus de 100 ordinateurs quantiques sont aujourd'hui déployés — dont 35 % en Europe — représentant 1,5 milliard de dollars d'achats.

Au-delà des performances financières, ces investissements ont généré un effet de levier significatif sur l'ensemble de l'écosystème : les 93 millions d'euros investis par Quantonation fin 2024 avaient catalysé 448 millions de dollars de financement total — capital et subventions confondus —, tout en contribuant à la création de 1 216 emplois directs et à la publication de 526 articles scientifiques dans les entreprises du portefeuille (voir Figure 1 ci-dessous).

Ces résultats indiquent que le modèle de financement *early stage* fonctionne. Ils indiquent aussi que le secteur franchit un nouveau seuil de maturité, qui appelle des instruments différents.

Le défi du passage à l'échelle : une nouvelle classe d'actifs

La dynamique récente des marchés de capitaux reflète cette transition — et révèle quelque chose de plus profond qu'une simple vague de financement : le quantique est en train de devenir une classe d'actifs à part entière. Les introductions en bourse via des opérations SPAC (de l'anglais *special purpose acquisition company*), dont une deuxième vague sensiblement plus solide que celle de 2021-2022, les IPO traditionnelles en cours de préparation — dont celle de Quantinuum, valorisée à 10 milliards de dollars après une levée de 800 millions fin 2025 — et les tours de financement tardifs à plusieurs centaines de millions convergent vers une même reconnaissance : ces entreprises ont une trajectoire de valorisation lisible sur le long terme. Ce n'est pas de l'enthousiasme spéculatif ; c'est la maturité d'une industrie qui se dote des instruments de capital que toute industrie requiert pour se développer à l'échelle (voir Figure 2 ci-contre).

Les acteurs les plus avancés — américains pour la plupart — illustrent cette dynamique : IonQ, D-Wave et Rigetti ont mobilisé collectivement plus d'un milliard de dollars *via* des programmes *at-the-market* sur les marchés cotés en 2024-2025 ; PsiQuantum a bouclé une Série E d'un milliard de dollars. En Europe, des entreprises comme Pasqal et IQM ont réalisé des tours de croissance significatifs et commencent à s'imposer sur la scène mondiale — mais les conditions d'accès au capital de croissance et à la liquidité boursière restent asymétriques.

Il convient à ce stade de dissiper un débat qui a trop longtemps absorbé l'énergie du secteur : celui de savoir quelle plateforme technologique allait « gagner ». Ce débat, souvent alimenté par les *a priori* de communautés scientifiques défendant leurs approches respectives, n'est pas le bon prisme pour évaluer la maturité du secteur ni pour orienter les décisions de financement. Ce qui compte à ce stade, c'est la capacité des entreprises à industrialiser — à construire des produits répétables, à développer des écosystèmes d'applications et de partenaires, à attirer des clients industriels exigeants, et à bâtir des organisations capables de rivaliser à l'échelle

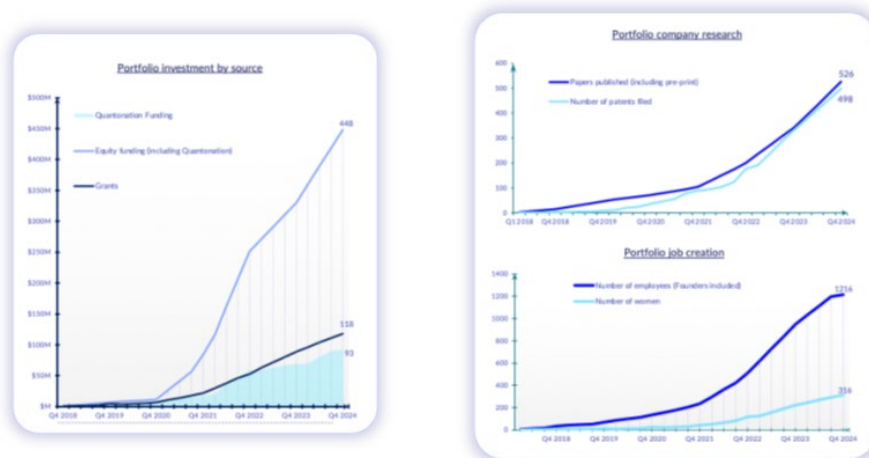


Figure 1 : Effet de levier de l'investissement *venture* sur le financement total, la recherche et l'emploi dans le portefeuille Quantonation I (2018-2024)
(Source : Quantonation Analysis ; données au T4 2024).

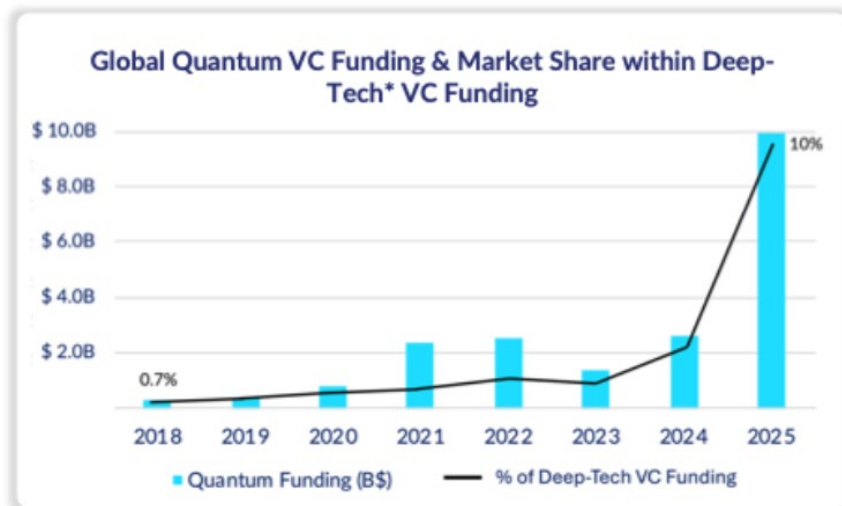


Figure 2 : Financement mondial en capital-risque des technologies quantiques et part dans le financement *deeptech* (2018-2025)

(Source : The Quantum Insider ; BCG *An investor guide to Deep-Tech* ; Quantonation Analysis).

Note : les plus grandes levées IA ont été exclues (dont OpenAI 2023 et 2025).

mondiale, y compris par la voie des fusions-acquisitions et de la consolidation sectorielle. L'histoire des grandes industries technologiques — des semi-conducteurs aux télécommunications — montre que les gagnants ne sont pas nécessairement ceux dont la physique était la plus élégante, mais ceux dont l'exécution industrielle et commerciale a été la plus rigoureuse.

Ce constat est partagé par un nombre croissant d'acteurs du capital-risque européen. Dans une tribune publiée en février 2026⁴, Olivier Tonneau (Quantonation), François Robinet (AVP) et Andreas Schwarzenbrunner (Speedinvest) soulignaient qu'après avoir prouvé sa capacité à créer des entreprises de classe mondiale, l'Europe doit maintenant prouver qu'elle peut les capitaliser à l'échelle — en particulier dans les technologies à usage dual où l'alignement des intérêts entre investisseurs et territoire d'origine n'est pas neutre.

L'asymétrie entre Europe et États-Unis est structurelle, non conjoncturelle. Elle tient à trois facteurs distincts.

- Le premier est la profondeur des marchés boursiers. Les marchés américains, en particulier le Nasdaq, disposent d'une base d'investisseurs habituée à valoriser des technologies à long cycle, à revenus non conventionnels et à fort contenu scientifique. Les marchés européens progressent dans cette direction, mais ils n'offrent pas encore les mêmes conditions de liquidité et de valorisation pour ce type d'actifs.
- Le second est l'absence de fonds de *scale-up* spécialisés en nombre suffisant, ancrés en Europe et dotés de la taille critique pour mener des tours de 100 à 500 millions d'euros dans les technologies profondes. Les investisseurs généralistes tardifs peinent à évaluer la différenciation réelle entre acteurs dans des domaines aussi techniques, ce qui crée une prime pour les acteurs disposant de la crédibilité et du réseau pour structurer ces tours complexes.

- Le troisième facteur est la dimension stratégique — mais il mérite d'être formulé avec précision pour éviter un contresens. La souveraineté technologique ne signifie pas que les entreprises quantiques européennes doivent se restreindre dans leur accès aux marchés de capitaux mondiaux, ni qu'elles doivent renoncer à des investisseurs non européens pour financer leur croissance. Ce serait contre-productif : ces entreprises ont besoin de capital patient, abondant et compétent, quelle qu'en soit l'origine géographique. Ce que la dimension stratégique impose, en revanche, c'est une réflexion sur les structures de gouvernance — la composition des conseils d'administration, les mécanismes de protection des actifs de propriété intellectuelle stratégiques —, de façon à ce que l'internationalisation du capital ne se traduise pas par une perte de maîtrise sur les orientations technologiques et commerciales de long terme. C'est un travail de structuration juridique et capitalistique, pas un réflexe protectionniste. Les instruments publics nationaux et européens ont précisément vocation à jouer ce rôle d'ancre de gouvernance, y compris dans des structures de financement internationalisées.

Les leviers d'une architecture de financement adaptée

Plusieurs leviers complémentaires méritent d'être activés de façon coordonnée

Des fonds de capital-risque spécialisés, de l'amorçage à la croissance. Le premier levier est privé. Le capital-risque spécialisé — capable de comprendre les cycles technologiques longs, la logique non linéaire des PFYT, et la construction d'actifs industriels — reste le moteur irremplaçable de la création d'entreprises. L'argument en faveur de fonds de grande taille est aujourd'hui particulièrement fort : l'écosystème quantique européen est en pleine maturité, avec plusieurs entreprises qui ont franchi les seuils de revenus et de déploiement au-delà desquels des tours de 200 à 500 millions d'euros deviennent la

⁴ <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/scale-up-le-capital-de-croissance-devient-un-jeu-de-souverainete-europeenne-2218040>

norme attendue dans les deux à quatre prochaines années. Mais les jeux sont loin d'être faits : une industrie entière reste à construire, et les champions de demain sont aujourd'hui encore en amorçage. Soutenir la croissance des leaders actuels est nécessaire ; ne pas tarir le flux des nouvelles entrées l'est tout autant. Ce double impératif plaide pour que le capital-risque spécialisé couvre l'ensemble du spectre — du premier chèque au tour de croissance — sans interruptions qui, dans les technologies à long cycle, peuvent défaire en quelques trimestres ce que des années d'effort ont construit.

Des marchés de capitaux plus accessibles aux deep techs. Les entreprises européennes du quantique doivent pouvoir accéder à des marchés boursiers offrant des conditions de valorisation et de liquidité adaptées à leurs profils. Cela passe par une meilleure éducation des investisseurs institutionnels européens à ces classes d'actifs, par des règles de marché adaptées aux entreprises à fort contenu scientifique et à revenus en construction, et par le développement d'une base d'analystes spécialisés capables d'évaluer ces actifs avec la rigueur qu'ils requièrent. La cotation d'acteurs du quantique sur des places américaines devrait s'accompagner d'une réflexion sur les conditions permettant à ces entreprises d'ancrer aussi une partie de leur liquidité sur les marchés européens.

Un soutien public ciblé, là où le marché est structurellement absent. Le rôle du capital public n'est pas d'être présent partout — c'est d'intervenir là où le marché privé ne peut pas encore aller seul : dans les phases les plus longues, les plus incertaines, les moins liquides. Cela prend plusieurs formes complémentaires. D'une part, le financement de la recherche fondamentale et des transferts technologiques, qui alimente le pipeline de nouvelles idées et de nouveaux concepts sans lesquels l'industrie de demain ne se construira pas. D'autre part, des instruments hybrides — combinant subventions et prises de participation en fonds propres —, qui ont fait la preuve de leur efficacité pour accompagner les deep techs aux stades de validation précoce. Enfin, la participation des institutions publiques nationales en tant que souscripteurs de fonds de capital-risque spécialisés, contribuant ainsi à structurer et à crédibiliser l'ensemble du continuum. À titre de comparaison, le Royaume-Uni vient d'annoncer une unité souveraine dédiée à l'IA dotée de 500 millions de livres sterling : signal que les États n'hésitent plus à mobiliser des instruments de grande taille pour accompagner l'émergence de champions technologiques. Le rapport de QuIC — l'association représentative de l'industrie quantique européenne — au Parlement européen a proposé la création d'un "Quantum Sovereignty Growth Fund" doté de 2 milliards d'euros par an.

La profondeur et la stabilité du système dans la durée. Le quatrième levier est transversal : éviter les à-coups. L'histoire des grandes industries technologiques montre que la continuité du soutien — public comme privé — compte autant que son volume. Un écosystème qui cesse d'irriguer ses premières pentes pendant qu'il finance ses sommets se condamne à l'épuisement à moyen terme. Ce « patient capital » — capable d'assumer des cycles de dix à quinze ans — est précisément ce qui permet aux écosystèmes de tenir dans la durée et de transformer une avance scientifique en *leadership* industriel durable.

Conclusion : de l'excellence scientifique au *leadership* industriel

L'Europe — et la France en particulier — dispose aujourd'hui d'un atout rare : un écosystème quantique de premier rang mondial, construit patiemment depuis une décennie, avec des entreprises capables de déployer des ordinateurs quantiques, de générer des revenus significatifs et de s'insérer dans des chaînes de valeur industrielles réelles. Ce n'est pas un point de départ — c'est une position de force. La question qui se pose désormais n'est plus celle de la faisabilité scientifique ni même de la viabilité entrepreneuriale : c'est celle de la capacité collective à porter ces entreprises jusqu'au *leadership* mondial.

Cette étape requiert des instruments à la hauteur de l'ambition : des fonds de croissance spécialisés ancrés en Europe, un capital public ciblé là où le marché privé ne peut agir seul — et une continuité de soutien, qui évite les à-coups fatals aux technologies à long cycle. L'enjeu, pour le quantique comme pour les autres grandes technologies *deep physics*, est que l'Europe ne se contente pas d'en être le berceau scientifique, mais en devienne aussi le *leader* industriel.

« Normaliser pour régner » à l'ère du quantique, un audacieux défi pour l'Europe

Par Margherita ISSOIRE

Responsable de la normalisation des technologies numériques et émergentes au Groupe AFNOR

Alors que la maturité des technologies quantiques s'accélère, leur déploiement se heurte à un paradoxe : plus les solutions sont innovantes (qubits supraconducteurs, ions piégés, photoniques...), plus leur fragmentation menace leur adoption par manque de préparation du marché. Face à ce défi, l'Europe et la France font de la normalisation volontaire un levier d'accélération, bien avant la maturité commerciale. Pourquoi ? Parce que les normes deviennent, pour les innovations de rupture, des catalyseurs de marché.

Dans cet article, nous décryptons comment la normalisation *ex ante* peut soutenir les investissements, structurer le marché et imposer des standards européens avant que les géants américains ou chinois ne verrouillent le jeu. Une stratégie offensive de l'Europe *via* les comités techniques joints européen (CEN-CLC JTC 22) et international (IEC/ISO JTC 3) doit émerger pour assurer une diplomatie technique mondiale, dans laquelle la France se positionne en première ligne.

Le programme stratégique de recherche et d'industrie (Strategic Research and Industry Agenda 2030, 2024) est une feuille de route ambitieuse pour les technologies quantiques européennes. Il identifie l'informatique quantique et la simulation quantique comme un pilier de la souveraineté technologique européenne, susceptible de révolutionner différents secteurs tels que l'optimisation, la chimie, la cryptographie, la science des matériaux et le stockage de l'énergie. Ce programme s'intéresse en particulier à l'hybridation des unités de traitement quantique avec l'infrastructure dit « HPC » (*high-performance computing*). Afin d'atteindre une masse critique, une fiabilité et une interopérabilité suffisantes dans un paysage technologique fragmenté et en exploration (qubits supraconducteurs, à ions piégés, photoniques ou à semi-conducteurs), cette feuille de route identifie la normalisation comme une priorité stratégique permettant de structurer et de fiabiliser le marché à l'ère de la « deuxième révolution quantique ».

Qu'est-ce que la normalisation volontaire ?

Les normes volontaires sont des cadres de référence qui visent à fournir des lignes directrices, des prescriptions techniques ou qualitatives pour des produits, services ou pratiques au bénéfice de l'intérêt général. Une norme volontaire naît à l'initiative des acteurs du marché qui s'accordent sur le besoin de créer des repères formels pour fluidifier leurs transactions économiques. Son élaboration relève d'une co-production entre les professionnels et les utilisateurs, les entreprises et les pouvoirs publics, encadrée par des

impératifs d'ouverture, de transparence et de consensus, qui en font un cadre formel, crédible et légitime pour le marché. Toute organisation peut ou non l'utiliser et s'y référer ; c'est pourquoi la norme est dite volontaire.

L'objet d'une norme peut être de clarifier des terminologies, harmoniser et diffuser les meilleures pratiques d'un secteur, assurer la compatibilité, et poser des exigences en termes de qualité, de sécurité, de performance ou d'impact des produits et services en se reposant, notamment, sur des méthodes d'essai et d'évaluation partagées. De ce fait, les normes facilitent et stimulent les échanges commerciaux, tant nationaux qu'internationaux, et contribuent à mieux structurer l'économie et à simplifier la vie quotidienne de chacun (Groupe AFNOR, 2026).

La normalisation volontaire et l'innovation

L'innovation est une invention qui a une valeur économique (Schumpeter, 1934 ; Borràs et Edquist, 2013). Prendre en compte les normes existantes, dès le stade de la recherche, permet de soutenir l'innovation et de lever – dès le départ – les obstacles à sa mise sur le marché.

Le cas de l'innovation de rupture : une normalisation hors norme

L'intérêt de la normalisation réside dans sa capacité à prendre en compte les deux modes de déploiement de l'innovation : incrémentale et de rupture (Tushman et Anderson, 1986 ; Dewar et Dutton, 1986).

L'innovation incrémentale consiste en améliorations mineures aux technologies existantes, le long d'un paradigme existant (Dosi, 1982). Les cartes bancaires ont évolué progressivement : cartes à bande magnétique (années 1970), cartes à puce (années 1990), puis cartes sans contact (années 2000). Chaque étape a apporté des améliorations en sécurité, rapidité et fonctionnalités, sans remettre en cause le paradigme de base (le paiement électronique). La normalisation intègre l'innovation incrémentale dans la mise à jour régulière de son corpus normatif. Les normes ISO 7810 (2019, version initiale en 1985) sur les dimensions physiques des cartes, la série ISO 7816 (publications successives dès 1987) définissant l'interface électrique et les protocoles de communication des cartes à puces, l'ISO 14443 sur les cartes sans contact, normalisant la communication radiofréquence (NFC) ont été élaborées ou mises à jour après les intégrations technologiques progressives, pour garantir leur interopérabilité mondiale. Dans ce contexte, les normes sont *ex post*, c'est-à-dire que l'innovation incrémentale est mature pour la commercialisation. De ce fait, la norme vise à préserver la cohérence globale du marché technologique en s'assurant du maintien de l'interopérabilité entre les systèmes (Perat, 2006) pour le bénéfice de chaque strate d'un secteur d'activité.

Différemment, l'innovation de rupture perturbe le marché existant et peut rendre obsolètes certaines technologies jusqu'ici dominantes (Dosi, 1982 ; Dosi et Nelson, 2013). Elle ouvre un nouveau paradigme technologique qui déterminera également un nouveau corpus normatif à part entière. L'hydrogène par exemple, utilisé comme carburant ou pour le stockage d'énergie, représente une alternative radicale aux énergies fossiles. Il nécessite néanmoins de repenser les infrastructures, les modes de production, de transport et d'utilisation de l'énergie pour être déployé. L'innovation de rupture incite à penser à une normalisation *ex ante*, souvent alors même que les technologies ne sont pas encore disponibles (Perat, 2006). Ainsi, pour préparer le déploiement à l'échelle de l'hydrogène comme alternative viable, les acteurs industriels et les régulateurs ont collaboré à l'élaboration de normes, avant même que les infrastructures ne soient largement déployées. Les normes ISO 14687 (2025, version initiale en 1999) sur la qualité de l'hydrogène pour le carburant vise à garantir sa sécurité et sa performance pour favoriser son déploiement massif ; l'ISO 19880 (2020, version initiale en 2008) et l'ISO 17268 (2020, version initiale

en 2006) relatives au ravitaillement en hydrogène anticipent les besoins d'interopérabilité pour les connecteurs des véhicules terrestres et de sécurité pour les stations-services. Cette anticipation normative vise à sécuriser les investissements, à harmoniser les pratiques entre pays et acteurs industriels, et à accélérer l'adoption d'un nouveau paradigme technologique, tout en minimisant les risques liés à l'hétérogénéité des solutions émergentes.

Avec la deuxième révolution quantique, les nouvelles applications, en tant qu'innovation de rupture, viennent disrupter de nombreux secteurs économiques, dont la maturité technologique est en phase d'accélération. Son déploiement n'est pas encore effectif, il requiert une normalisation anticipée, qui se joue en ce moment même.

Préparer le marché pour sécuriser le passage à l'échelle de l'innovation

Les normes volontaires reflètent l'état de l'art du marché : ses attentes, ses exigences et ses interfaces existantes. En étudiant les normes, nous nous assurons donc qu'une innovation répond aux besoins et exigences réelles du marché et que celui-ci est prêt à l'accueillir, c'est-à-dire qu'il existe des interfaces compatibles pour s'intégrer dans les chaînes existantes.

Par ailleurs, la normalisation structure le marché. Elle concentre l'innovation sur des aspects fortement différenciants et porteurs de valeur pour le client. En son absence, l'innovation part dans des directions diverses, et la multiplicité des solutions et leur manque d'interopérabilité constituent alors un facteur limitant pour le développement conséquentiel d'un marché et de sa masse critique.

Pour passer à l'échelle, une innovation nécessite donc de préparer le marché. La normalisation en est un vecteur essentiel (Castellion et Markham, 2013).

Si les normes fondées sur le consensus ne sont pas nécessairement synonymes de rigidité, car elles encouragent également la collaboration et peuvent présenter les caractéristiques d'un « bac à sable » utile pour l'expérimentation (Viardot, Sherif & Chen, 2026), il est néanmoins important de comprendre leur impact sur la recherche et l'innovation (R&I) et la recherche et développement (R&D) de manière avisée, afin d'influencer le cadre normatif en construction selon les intérêts à défendre, et en tirer le meilleur parti.

General functions of standards	Positive impacts on research and innovation	Negative impacts on research and innovation
Information	Provide codified knowledge relevant for innovation Coordinate collaborative innovation activities	Generate cost for standards screening Allow unintended knowledge spillovers to competitors by implementation of standards
Variety reduction	Allow exploitation of economies of scale via standards Support critical mass via standards in emerging technologies and industries Create incentives for incremental innovation based on standards	Reduce choice Support market concentration Push premature selection of technologies Limit incentives for radical innovation
Minimum quality	Creating trust in innovative technologies and products at the demand side	Promote market concentration
Compatibility	Increase variety of system products Promote positive network externalities Avoid lock-in into old technologies	Push monopoly power Foster lock-in into old technologies in case of strong network externalities
Insurance	Serve as insurance against failure of radical innovation	Create incentives for incremental instead of radical innovation

Source: Blind 2022

La France et l'Europe, dans la course à la normalisation des technologies quantique

L'architecture de la normalisation quantique

L'accélération de la maturité de l'application des technologies quantiques et son déploiement sur le marché nécessitent donc des normes qui garantissent un langage commun, la sécurisation des chaînes d'approvisionnement, l'interopérabilité avec les technologies existantes, des infrastructures de test et des méthodes de mesure de la performance et bien d'autres aspects.

Avec ces objectifs en vue, l'écosystème quantique européen a pris la tête de la course de la normalisation de ses technologies, et a créé en 2023 un comité technique joint (CEN-CLC JTC 22) entre les organismes européens de normalisation du CEN et du CENELEC, afin d'élaborer les normes nécessaires à sa structuration et à sa compétitivité. La création du comité technique joint entre les organismes internationaux de normalisation IEC et ISO (IEC/ISO JTC 3) un an plus tard en 2024 a inauguré une course désormais de portée internationale. Ces deux comités travaillent sur la normalisation de l'informatique quantique, des capteurs et de la métrologie quantiques, des communications quantiques, ainsi que d'autres sujets horizontaux tels que la terminologie et les technologies habilitantes.

Des avant-postes, une place forte et des contreforts

« L'UE renforcera sa présence dans le domaine quantique au sein des instances internationales de normalisation, des dialogues commerciaux et des alliances multilatérales dans le domaine quantique » (Stratégie européenne du quantique, 2025)¹.

¹ "The EU will strengthen its presence on quantum in international standardisation fora, trade dialogues, and multilateral quantum alliances", p. 21.

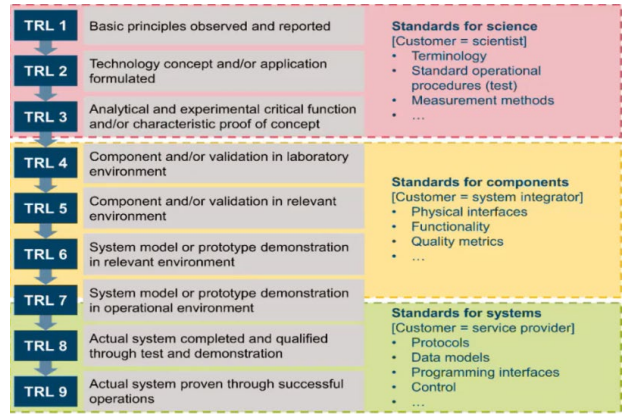


Figure 4 Technology readiness levels (TRL) and their relationship to standards and principal users
Source: van Deventer et al. 2022

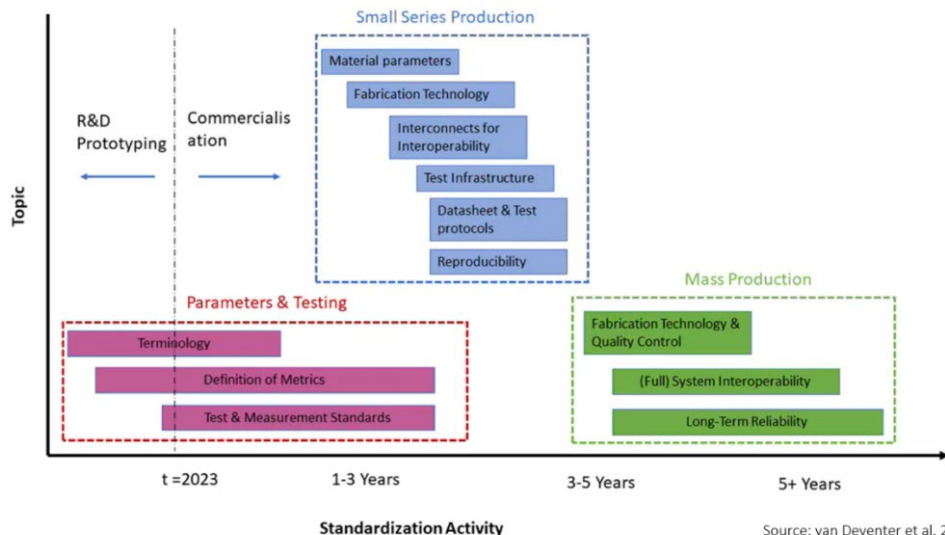
Dans la sphère d'influence que constitue désormais l'IEC/ISO JTC 3, l'écosystème européen doit se positionner en tant que *leader* pour affirmer ses intérêts au niveau international, en consolidant des positions communes solides dans la place forte que peut constituer à cet effet le CEN-CLC JTC 22.

Pour ce faire, les avant-postes se structurent. Par exemple, en mars 2026, la France *via* son organisme national de normalisation, l'AFNOR, a proposé la gouvernance d'un nouveau sous-comité sur l'informatique quantique au sein de de l'IEC/ISO JTC3, piloté par la Grande-Bretagne. Cette nouvelle structure française, dont la création est fortement soutenue par ses partenaires européens, présenterait – si elle est acceptée – l'avantage de garder un contrôle de l'agenda et des priorités techniques, de structurer les groupes de travail organiquement rattachés au périmètre du sous-comité et de favoriser une mise en visibilité de l'écosystème français de l'informatique quantique. À ce titre, la France deviendra un point de passage privilégié de la diplomatie technique mondiale des technologies quantiques.

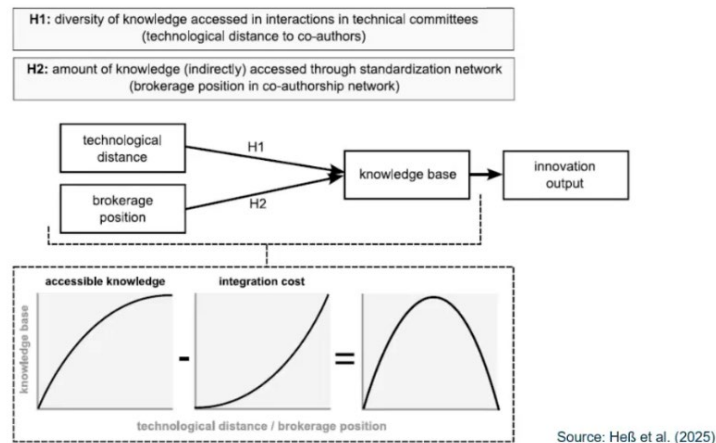
Les contreforts de la normalisation quantique française et européenne résident, notamment, dans la mise en



Timeline for Standardisation of Quantum Technology



Source: van Deventer et al. 2022



œuvre de divers programmes de recherche européens (Horizon Europe et Digital Europe), qui intègrent dans leurs projets une composante normative pour pérenniser et disséminer leurs résultats.

Une autoroute de compétitivité se dessinerait alors, ouvrant la voie à un véritable avantage quantique pour la France et l'Europe, dans la lignée de la Stratégie européenne pour le quantique, publiée en juillet 2025. Ceci nécessiterait de créer les bons mécanismes pour :

- coordonner et aligner les différentes stratégies et feuilles de route sur les besoins et priorités à traiter en normalisation ;
- injecter l'état de l'art de la recherche publique et privée (R&I et R&D) dans la norme européenne, voire internationale ;
- aider les entreprises européennes à s'approprier ces avancées techniques, les mettre en production, créer de la valeur et les commercialiser ;
- imposer *de facto* ces technologies "*made in Europe*" auprès de la communauté internationale.

Cette vision nécessite une compréhension partagée des objectifs et des leviers d'action, une coordination étroite le long du continuum autorités publiques-entreprises-organismes de recherches-organisme de normalisation, et un pilotage déconcentré permettant à la fois la fluidité de l'information en tout point et des actions individuelles coordonnées.

Références bibliographiques

BLIND K., RAMEL F. & ROCHELL C. (2022), "The influence of standards and patents on long-term economic growth", *The Journal of Technology Transfer*, 47(4), pp 979-999.

BLIND K. (2025), "Research & Development and Standardisation: "Effectively participating in standardisation bodies, Strategic standardization for RTOs/ Beginners, Intermediate experts, Sophisticated experts", *EARTO Pilot*, <https://edu4standards.eu/pilots/earto-pilot>

BORRÁS S. & EDQUIST C. (2013), "The choice of innovation policy instruments", *Technological forecasting & social change*, 80(8), pp. 1513-1522.

CASTELLION G. & MARKHAM S. K. (2013), "Perspective: New product failure rates: Influence of argumentum ad populum and self-interest", *Journal of Product Innovation Management*, 30(5), pp 976-979.

DEWAR R. D. & DUTTON J. E. (1986), "The adoption of radical and incremental innovations: An empirical analysis", *Management science*, 32(11), pp. 1422-1433.

DOSI G. (1982), "Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change", *Research policy*, 11(3), pp 147-162.

DOSI G. & NELSON R. R. (2013), "The evolution of technologies: An assessment of the state-of-the-art", *Eurasian business review*, 3(1), pp. 3-46.

GRUPE AFNOR, « Vos questions sur l'univers des normes et la normalisation ». Consulté le 06 mars 2026 : <https://www.afnor.org/normes/faq/>

PEYRAT O. (2006), « Les apports de la normalisation à l'innovation », *Revue internationale et stratégique*, N°63, pp. 127-132.

SCHUMPETER J. A. (1934), *The Theory of Economic Development: An inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle*, Cambridge, Harvard University Press (première édition publiée en 1911 en allemand).

STRATEGIC RESEARCH AGENDA, Quantum Flagship, https://qt.eu/app/uploads/2020/04/Strategic_Research_Agenda_d_FINAL.pdf. April 2020.

TUSHMAN M. L. & ANDERSON P. (2018), "Technological discontinuities and organizational environments", *Organizational innovation*, Routledge, pp. 345-372.

VAN DEVENTER O., SPETHMANN N., LOEFFLER M. et al. (2022), "Towards European standards for quantum technologies", *EPJ Quantum Technology*, 9(33).

VIARDOT E., SHERIF M. H. & CHEN J. (2016), "Managing innovation with standardization: An introduction to recent trends and new challenges", *Technovation*, 48-49, pp. 1-3.

Quantum Europe Strategy: Quantum Europe in a changing world

Par Oscar Diez

Deputy Head of Unit for Quantum Technologies at the European Commission

The Quantum Europe Strategy (July 2025) signals a turning point: quantum is moving from laboratories into value chains, raising competitiveness, critical-infrastructure resilience and, for some uses, security considerations. Europe starts from real strengths, including scientific excellence, a deep talent base, a dynamic start-up ecosystem and a strong supplier position, yet it still struggles to convert these assets into industrial scale-up, early adoption and market leadership. This article explains the Strategy's delivery loop across five areas (R&I, infrastructures, industrialisation, space and dual-use, skills) and discusses how the forthcoming Quantum Act could operationalise coordination, strengthen supply-chain resilience and stimulate demand. At a critical moment in global competition, the priority is to turn excellence into execution.

Why “Quantum Europe in a changing world” now

Quantum technologies are no longer treated only as a scientific frontier. They are increasingly framed as a strategic capability that can shape industrial competitiveness, the resilience of critical infrastructures and, in some domains, security. The Commission's Communication Quantum Europe Strategy¹ (2 July 2025) captures a shift from laboratory progress to the early formation of markets and supply chains (European Commission, 2025).

This shift is broader than the usual focus on quantum computing. Quantum sensing is already moving into real environments, and long-established applications such as Magnetic Resonance Imaging illustrate that quantum effects have supported high-impact technologies for decades. What is new is the breadth and speed of the pipeline: secure communications, new sensing modalities for navigation and geophysics, and computing and simulation approaches that could later deliver advantages in optimisation and modelling in sectors such as logistics, finance, chemicals and materials (European Commission, 2025).

The strategic urgency also reflects global dynamics. Large-scale industrialisation efforts are underway worldwide, with the United States strongly driven by private capital and China backed by major public programmes. In Europe, the Commission and Member States report more than EUR 11 billion of public investment over the past five years, yet Europe attracts only a small share of global private quantum investment, a point highlighted both by the Strategy and by external reporting (European Commission, 2025; Reuters, 2025). This emphasis on execution is consistent with

the broader competitiveness agenda highlighted in the Draghi report, which argues that Europe needs more coordinated industrial policy and faster decision-making to deliver strategic capabilities at scale (Draghi, 2024).

This is why the Strategy reads as a “critical moment” document. It argues that the next phase of the global race will be decided less by isolated breakthroughs than by the capacity to industrialise, attract users, and secure supply chains. Industry groups broadly welcome the Strategy's direction while stressing that delivery tools and speed will be decisive for Europe's credibility as an industrial location (QuIC, 2025; DIGITALEUROPE, 2025).

Europe's starting point: Strengths, gaps, and the strategic risk

Europe enters this moment with genuine assets. The Strategy states that the EU ranks first globally in scientific publications and hosts a very large concentration of quantum talent. It also notes that approximately one third of quantum companies worldwide are based in the EU, and that EU vendors supply nearly half of the hardware and software components used in quantum computers (European Commission, 2025).

Public investment has been significant. The Commission reports nearly EUR 2 billion at EU level over the last five years, complemented by more than EUR 9 billion of additional public funding from Member States (European Commission, 2025).

However, the Strategy is equally direct about what must improve. Europe is lagging in translating innovation capability into market opportunity, and it ranks only third globally in patents filed for quantum computing, sensing and communication (European Commission, 2025). This diagnosis aligns with a wider evidence base showing very rapid global innovation growth alongside persistent scale-up and commercialisation challenges.

¹ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>

A recent joint OECD and European Patent Office mapping notes that international patent families in quantum have risen sharply over time, with growth accelerating in the last decade, while ecosystem maturity and scale-up remain uneven (OECD, 2025; EPO, 2025).

The risk is not only technological, it is economic and strategic. The Commission warns that fragmentation across Member States can slow commercialisation and weaken the emergence of a unified European quantum market. It also underlines the demand-side gap: Europe lacks early adopters among large industrial players, which deprives start-ups of market perspectives and slows the move from prototypes to deployable systems (European Commission, 2025).

Finance is part of the same picture. The Strategy notes Europe's small share of global private quantum funding, and external reporting has highlighted the resulting vulnerability of European start-ups to acquisition or relocation if scale-up conditions do not improve (European Commission, 2025; Reuters, 2025).

What the Strategy changes: Five areas, one delivery logic, and a realism test

The Strategy is structured around five strategic areas covering the path from knowledge to deployment: research and innovation, shared infrastructures, ecosystem and industrialisation, space and dual-use, and skills (European Commission, 2025). What matters most for implementation is the proposed development logic. The Commission argues that quantum technologies remain emergent and that a traditional linear path from fundamental science to market would take 10 to 15 years. It therefore proposes an iterative lifecycle approach linking research, infrastructures, and early market creation so that scientific advances are tested, scaled and adopted faster (European Commission, 2025).

This delivery framing is also where external viewpoints strengthen the “critical moment” narrative. The European Parliament's Policy Foresight work explicitly stress-tests core strategy statements against alternative 2040 futures, precisely to avoid building a plan that only works under one set of geopolitical or economic assumptions (Pataki & d'Ambrosio, 2025). The implication for an industrial audience is straightforward: Europe should treat resilience, supply chain security and scalable industrial capacity as design constraints from the start, not as add-ons after technical success.

Finally, the Strategy's realism is expressed through governance and legislative follow-up. The Commission links parts of the implementation framework to a forthcoming Quantum Act and has opened a call for evidence to shape it, presenting the Act as a vehicle to boost research and innovation, scale industrial capacity and reinforce supply chain resilience and governance (European Commission, 2025; European Commission, 2025a). This is the moment where European ambition will be tested against execution: fewer fragmented initiatives, more shared milestones, clearer demand signals, and faster scale-up, all while remaining compatible with the Single Market and international commitments.

From priorities to action: The five areas as a single “delivery loop”

The Strategy's most important message is that quantum leadership will not come from scientific excellence alone, but from Europe's ability to shorten the path between discovery, engineering and real deployment. This is why it organises action across five areas that are meant to function as one loop: research and innovation; shared infrastructures; ecosystem and industrialisation; space and dual-use; and skills.

Concretely, the Commission proposes to make access a competitive advantage. On computing, this means expanding the number and capacity of EuroHPC-based quantum systems from 2026 onwards, under a roadmap for quantum computing and simulation due in 2026. On communications, the Strategy targets an EU-interconnected experimental terrestrial and space secure network by 2030, supported by a quantum communication roadmap and an initial quantum internet pilot facility in 2026. In the space segment, timing matters: ESA currently indicates that the EuroQCI prototype satellite Eagle-1 is due to launch in late 2026 or early 2027, illustrating both momentum and the complexity of scaling space-grade quantum systems.

The “market-facing” part of the loop is equally explicit. The Strategy announces six new quantum pilot production lines under the Chips Joint Undertaking in 2025, coupled with a quantum design facility and a European quantum standards roadmap in 2026. It also places public procurement at the centre of early market creation, framing Member States as first institutional buyers and “launch customers” for quantum-enabled solutions in areas such as hospitals and critical infrastructure. The realism is that Europe's delivery loop must run faster than before, because Europe currently attracts only about 5% of global private quantum funding, a gap that directly affects scale-up capacity and strategic autonomy.

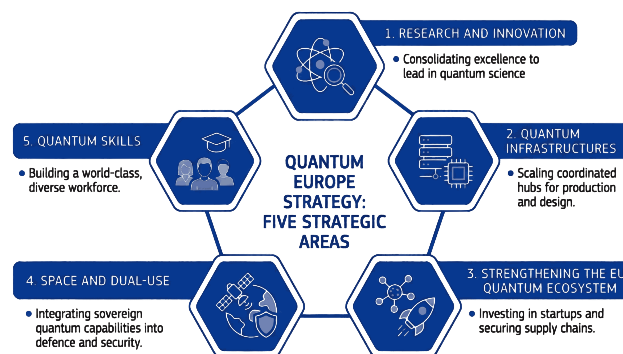


Figure 1: Quantum Europe Strategy five strategic areas.

Governance and accountability: Coordination without freezing innovation

If the Strategy is a blueprint, governance is its test of seriousness. The Commission therefore proposes a strong and inclusive EU-level governance framework, notably a High-Level Advisory Board of leading scientists and experts, and a structured cooperation framework with Member States to align EU and national programmes, coordinate annual lifecycle progress across the five areas, and monitor security and resilience in quantum supply chains and critical components.

The same logic is applied to implementation discipline, with key performance indicators, milestone tracking and benchmarking intended to prevent strategy from becoming a collection of disconnected initiatives.

This governance direction also aligns with recommendations made by Europe's quantum community over recent years. The Quantum Flagship SRIA 2030², for example, argued for strengthening coordination mechanisms and adapting governance to include all stakeholders, explicitly linking coordination, skills and monitoring to ecosystem performance. Industry voices are broadly supportive of the Strategy's ambition, but insist that the next step must be implementation design. QuIC³, representing European quantum industry actors, explicitly frames its position paper as a "critical review" that identifies implementation gaps and provides concrete recommendations across the Strategy's main areas, including infrastructure, dual-use and skills.

At the same time, there is a legitimate concern to manage: governance must enable scale without inadvertently locking the sector too early into rigid models. DIGITALEUROPE⁴, for instance, argues that quantum technologies remain immature in many segments, and warns that premature sector-specific regulation could freeze business models, recommending that any legislative initiative be preceded by a rigorous impact assessment and deep dialogue with start-ups and scaleups. The governance framework therefore needs to be both directive on delivery and cautious on over-prescription, particularly in fast-moving hardware and software stacks.

From Strategy to the Quantum Act: What legislation must unlock

The Strategy presents the Quantum Act as the vehicle to turn coordination into enforceable delivery capacity. The 31 October 2025, the Commission opened a call for evidence⁵ to shape the future Act. On the legislative timetable, the European Parliament's Legislative Train, reflecting the Commission work programme planning, points to a Commission initiative expected in 2026.

Substantively, the Strategy and the consultation framing converge on a clear industrial-policy logic: scale research and innovation alignment, scale industrial capacity, and reinforce supply chain resilience and governance. In practice, this maps to specific implementation levers already named in the Strategy, including pilot production lines, a quantum design facility, standardisation roadmapping, open-access testbeds, and EU-wide supply-chain vulnerability assessments with first results expected in 2026.

External views help sharpen what the Act should and should not do. DIGITALEUROPE's response on the Quantum Act call for evidence argues for immediate support and streamlined governance, but reiterates that the Act must be preceded by rigorous impact assessment and should avoid constraining innovation prematurely. QuIC's response to the call for evidence aligns with the three pillars used in the consultation

and explicitly proposes adding a fourth pillar on skills and talent, a signal that industry sees human capital as a limiting factor equal to funding or fabs. From the demand side, telecom operators highlight that policy should also support deployment pathways and quantum-safe communications readiness, reinforcing the Strategy's emphasis on early users and operational trust chains.

Taken together, these views point to a balanced expectation for the Quantum Act: it should be an accelerator for industrial scale and market formation, and a resilience instrument for critical dependencies, while remaining disciplined about not regulating technical choices before use cases stabilise.

EuroHPC and the "quantum pillar": Turning access into a European capability

One of the fastest ways to shorten the distance between experimentation and use is to ensure that access to advanced systems is not confined to a handful of global firms. In the Strategy's logic, this is precisely the role of EuroHPC: a European-scale infrastructure instrument that can support procurement, testing, benchmarking and early industrial use in Europe (European Commission, 2025).

That strategic choice was quickly translated into regulatory action. On 16 July 2025, the Commission adopted a proposal to amend the EuroHPC Regulation in order to introduce a dedicated "quantum pillar" in the Joint Undertaking's activities (European Commission, 2025b). On 9 December 2025, the Council agreed its position on the updated regulation, confirming the quantum pillar and updating EuroHPC governance accordingly (Council of the European Union, 2025). The Council communication is explicit that this expansion is not only technical: it also introduces safeguards related to third-country participation, reflecting the growing sensitivity of quantum supply chains and capabilities in a changing geopolitical environment (Council of the European Union, 2025).

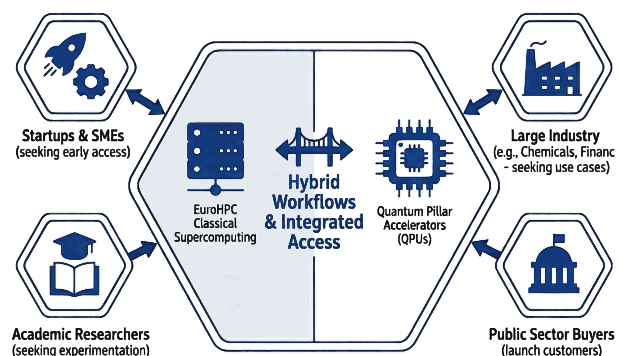


Figure 2: The EuroHPC quantum computing hybrid access model. Bridging classical and quantum.

For an industrial audience, the relevance is concrete. A quantum pillar inside EuroHPC can make "European access" a differentiator by coupling procurement and operations with an ecosystem logic, enabling hybrid workflows, and lowering barriers for start-ups and users

² <https://qt.eu/about-quantum-flagship/strategic-research-and-industry-agenda-2030>

³ <https://www.euroquic.org/>

⁴ <https://www.digitaleurope.eu/>

⁵ https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/15512-EU-quantum-Act_en

to test systems, validate performance, and develop applications in a trusted environment. The Strategy's emphasis on early adopters and public procurement also fits naturally with EuroHPC, which is already used to structure demand and access conditions across Member States (European Commission, 2025).

International partnerships and standards: Openness, but with trusted cooperation

The Strategy frames international cooperation as a necessity, not a choice. Quantum progress relies on global science and markets, but strategic autonomy requires Europe to manage dependencies, protect critical know-how, and influence standards. The Commission therefore places "trusted partners" at the centre of its external approach and proposes to work with Member States on a European Quantum International Cooperation Framework identifying priority countries and areas for structured collaboration (European Commission, 2025).

Here, external evidence helps keep the narrative grounded. The OECD's recent mapping of the global quantum ecosystem underlines how many countries now run dedicated quantum strategies and how policy tools increasingly combine R&I, infrastructure access, financing and demand-side measures (OECD, 2025). This matters for Europe's partnerships, because interoperability and standards will influence where value concentrates. The Strategy is therefore right to tie international cooperation to standardisation and to practical mechanisms such as joint calls, researcher exchanges and reciprocal access to infrastructures, rather than limiting cooperation to general declarations (European Commission, 2025).

The underlying realism is that Europe cannot "protect" its way to leadership. It needs cooperation to scale, but it must choose the terms of that cooperation, including on standards, trusted supply chains and resilience. This is one reason why the Strategy repeatedly connects external partnerships with internal delivery tools, from pilot lines and design facilities to procurement-based early adoption and supply chain monitoring (European Commission, 2025).

Conclusion: The Strategy is credible, but execution will decide the outcome

The Quantum Europe Strategy is both an ambition statement and a reality check. Europe has scientific leadership and important supplier strengths, yet it still needs to do better on speed, scale-up conditions, early adoption and resilience. The Strategy's delivery loop is therefore the right instinct, because it treats infrastructures, industrialisation tools and skills as inseparable from research excellence (European Commission, 2025).

The next 18 months (starting in January 2026) are decisive. The Commission has opened the policy pathway for an EU Quantum Act. In parallel, EuroHPC is being strengthened with a dedicated quantum pillar, while concrete delivery is already visible through the

launch of quantum pilot lines under the Chips Joint Undertaking, the continued procurement and integration of quantum computers under EuroHPC, and flagship initiatives such as the EuroHPC Quantum Grand Challenge. On secure communications, EuroQCI is moving from planning into deployment through national and cross-border projects, even as space timelines illustrate the complexity of scaling. In a changing world, Europe's success will depend on whether these instruments translate into real capacity, trusted supply chains and early markets, fast enough to support industrial leadership by 2030.

Bibliography

COMMISSION EUROPÉENNE (2025a), "Commission invites contributions to shape future EU Quantum Act", page web (appel à contributions), 31 octobre 2025 (date limite prolongée au 15 décembre 2025), consulté le 10 janvier 2026, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/commission-invites-contributions-shape-future-eu-quantum-act>

COMMISSION EUROPÉENNE (2026), "European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI)", page web, consulté le 10 janvier 2026, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

COMMISSION EUROPÉENNE (2025b), "Proposal for a Council Regulation amending Regulation (EU) 2021/1173 as regards EuroHPC (AI gigafactories and quantum pillar)", COM(2025) 414 final, 15 juillet 2025, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52025PC0414>

CONNECT EUROPE (2025), "Connect Europe's response to the Quantum Act Call for Evidence", position paper, décembre 2025. <https://connecteurope.org/sites/default/files/2025-12/Connect%20Europe%20response%20to%20the%20Quantum%20Act%20Call%20for%20Evidence.pdf>

CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE (2025), "AI: Council adopts position on the updated regulation to create AI gigafactories (EuroHPC, quantum pillar)", press release, 9 décembre 2025, consulté le 10 janvier 2026, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/12/09/ai-council-adopts-position-on-the-updated-regulation-to-create-ai-gigafactories/>

CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE (2025a), "Council Regulation amending Regulation (EU) 2021/1173 as regards EuroHPC – General approach", document du Conseil ST 15977/25, 28 novembre 2025, <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-15977-2025-INIT/en/pdf>

DIGITALEUROPE (2025), "Making Europe a quantum industry powerhouse: a strategic EU roadmap for investment, talent and industrial scale", policy paper, 2 juin 2025, <https://cdn.digitaleurope.org/uploads/2025/06/1-DIGITALEUROPEs-recommendations-for-the-EU-Quantum-Strategy.pdf>

DRAGHI M. (2024), *The future of European competitiveness – A competitiveness strategy for Europe (Part A)*, European Commission, 9 September 2024, https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_en

EUROPEAN COMMISSION (2025), “Quantum Europe Strategy ”, Communication au Parlement européen et au Conseil, COM(2025) 363 final, 2 juillet 2025, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>

EPO/OECD (2025), “Mapping the global quantum ecosystem: A comprehensive analysis based on innovation, firm, investment, skills, trade and policy data”, study report, 17 décembre 2025, https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/12/mapping-the-global-quantum-ecosystem_47891dd2/20251217-0001.pdf

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY (2025), “Eagle-1”, page web, consulté le 10 janvier 2026, https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Eagle-1

OFFICE EUROPÉEN DES BREVETS – EPO (2025), “Quantum technologies surge five-fold over the past decade, yet market adoption remains slow”, press release, 17 décembre 2025, consulté le 10 janvier 2026. <https://www.epo.org/en/news-events/press-centre/press-release/2025/1361562>

PARLEMENT EUROPÉEN (2025), “Quantum Act”, Legislative Train Schedule, version (metadata) du 14 décembre 2025, consulté le 10 janvier 2026, <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-new-plan-for-europe-s-sustainable-prosperity-and-competitiveness/file-quantum-act>

PATAKI Z.G. & D'AMBROSIO S. (2025), “Future-proofing the Quantum Europe Strategy for 2040”, European Parliamentary Research Service (EPRS), In-Depth Analysis, PE 774.696, 20 novembre 2025, https://espas.secure.europarl.europa.eu/orbis/system/files/generated/document/en/Future-proofing_the_Quantum_Europe_Strategy_for_2040_FINAL.pdf

QUIC – EUROPEAN QUANTUM INDUSTRY CONSORTIUM (2025), “European Quantum Industry Responds to the EU Quantum Strategy: A Strong Step Forward”, press release, 3 juillet 2025, consulté le 10 janvier 2026. <https://www.euroquic.org/quic-responds-to-the-eu-quantum-strategy/>

QUIC – EUROPEAN QUANTUM INDUSTRY CONSORTIUM (2025b), “QuIC Response to the Call for Evidence on the EU Quantum Act”, white paper, 12 décembre 2025, <https://www.euroquic.org/wp-content/uploads/2025/12/QuIC-Response-to-the-Call-for-Evidence-on-the-EU-Quantum-Act-QCA.pdf>

REUTERS (2025), “EU turns to private funding to boost quantum technology ambition”, 2 juillet 2025, <https://www.reuters.com/business/eu-turns-private-funding-boost-quantum-technology-ambition-2025-07-02/>

Le projet ADEQUADE dans le cadre du Fonds européen de défense

Par Daniel DOLFI, Frédéric NGUYEN VAN DAU & Arnaud BRIGNON

Coordinateurs du projet ADEQUADE, Thales Research & Technology-France

Le projet ADEQUADE s'inscrit dans le cadre des ruptures technologiques soutenues par le Fonds européen de défense. Démarré fin 2022 pour s'achever en juin 2026, il rassemble une trentaine de partenaires, dans huit pays européens. Coordonné par Thales, il est co-piloté par les principaux acteurs européens de la défense que sont en particulier Leonardo, Diehl, Indra et TNO. Ce projet vise le développement de technologies quantiques pouvant apporter un surcroît de performances considérable à des systèmes de détection électromagnétiques ou de navigation « classiques ». Il ne s'agit pas, par exemple, de développer un radar quantique (dont la pertinence n'est d'ailleurs pas établie), mais bien plutôt de doter un radar, classique dans son principe de fonctionnement, de performances (sensibilité, résolution, couverture, ...) en rupture, grâce à la mise en œuvre de concepts issus de la physique quantique.

Le projet ADEQUADE¹ (Advanced, Disruptive and Emerging QUantum technologies for DEFence) s'inscrit dans le cadre des ruptures technologiques soutenues par le Fonds européen de défense (FED). Démarré fin 2022 pour s'achever en juin 2026, il rassemble une trentaine de partenaires, dans huit pays européens (Figure 1). Coordonné par Thales, il est co-piloté par les principaux acteurs européens de la défense que sont en particulier Leonardo, Diehl, Indra et TNO.

Outre Thales, les principaux autres acteurs français du projet sont l'ONERA, Sorbonne Université, l'ENS Paris-Saclay, le CNRS, Safran, MBDA et Exail.

Ce projet vise le développement de technologies quantiques (QT) pouvant apporter un surcroît de performances considérable à des systèmes de détection électromagnétiques ou de navigation « classiques ». Il ne s'agit pas, par exemple, de développer un radar quantique (dont la pertinence n'est d'ailleurs pas établie), mais bien plutôt de doter un radar, classique dans son principe de fonctionnement, de performances (sensibilité, résolution, couverture, ...) en rupture, grâce à la mise en œuvre de concepts issus de la physique quantique. Plus précisément, le projet est articulé autour de trois domaines techniques :

- Positionnement, navigation et chronométrage (PNT : *positioning, navigation, and timing*).
- Détection radiofréquence quantique.
- Détection optronique quantique.

¹ <https://adequade.eu/>

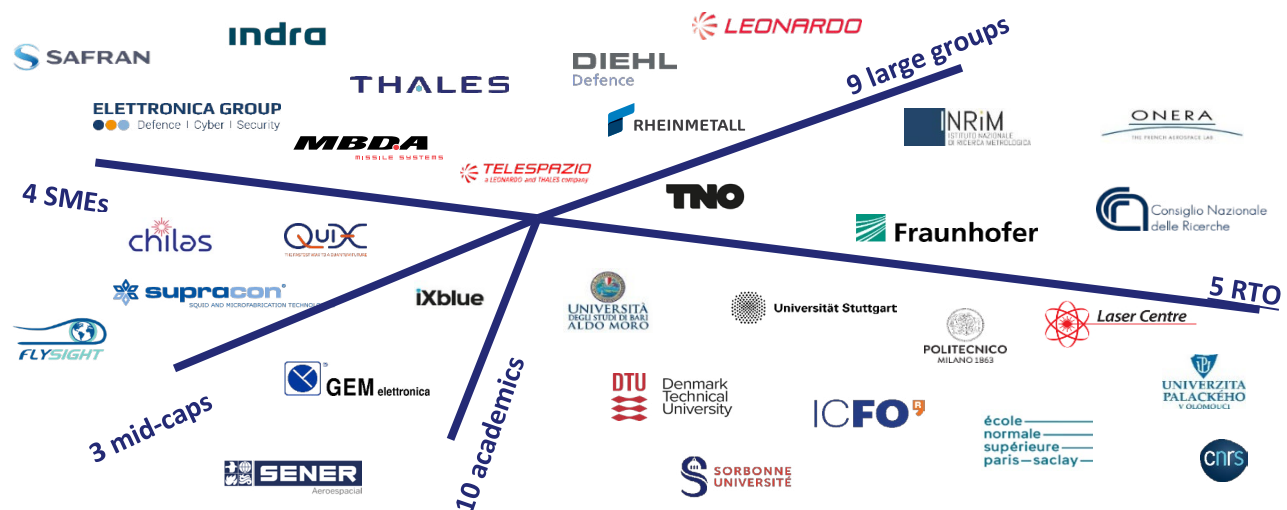


Figure 1 : Le consortium ADEQUADE

Amélioration des systèmes de navigation et de synchronisation

Dans le domaine PNT, il est de plus en plus essentiel, pour les forces, de disposer de moyens de positionnement partagés, fiables et continus pour l'ensemble des plateformes (navires, avions, véhicules terrestres, drones, ...) et pour l'ensemble des systèmes déployés sur un théâtre opérationnel. Il s'agit de disposer de moyens de positionnement et de synchronisation de l'ensemble des plateformes, avec une précision bien meilleure que leur taille, sur la durée complète de leur mission. Des expériences de détection basées sur les technologies quantiques ont déjà démontré, en laboratoire, des performances supérieures à celles de leurs équivalents classiques. Dans ce domaine, cinq technologies quantiques sont identifiées : horloges atomiques haute performance, capteurs inertiels à base d'atomes froids, gravimétrie à base d'atomes froids, capteurs inertiels à fibre optique, et magnétomètre vectoriel quantique à état solide.

L'objectif central des horloges atomiques développées dans ADEQUADE est, d'une part, d'augmenter la fréquence de référence délivrée (de manière à améliorer la précision), et, d'autre part, de réduire au minimum l'accumulation d'erreurs dans le temps. Idéalement, les horloges atomiques optiques les plus performantes visent une instabilité fractionnaire de 10^{-18} à un jour, ce qui signifie que l'horloge ne gagnerait ou ne perdrait qu'une seconde d'erreur environ tous les 30 milliards d'années. Un défi important consiste à approcher cet objectif tout en respectant les critères de taille, poids et puissance (SWaP, pour *size, weight and power*) qui sont cruciaux pour leur intégration future dans les systèmes de défense. Ainsi, l'objectif du projet, grâce au recours à la photonique intégrée et à la technologie MEMS, est la réalisation d'une horloge atomique optique atteignant une stabilité de l'ordre de 10^{-13} dans un faible volume, à terme comparable à celui d'une micro-horloge radiofréquence cent fois moins stable.

Les capteurs inertiels à base d'atomes froids fonctionnent dans le cadre des unités de mesure inertielle (IMU, pour *inertial measurement unit*). Les IMU sont des dispositifs de navigation où l'erreur de position est proportionnelle aux erreurs de mesure d'accélération et de rotation : ces inexactitudes tendent à s'accroître au fil du temps pendant la navigation. Cet élément joue un rôle clé pour assurer une navigation intégralement inertielle, notamment dans des situations où il n'y a pas de support GNSS (*global navigation satellite system*). Pour réduire l'erreur de l'IMU, il faut réduire les erreurs de mesure d'accélération et de rotation. Les capteurs à atomes froids surpassent leurs homologues classiques pour ces mesures, atteignant une sensibilité remarquable de $500 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$. $\text{Hz}^{-1/2}$ pour les accélérations et de $3\cdot 10^{-8} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ pour les mesures de rotation, offrant ainsi une solution au problème de la dérive de position. Cependant, ces capteurs quantiques ont un volume de quelques centaines de litres, contre seulement quelques litres pour une IMU classique. Afin de réduire la taille des capteurs à atomes froids, ont été développés une puce atomique permettant le piégeage des atomes ainsi que des circuits photoniques intégrés pour la génération des faisceaux lasers nécessaires au refroidissement des atomes et à l'interrogation du capteur. Par ailleurs, la fréquence de mesure des capteurs à atomes froids reste faible (de l'ordre de quelques Hz), tandis que celle des capteurs inertiels classiques est très importante (typiquement quelques dizaines de kHz). Il serait donc avantageux de

développer un capteur atomique froid hybridé avec un capteur inertiel classique, pour obtenir une dérive minimale de position tout en maintenant une bande passante élevée et toujours en respectant les critères SWaP adaptés aux applications militaires.

La gravimétrie à base d'atomes froids est une technologie quantique innovante basée sur l'interférométrie d'atomes froids, reconnue comme la seule technologie actuellement disponible pour obtenir une mesure absolue de la pesanteur depuis un navire ou un avion. Toutefois, l'utilisation de cette technologie nécessite une grande plateforme gyro-stabilisée, ce qui empêche actuellement l'emploi de ces capteurs sur de petits porteurs. ADEQUADE propose d'étendre la plage de fonctionnement en rotation d'un accéléromètre à atomes froids, permettant ainsi d'effectuer des mesures de gravité sans nécessité de plateforme gyro-stabilisée, tout en explorant des méthodes avancées pour atteindre une précision sans précédent en gravimétrie embarquée. Une telle gravimétrie permet d'établir des cartes précises du champ de gravitation terrestre à partir desquelles il est envisageable de recalculer une IMU classique, encore une fois sans recours au GNSS.

Le gyroscope à fibre optique (FOG) représente une des technologies prédominantes utilisées dans les gyroscopes commerciaux haut de gamme, en particulier lorsque la compacité et la portabilité sont une priorité. Cependant, ces capteurs déduisent les accélérations et rotations à partir de mesures de phase optique : la meilleure précision de phase pouvant être atteinte avec des sources lumineuses classiques est limitée par la limite quantique standard (SQL pour *standard quantum limit*), exprimée comme $1/\sqrt{N}$ où N représente le nombre de photons utilisés dans la mesure interférométrique. Les technologies quantiques ont montré qu'il est possible de surpasser la SQL. ADEQUADE vise à démontrer comment la performance des capteurs à fibre peut être significativement améliorée grâce à l'utilisation de sources de paires de photons intriqués et des états comprimés de la lumière (*squeezing*).

Au même titre que la gravimétrie, la combinaison des mesures issues d'un magnétomètre avec les données de l'IMU peut améliorer les estimations de position et d'orientation d'une IMU autonome. Un des objectifs d'ADEQUADE est de démontrer la faisabilité de magnétomètres vectoriels quantiques compacts et intégrés, état solide, basés sur les centres NV (*nitrogen vacancy*) du diamant. Ils fonctionneront à température ambiante et pourront offrir des magnétomètres compacts et précis, permettant un géo-référencement magnétique périodique pour réduire l'accumulation des erreurs de position dans une IMU et atténuer le risque de brouillage GNSS (interférence intentionnelle de fréquence radio avec les signaux GNSS) ou de leurrage par l'émission de faux signaux satellites pour tromper les récepteurs GNSS, entraînant des données incorrectes de position, navigation et chronométrage (*spoofing*).

Amélioration des systèmes de détection radiofréquence :

Le deuxième domaine applicatif pouvant bénéficier des technologies quantiques est celui du radar et de la guerre électronique (GE). L'objectif d'ADEQUADE est dans ce cas de les doter de capacités améliorées en termes de sensibilité, probabilité d'interception, plage dynamique et

couverture / agilité de fréquence. Dans tous ces scénarios, l'objectif est d'obtenir des gains d'au moins un ordre de grandeur pour soutenir la détection longue distance, l'identification et la classification des cibles « petites ». Le projet étudie deux axes principaux, celui des capteurs radiofréquence (RF) haute sensibilité et celui de l'intelligence électronique (ELINT pour *electronic intelligence*).

En ce qui concerne les capteurs RF, la détection quantique a le potentiel d'offrir une haute sensibilité, une grande plage dynamique et une large bande passante pouvant potentiellement surpasser le paradigme des antennes métalliques. ADEQUADE étudie trois types de capteurs quantiques spécifiques.

Le premier est fondé sur l'utilisation d'atomes de Rydberg : les atomes de Rydberg sont des atomes extrêmement excités, dans lesquels les électrons se trouvent à des niveaux d'énergie proches du seuil d'ionisation. Ainsi, les électrons de valence sont « très éloignés » du noyau, les rendant particulièrement sensibles aux champs électriques à détecter. Lorsque la fréquence RF est proche de la transition de Rydberg, ces capteurs permettent de sonder un champ RF avec une sensibilité jusqu'à quelques dizaines de $\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. Les capteurs RF Rydberg peuvent être beaucoup plus petits que les antennes actuelles, notamment à basses fréquences, et peuvent être fabriqués avec des matériaux diélectriques. Cette caractéristique est particulièrement attrayante dans la perspective de réaliser des antennes discrètes.

Le deuxième type est constitué par les filtres d'interférence quantique supraconducteurs (SQIF pour *superconductive quantum interference filter*) : une antenne SQIF détecte la composante magnétique du champ électromagnétique de manière non résonante grâce au phénomène Josephson (courant circulant entre deux supraconducteurs séparés par une fine barrière sans tension appliquée, grâce à l'effet tunnel cohérent des paires de Cooper à travers la barrière). Contrairement aux antennes traditionnelles dont la taille doit être proportionnelle à la longueur d'onde, les SQIF peuvent être considérés comme encore un nouveau type d'antenne ou de détecteur RF présentant une très large plage de détection dans un format très compact (quelques cm). Ceci est d'autant plus intéressant aux basses fréquences, où les antennes classiques peuvent être largement métriques ou décimétriques. Enfin, le troisième type est constitué par les magnétomètres pompés optiquement (OPM pour *optically pumped magnetometer*) : la modification de l'état quantique d'une vapeur d'atomes alcalins, dans une cellule de quelques cm^3 , éclairée au moyen de faisceaux laser, permet de mesurer le champ magnétique externe auquel cette vapeur est soumise. Les OPM sont très sensibles (de l'ordre du femtotesla), mais avec une faible bande passante (inférieure au 1 kHz) : ADEQUADE vise à étendre la plage fonctionnelle des OPM. Dans le domaine de la guerre électronique ou ELINT, l'apport principal des technologies quantiques étudiées dans le cadre d'ADEQUADE est de disposer d'une haute probabilité d'interception des signaux, sur un large spectre de fréquences, avec un taux de rafraîchissement et un couple sensibilité / dynamique élevé. Parmi les technologies quantiques candidates, ADEQUADE se concentre sur celle des centres NV dans le diamant². Ceux-ci permettent une analyse spectrale instantanée sur une large bande de fréquences (>10 GHz), tout en répondant aux critères SWaP et coûts nécessaires pour les applications embarquées.

Amélioration des systèmes de détection optronique :

Le troisième domaine technique étudié dans le cadre d'ADEQUADE est celui de la détection optronique dans lequel les technologies quantiques peuvent apporter des capacités améliorées en termes de sensibilité, portée, robustesse au bruit et résolution de l'imagerie, avec un impact direct sur les performances de détection, identification et poursuite des cibles difficiles, et celles des systèmes de surveillance et d'analyse de la situation tactique. Les technologies quantiques étudiées dans le projet contribuent d'une part aux systèmes actifs (constitué à la fois d'un détecteur et d'une source lumineuse pour illuminer artificiellement la cible ou la scène), et d'autre part aux systèmes passifs (détecteur sans source lumineuse propre).

Dans le contexte des systèmes actifs, ADEQUADE étudie deux principales technologies d'imagerie active : la QGI (*quantum ghost imaging*) et la QI (*quantum illumination*). Les deux utilisent comme sources des paires de photons corrélés, et exploitent les corrélations entre photons (signal et idler³) pour surmonter les limitations des systèmes d'imagerie standards et pour fonctionner avec des signaux très faibles (au niveau du comptage de photons), autorisant ainsi la réalisation de systèmes actifs discrets. La QGI utilise des photons corrélés pour créer une image d'un objet sans l'éclairer directement : le photon idler interagit avec l'objet, tandis que son photon signal corrélé est utilisé pour reconstruire l'image. L'avantage est la non-déteçtabilité : en QGI, les images sont réalisées avec un très faible nombre de photons, aléatoirement répartis dans le temps et l'espace, les rendant invisibles à un observateur externe. De plus, la QGI permet l'imagerie dans des environnements visuels dégradés, car la diffusion aléatoire d'un milieu de transmission comme la fumée ou le brouillard peut être filtrée. La QI, quant à elle, est utilisée pour la détection d'objets immergés dans le bruit de fond : le photon signal est utilisé pour illuminer la cible, alors que l'idler est conservé au récepteur. Si la cible est présente, le photon signal est réfléchi et interagit avec l'idler au récepteur. La QI pourrait réduire la probabilité de fausse alarme lors de la détection d'une cible de faible réflectivité, masquée par un bruit de fond important. De plus, la QI fonctionne comme un protocole d'illumination furtif grâce à sa faible puissance émise et assure une robustesse contre le brouillage par l'utilisation de corrélations quantiques. À noter que les sources non linéaires et les détecteurs développés dans ce cadre présentent une forte synergie avec ceux développés pour les communications quantiques.

Les systèmes passifs trouvent une application directe dans l'acquisition de cible, le contrôle de tir, la surveillance à partir de véhicules de combat et de navires : pour ces missions, les technologies classiques ont du mal à satisfaire les exigences en termes de détecteurs à très haute résolution, estimation rapide des paramètres à partir de ces images haute définition et détecteurs à faible bruit pour la détection longue distance. De plus, les systèmes traditionnels ne fournissent généralement pas d'images 3D. ADEQUADE étudie cinq types différents de technologies dans ce contexte : imagerie plénoptique corrélée, super-résolution par statistiques de photons, décomposition modale, conversion

³ Dans le phénomène non linéaire donnant naissance aux photons corrélés, un photon dit « pompe » donne naissance à deux photons, l'un arbitrairement dénommé « signal » et l'autre « idler ».

² https://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_azote-lacune

de fréquence et détection cohérente. Les technologies quantiques proposées dans ce domaine sont encore prospectives. On donne donc ici uniquement un aperçu de leur principe de fonctionnement.

L'imagerie plénoptique standard est une technique permettant de détecter simultanément la distribution spatiale et la direction de propagation de la lumière dans une scène donnée. Cette approche est l'une des façons les plus simples de réaliser une imagerie 3D en une seule prise, mais elle est limitée par un compromis entre résolution spatiale et résolution angulaire. L'imagerie plénoptique corrélée (CPI pour *correlated plenoptic imaging*) utilise les propriétés de corrélation spatio-temporelle de la lumière pour séparer physiquement le processus de formation d'image de l'extraction des informations directionnelles. La CPI peut permettre la détection, la mesure de distance et le suivi de cibles, sans nécessité de balayer la scène tridimensionnelle ou d'utiliser des méthodes de triangulation.

La super-résolution par statistiques de photons est une technique qui améliore la résolution d'un système d'imagerie en exploitant les propriétés statistiques des photons, notamment leur corrélation et distribution. Un des avantages potentiels de cette technologie est la possibilité de dépasser la limite de diffraction qui gêne la résolution des systèmes optiques classiques.

La décomposition modale est une technique utilisée pour analyser les propriétés de la lumière en la décomposant en ses modes constitutifs. L'analyse des modes spatiaux devrait apporter des informations sur une scène, qui seraient autrement difficiles à obtenir. Une autre direction d'innovation se situe dans l'étude d'analyses modales dédiées pour récupérer des informations spatiales en conditions de faible illumination.

La conversion de fréquence est une technologie quantique visant à améliorer la détection passive des longueurs d'onde du moyen infrarouge (MIR). Actuellement, cette détection est limitée par l'absence de photodétecteurs haute sensibilité et haute vitesse fonctionnant à température ambiante. La conversion de fréquence devrait accroître la sensibilité de l'imagerie dans le MIR en convertissant cette lumière vers une fréquence plus haute (longueur d'onde plus courte) *via* des processus non linéaires.

Enfin, la détection cohérente est une technique utilisée pour renforcer la sensibilité des détecteurs optiques en mélangeant un signal lumineux entrant avec un signal de référence local (oscillateur local), décalé en fréquence. Dans cette configuration, le rapport signal / bruit est amélioré, en particulier pour traiter des signaux optiques très faibles.

Outre les développements technologiques brièvement présentés dans cet article, le projet ADEQUADE s'attache également à une analyse des gains de performance envisageables, pour de futurs systèmes mettant en œuvre ces concepts fondés sur la physique quantique, ainsi que les efforts d'ingénierie à faire pour en garantir la mise en œuvre effective.

Remerciements :

This project has received funding from the European Defence Fund (EDF) under grant agreement 101103417 EDF-2021-DIS-RDIS-ADEQUADE”.

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

L'investissement dual au service de la souveraineté : L'exemple du calcul quantique

Par Jean-Baptiste PAING

Directeur adjoint de l'unité de management Combat Infovalorisé, Renseignement, Cyber, Espace et Aéronefs de mission à la Direction générale de l'armement

L'investissement public dual (civil et militaire) joue un rôle majeur dans le développement du calcul quantique en France, considéré comme une technologie stratégique susceptible d'offrir un avantage scientifique, économique et militaire majeur. Face aux incertitudes technologiques et aux coûts élevés, l'État soutient ce secteur dans le cadre d'investissements mutualisés entre le plan d'investissement France 2030 et les crédits de la défense, dans une logique de souveraineté.

Ainsi, le projet PROQCIMA, piloté par la DGA par délégation du SGPI, mobilise la commande publique pour soutenir l'écosystème français et sélectionner progressivement les entreprises les plus performantes capables de développer un ordinateur quantique, dans l'optique d'une consolidation industrielle assumée. En parallèle, le projet ALIQUANTE vise à développer le volet logiciel de l'ordinateur quantique afin de préparer l'usage de cette technologie pour la défense, dans une logique qui bénéficiera également au monde civil. Cette approche duale de souveraineté n'ignore cependant pas la nécessité d'une consolidation européenne afin de disposer de la taille critique pour rester compétitifs face aux États-Unis et à la Chine.

Introduction

L'ordinateur quantique incarne la promesse d'une rupture technologique majeure, qui offrira à ses possesseurs des capacités de calcul hors d'atteinte des calculateurs conventionnels, et leur confèrera, à moyen terme, un avantage stratégique certain. C'est la raison pour laquelle son développement constitue l'un des piliers de la Stratégie nationale quantique lancée par le président de la République en 2021.

La France dispose d'atouts indéniables pour se positionner favorablement dans ce qui est aujourd'hui une véritable course mondiale. Au-delà des États-Unis et de la Chine, elle est l'un des rares pays, avec les Pays-Bas et l'Australie, à disposer d'un socle de compétences en recherche amont et technologique, ainsi que de l'outil industriel déjà amorti permettant d'explorer sérieusement la faisabilité d'un ordinateur quantique grâce aux technologies micro-électroniques et habilitantes (cryogénie, laser...).

Toutefois, compte tenu des incertitudes techniques et calendaires, du niveau de maturité et de la complexité technologique des pistes explorées pour le mettre au point, tant le développement de l'ordinateur quantique que son industrialisation restent de réels défis technologiques et représentent un niveau de risque rendant nécessaire un investissement étatique. Mais sous quelle forme pour en tirer le meilleur rendement ?

La naissance d'une initiative duale au niveau national :

Le programme PROQCIMA

Le plan d'investissement France 2030 repose majoritairement sur une politique d'offre : il soutient préférentiellement l'innovation et la recherche *via* des aides financières, des appels à projets (subventions) et des investissements dans les entreprises. Celles-ci peuvent ainsi développer de nouvelles technologies sans attendre un client public, et le cofinancement obligatoire les incite à s'engager financièrement, ce qui garantit leur motivation et leur implication réelle dans le projet.

Néanmoins, ce mode d'intervention présente aussi des inconvénients. En effet, pour une jeune entreprise, une subvention se valorise beaucoup moins bien auprès de potentiels investisseurs qu'un contrat, dans un rapport qui peut aller de 1 à 10. De plus, si la subvention permet de soutenir les premières phases de croissance de l'entreprise, elle n'organise pas de consolidation dans la durée, tant et si bien qu'au-delà de l'échéance initiale de son plan d'investissement, l'État a souvent bien du mal à soutenir l'ensemble de l'écosystème qu'il a contribué à faire naître, si celui-ci n'a pas encore trouvé de relais de croissance sur le marché. Enfin, même si ce dernier point relève plus du droit coutumier que d'une réelle impossibilité, la subvention n'est souvent pas assortie de contreparties pour l'État, que ce soit en termes de partage de propriété intellectuelle, d'emploi ou de

partage de la valeur, ce qui résulte bien trop souvent dans la captation, par des entreprises étrangères, du savoir-faire ainsi amorcé par la France.

Afin d'éviter ces écueils dans le cadre de la montée en maturité de l'ordinateur quantique, le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) a souhaité mobiliser le levier de la commande publique dans une logique de souveraineté nationale, ce qui supposait la réunion de deux conditions : d'une part, l'existence d'un besoin de l'État, qui sous-tend le principe même de la commande publique, et, d'autre part, la capacité à restreindre le champ de la consultation aux acteurs nationaux, ce qui est, par exemple, possible lorsque les travaux mettent en jeu les intérêts essentiels de sécurité d'un État, notion dont l'acceptation partagée au sein de l'Union européenne se limite actuellement souvent aux enjeux de défense.

Inscrire une stratégie dans le champ de la dualité constitue ainsi un levier fort pour se donner les moyens de mettre en œuvre une politique de souveraineté au sein de l'Union européenne. Évidemment, il ne s'agit pas non plus de distordre la notion de dualité en imprimant une coloration défense à ce qui n'en relève manifestement pas, mais s'agissant des technologies quantiques, la qualification de dualité n'est en rien usurpée, tant ces technologies portent en elles un potentiel de rupture à même de recomposer, à l'horizon 2040, les rapports de force militaires, diplomatiques et économiques entre les « États puissances », au même titre que l'arme nucléaire ou l'accès à l'espace. Concernant plus spécifiquement l'ordinateur quantique, l'intérêt du ministère des Armées est double : du côté du bouclier, il s'agit de se préparer à la menace d'une technologie utilisée par de potentiels attaquants pour rendre obsolètes nos moyens actuels de chiffrement des communications ; du côté du glaive, comme facteur de supériorité, il s'agit de maîtriser un outil qui pourrait augmenter significativement les performances des systèmes d'armes de demain, ou en accélérer le développement, par exemple en simulant finement le comportement des matériaux et en mettant fin à de nombreux essais, à l'instar du programme Simulation, qui a mis fin aux essais nucléaires il y a maintenant quelques décennies.

C'est dans ce cadre qu'est né le projet PROQCIMA (en référence à l'étoile Proxima du Centaure, la plus proche du soleil tout en étant extrêmement lointaine, symbolisant la réalité à la fois proche et lointaine de l'ordinateur quantique), par lequel la Direction générale de l'Armement (DGA) s'est positionnée en opérateur thématique en soutien de la stratégie nationale pilotée par le SGPI, dans une logique d'innovation résolument duale. Ce dernier point est important, car PROQCIMA est souvent décrit, à tort, comme un projet défense. S'il s'agit bien d'un projet opéré par un acteur de la défense, la DGA, celle-ci est sortie de son rôle traditionnel d'équipement des forces armées pour mettre ses ressources humaines au service de l'interministériel. La démarche n'est évidemment pas dénuée d'intérêt pour le ministère des Armées : elle permet d'assurer sa propre montée en expertise dans le domaine ; elle permet d'injecter *ab initio* les besoins de la défense dans un écosystème d'entreprises encore majoritairement tourné vers le monde académique et l'investissement privé ; et elle permet d'accueillir ces entreprises à un environnement défense (processus d'habilitation, protection cyber, etc...) qui facilitera la protection du patrimoine national et l'intégration de ces technologies dans les programmes d'armement. L'enjeu de long terme n'est absolument pas d'arsenaliser ces entreprises, ce qui serait du reste hors de portée du ministère des

Armées et contraire à son intérêt, mais bel et bien de favoriser l'émergence d'un acteur préservant en son sein un espace pour traiter les enjeux de souveraineté nationaux. En tout état de cause, la gouvernance du projet reste partagée en interministériel, et la DGA ne saurait, seule, prendre des décisions structurantes sur l'évolution du projet PROQCIMA.

Concrètement, PROQCIMA, c'est un partenariat innovant notifié le 5 mars 2024 pour une durée d'au moins quinze ans, positionnant cinq entreprises sur la ligne de départ (Alice&Bob, C12, Pasqal, Quandela et Quobly), et se déclinant en plusieurs jalons, afin de sélectionner progressivement jusqu'à deux candidats les plus performants à l'horizon 2032.

L'algorithmie quantique : Une initiative défense avec des retombées vers le civil

En parallèle de la montée en puissance du volet matériel de l'ordinateur quantique au travers du projet PROQCIMA, il est apparu nécessaire au ministère des Armées de préparer l'emploi de cette future capacité par les forces armées et par les industriels de la défense, avec des outils de programmation quantiques permettant d'opérer dans un environnement souverain et maîtrisé, capable de traiter des données classifiées. En effet, le *business model* des *start-up* françaises, ainsi que les travaux de recherche académique menés dans le monde civil, reposent tous deux sur l'utilisation de *clouds* non souverains, et donc non adaptés au traitement des données et des cas d'usage de la défense. Or, si les crédits interministériels financent le volet matériel de l'ordinateur quantique au travers de PROQCIMA, assez peu de ressources sont consacrées au volet logiciel. En lançant une initiative dans le domaine, dénommée ALIQUANTE (ALgorithmes Intensifs QUANTiques à l'Échelle pour les armées), la défense pallie ainsi un manque pour ses besoins propres, mais dans une logique qui devrait avoir des retombées positives pour l'ensemble de l'écosystème, illustrant dès lors la vertu de l'approche duale et de son effet démultiplicateur en matière d'investissements publics : c'est parce que PROQCIMA a été initié dans une logique de dualité que la défense a décidé d'investir en complément sur ALIQUANTE, en prolongeant d'ailleurs cette logique de dualité.

En effet, le futur de l'informatique reposera probablement sur des approches hybrides mêlant calcul classique de haute performance (HPC) avec des accélérateurs quantiques (QPU). C'est le sens du projet civil HQI, qui associe plusieurs technologies quantiques au supercalculateur Joliot-Curie de GENCI, au sein du très grand centre de calcul du CEA. Il est donc apparu pertinent à la défense de suivre une approche similaire basée sur l'hybridité en partant de l'architecture HPC existante pour la défense – le centre de calcul mutualisé défense opéré par le CEA –, et en y adjoignant les infrastructures de calcul quantique, permettant un accès mutualisé au niveau Secret de bout en bout pour les différents utilisateurs de la défense.

Cette architecture permet, d'une part, de s'appuyer sur les compétences du CEA en matière d'opération d'un environnement HPC, et, d'autre part, d'assurer, dans la mesure où le CEA pilote également le programme quantique civil HQI, une commonalité de développements entre le civil et le militaire en matière de socle logiciel

quantique (bibliothèques, compilateurs, outils d'estimation de ressources...). En effet, l'objectif de la constitution d'une plateforme quantique de défense est avant tout de bénéficier d'un espace souverain pour traiter de données et d'implémentations algorithmiques associés à des cas d'usage classifiés, ce qui ne signifie pas nécessairement assurer une souveraineté sur l'ensemble des couches logicielles permettant d'implémenter ces cas d'usage, d'autant plus si ces développements souverains tendent à diverger avec ceux de l'écosystème civil qui seront massivement adoptés, et donc soutenus, par toute une communauté d'utilisateurs. Pour autant, la domination actuelle de l'écosystème industriel américain sur les couches logicielles de l'informatique classique ne doit pas être considérée comme une fatalité amenée à se répéter pour l'informatique quantique, et il reste pertinent d'investir sur les briques où la France peut encore prétendre jouer un rôle de précurseur. Mais il s'agit davantage d'un objectif économique qu'un objectif de souveraineté, raison pour laquelle il convient de maintenir la dualité sur cet aspect de socle logiciel quantique.

Concrètement, ALIQUANTE consiste dans la mise en place d'une plateforme souveraine quantique de défense, permettant de programmer des QPU dans un environnement classifié. Le démarrage du projet devrait intervenir au cours de l'année 2026, avec une extension temporelle de l'ordre de huit ans. Cette plateforme permettra, dans un environnement classifié de bout en bout, d'émuler, dans un premier temps, les calculateurs quantiques (dans l'attente des premiers prototypes issus de PROQCIMA), de les programmer de façon agnostique, de compiler sous forme de circuits quantiques à portes sous contraintes de ressources (nombre de qubits, nombre de portes...), de partitionner l'exécution d'un code entre HPC et QPU, et d'estimer les ressources pour le passage à l'échelle permettant d'atteindre l'avantage quantique. Outre la mise en place de la plateforme, le projet ALIQUANTE permettra le développement et l'évaluation d'algorithmes pour un certain nombre de cas d'usage défense, que cela soit par l'industrie ou la DGA, qui a décidé, à cette fin, en 2025 de créer un laboratoire quantique. En synthèse, il s'agit, sans attendre la disponibilité des QPU issues de PROQCIMA qui apporteront un avantage aux équipements de défense, de préparer l'ensemble des éléments nécessaires à leur exploitation au premier jour.

L'impératif de consolidation au niveau européen

Si la perspective de croissance du marché de l'informatique quantique est forte (on estime qu'il devrait passer d'environ 500 M€ en 2024 à 9 Md€ d'ici 2032 à l'échelle mondiale), elle reste insuffisante pour soutenir l'ensemble des acteurs actuellement positionnés sur ce créneau. Actuellement, la position de l'Europe est forte (les entreprises européennes représentent environ 50 % du marché mondial des matériels quantiques, contre 30 % pour les entreprises américaines), mais elle est dispersée (la valeur est répartie sur plus de 20 start-ups en Europe alors qu'elle est concentrée sur 5 acteurs aux États-Unis). De même, le financement public européen est significatif (les investissements cumulés de la France, des Pays-Bas, de l'Allemagne, du Danemark, de la Finlande et même de la Commission européenne dépassent ensemble les financements publics aux États-Unis ou en Chine), mais ces investissements sont souvent réalisés en silos, entraînant des redondances et des occasions manquées de synergies.

Or, les récents développements aux États-Unis – en particulier, l'initiative de référence QBI (*quantum benchmark initiative*), qui invite l'ensemble des acteurs mondiaux du calcul quantique à partager leurs feuilles de route et leurs spécifications techniques en échange de la promesse d'un soutien financier public conséquent et potentiellement de l'ouverture au marché américain – posent un défi stratégique pour l'Europe : en effet, les entreprises européennes participantes pourraient être amenées à divulguer des données sensibles, compromettant la compétitivité à long terme de l'Europe dans l'informatique quantique, la cryptographie et les domaines connexes. Au-delà du risque technologique, l'initiative QBI soulève également le spectre de restrictions de type ITAR pour les entreprises européennes participantes, sapant, à terme, leur capacité à opérer librement sur les marchés mondiaux et à gérer les enjeux stratégiques de défense, qui requièrent le maintien d'une certaine autonomie d'action.

Face à ce défi, les divers programmes nationaux européens risquent de rapidement trouver leurs limites, et seule une réponse à l'échelon de l'Union européenne, capable d'aligner les États membres, de centraliser les efforts et de dépasser les fragmentations actuelles, apparaît pertinente. De telles réflexions sont en cours, et poseront inévitablement la question de l'articulation du programme national PROQCIMA avec un futur éventuel programme européen. En effet, il ne saurait être question d'ouvrir simplement le programme PROQCIMA à d'éventuels partenaires européens, celui-ci ayant été lancé sur la base de considérations de souveraineté, par définition strictement nationales. Il est souvent question de « souveraineté européenne », mais cette association de termes constitue presque un oxymore, tout du moins dans la constitution actuelle de l'Union européenne, tant la notion de souveraineté est liée à celle d'un État et de sa capacité à asseoir une autorité politique sur un territoire et une population, sans être soumis à une autorité supérieure. Ainsi, toute initiative au niveau européen ne saurait relever d'une approche de souveraineté, mais plutôt d'une dépendance mutuelle considérée comme acceptable et, de toutes façons, nécessaire, eu égard à l'évolution actuelle de la géopolitique mondiale. Pour que cette dépendance reste acceptable du point de vue de la France, le principe d'application d'une stricte préférence européenne doit s'imposer progressivement, ce qui reste loin d'être une évidence, y compris dans le secteur de la défense, même si une dynamique s'est clairement enclenchée dans ce sens depuis fin 2024, au moins dans l'intention politique. Dans ce contexte, PROQCIMA et ALIQUANTE constituent surtout finalement un moyen de positionner au mieux l'écosystème français dans une future entité industrielle qui devra se consolider au niveau européen, avec l'objectif de maîtriser au mieux nos dépendances et de pouvoir continuer à traiter des enjeux de souveraineté, à l'instar de ce que la défense pratique aujourd'hui avec un groupe transnational comme Airbus.

Conclusion

L'exemple du calcul quantique illustre la puissance de la dualité au service de la mise en œuvre d'une politique publique d'investissement : mobilisation de l'effet de levier de la commande publique pour stimuler l'investissement privé et organiser la consolidation industrielle, mutualisation des efforts d'investissement du civil et du militaire, retombées croisées... À la date d'écriture de

cet article (mars 2026), les premiers mois de travaux des cinq entreprises de PROQCIMA sont satisfaisants, et leur montée en puissance organisationnelle pour répondre aux enjeux du projet est largement perceptible, ce qui tend à valider la démarche engagée, même si le résultat devra s'apprécier dans la durée. D'autres domaines très d'actualité (espace, cyber, numérique...) pourraient sans nul doute bénéficier d'approches comparables, sûrement encore insuffisamment exploitées à ce jour.

Les actions de l'AID en soutien d'un plan quantique ministériel

Par Patrick AUFORT

Directeur de l'Agence de l'innovation de défense

Le développement des technologies quantiques, en particulier les capteurs et les calculateurs, auront un impact significatif sur « la physionomie du champ de bataille et notre manière de faire la guerre » (Sébastien Lecornu, 7 janvier 2025).

L'ordinateur quantique fait l'objet d'une compétition géostratégique dont l'issue recomposera, à l'horizon 2040, les rapports de forces militaires, diplomatiques et économiques entre les « grandes puissances » au même titre que l'arme nucléaire ou l'accès à l'espace.

Dans cette perspective, investir dans les technologies quantiques représente un enjeu de souveraineté pour nos forces armées. L'Agence de l'innovation de défense coordonne les activités de soutien à la stratégie quantique du ministère des Armées et des Anciens combattants.

L'Agence de l'innovation de défense (AID) a été créée en 2018 pour être le chef d'orchestre de l'innovation au sein du ministère des Armées, et travailler sur plusieurs échelles de temps. Prévoir le plus tôt possible les innovations nécessaires aux futurs grands programmes (innovation « planifiée »), savoir rester agile pour identifier et intégrer les technologies hors défense, qui évoluent très rapidement (« innovation ouverte »), et explorer les technologies porteuses de ruptures potentielles.

Le « concept stratégique 2022 » de l'OTAN stipulait que « Les technologies émergentes et technologies de rupture sont porteuses d'opportunités mais aussi de risques. Elles changent la nature des conflits, gagnent en importance sur le plan stratégique et sont en passe de devenir l'un des principaux champs de la compétition internationale. De plus en plus souvent, la supériorité technologique est l'un des facteurs de la victoire militaire. »

Les technologies quantiques font bien sûr partie de ces technologies de rupture identifiées par nos alliés comme par nos compétiteurs. Elles vont permettre des évolutions technologiques majeures dans trois domaines que sont le calcul, les capteurs et les communications. Si les capacités relatives au calcul quantique ne devraient être opérationnelles que dans la prochaine décennie, celles relatives aux capteurs sont accessibles à court terme, fruit de travaux lancés au début des années 2000 et qui s'appuient sur une expertise scientifique de premier rang.

Des premiers capteurs opérationnels

En 2024, un bâtiment hydrographique et océanographique de la Marine nationale s'est vu doté d'un gravimètre quantique dénommé Girafe. Une étape qui fait de la Marine nationale certainement la première force à intégrer opérationnellement cette technologie quantique, et qui couronne vingt années de développement avec l'Office national d'études et de recherches aérospatiales

(ONERA). Thèse et projet de laboratoire tout d'abord, pour démontrer le potentiel de la technologie. Puis un premier prototype transportable, qui confirme les performances atteignables. Il est suivi d'une montée en maturité des briques technologiques (*technology readiness level* - TRL) pour développer le premier prototype complet de gravimètre pour mesure sur bateau, intégrant une plateforme gyrostabilisée. Enfin, une phase de fiabilisation avant la production et le transfert de technologie.

Ce gravimètre quantique est un gravimètre absolu qui exploite la technologie des atomes froids. Son apport se traduit aussi bien dans les performances que dans le concept d'utilisation. En effet, par rapport aux équipements qu'il remplace, il permet d'accroître la capacité de mesure de la pesanteur en mer, il ne nécessite pas de calibration, et sa précision surpasse largement les systèmes classiques.

Au-delà de ce premier cas d'usage concret, la maturité des technologies quantiques permet d'imaginer des ruptures dans plusieurs domaines.

La guerre électronique, par exemple, où les travaux sur les atomes de Rydberg ou autour des centres NV permettent d'envisager des probabilités d'interception de 100 % et des gains de plusieurs ordres de grandeurs en termes de sensibilité, donc de distance de détection.

Le domaine PNT (position, navigation, temps) avec des oscillateurs quantiques ultra stables, ouvrant la voie à une navigation ou une distribution du temps indépendantes du GNSS.

Ainsi, dans le secteur des capteurs, les usages sont là et la technologie arrive à maturité. L'enjeu général, au-delà de la maturité des technologies quantiques elles-mêmes, est l'hybridation de ces technologies avec les outils classiques, pour construire des capteurs plus performants pour nos systèmes d'armes. Le potentiel des technologies ne sera avéré que lorsqu'une cohérence de performance sera atteinte sur l'ensemble des éléments composant un équipement intégrant des technologies quantiques.

Le ministère, acteur du calcul quantique

Grâce à l'excellence de sa recherche en physique quantique, en informatique, en automatique et en mathématiques, ainsi qu'à la force de ses filières microélectronique, cryogénique et nucléaire, la France est l'un des rares pays, au-delà des États-Unis et de la Chine, capable de relever le défi du passage à l'échelle de l'ordinateur quantique grâce à la mise en œuvre d'architectures tolérantes aux fautes (*fault-tolerant quantum computing* - FTQC).

C'est l'un des objectifs de la stratégie nationale quantique du plan d'investissement France 2030. L'AID et la Direction générale de l'Armement (DGA) sont partie intégrante du pilotage de la stratégie nationale quantique et de la coordination de France 2030. Compte tenu du caractère dual du volet matériel de l'ordinateur quantique et de la pertinence de mener une compétition entre les start-ups nationales les plus prometteuses, il a été convenu que la DGA agisse comme opérateur au profit du Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) et de la communauté interministérielle pour mettre en œuvre ce volet du plan d'investissement. Le volet logiciel devrait comporter un volet plus spécifique défense avec la mise en place d'une plateforme souveraine quantique de défense permettant d'opérer dans un environnement classifié.

L'accompagnement du volet matériel prend la forme d'un partenariat innovant dénommé PROQCIMA, qui positionne cinq entreprises sur la ligne de départ (Alice&Bob, C12, Pasqal, Quandela et Quobly), et se décline en plusieurs jalons, afin de sélectionner progressivement jusqu'à deux candidats, les plus performants.

Le projet se divise en trois grandes étapes. La première est la preuve de concept. D'une durée prévisionnelle de quatre ans, elle vise à établir la faisabilité technologique et industrielle des solutions. Elle est divisée en une phase de deux ans en mode « examen » avec un niveau minimum à atteindre, et une phase « concours », qui opérera ensuite une sélection des trois technologies les plus performantes.

La deuxième étape est la maturation. D'une durée prévisionnelle de quatre ans également, elle vise à piloter la levée de verrous technologiques jusqu'au point de bascule à partir duquel le passage à l'échelle devient possible. Elle est également divisée en une phase « examen » et une phase « concours » à l'issue de laquelle il restera, au plus, deux solutions.

La troisième étape est l'industrialisation, d'une durée prévisionnelle de sept ans pour couvrir la livraison des premiers exemplaires et le maintien en condition opérationnelle.

La phase « examen » de la première étape se termine à l'été 2026, et, à ce stade, les entreprises sont sur le chemin du niveau minimum à atteindre, certaines ayant même déjà franchi ce jalon. La phase concours de l'étape 2 doit s'achever en 2032 avec un niveau à atteindre que, pour simplifier, nous fixerons à la démonstration de 128 qubits logiques industrialisables.

"Are you going to build an industrially useful quantum computer by 2033 ? If so, we'd like to hear from you." C'est l'accroche de Quantum Benchmark Initiative (QBI), le programme lancé par la DARPA américaine (Defense Advanced Research Projects Agency) à l'été 2024.

Ce programme fonctionne lui aussi en trois phases. Une phase A de six mois, dotée d'un million de dollars, qui

doit aboutir à la présentation du concept de design de la machine. Une phase B de 12 mois et dotée de 15 M\$, qui doit conduire à l'élaboration de la feuille de route de R&D et de la stratégie de réduction des risques. Et une phase C de 36 mois et une dotation plafond de 300 M\$, qui couvre le design détaillé de la machine, la réalisation de démonstrateurs, l'évaluation des performances système et la feuille de route de développement et industrialisation.

Si l'on considère qu'un "*industrially useful quantum computer*" opère au moins 100 qubits logiques, on conclut rapidement que le calendrier et les performances visés au travers de QBI sont comparables à ceux des deux premières étapes de PROQCIMA. La course est lancée, et la France est dans l'échappée. Et si les usages de l'ordinateur quantique envisagés à ce jour sont largement duaux, l'ordinateur quantique porte aussi des enjeux relevant des intérêts essentiels de sécurité et de défense, avec un potentiel de rupture considérable. Comme facteur de supériorité, il s'agit de maîtriser un outil qui pourrait augmenter significativement les capacités des outils d'ingénierie (simulation, optimisation de conception) et les performances de nos systèmes d'armes (matériaux, radar, planification, ...). Mais comme outil de potentiels attaquants, il s'agit de se préparer à la menace d'une technologie capable de rendre obsolètes certains de nos moyens actuels de chiffrement.

La cryptographie post-quantique

La communauté mathématique a imaginé plusieurs algorithmes utilisant les propriétés de l'ordinateur quantique pour casser de nombreux systèmes cryptographiques, en particulier les systèmes de cryptographie asymétrique basés sur le problème de factorisation ou de logarithme discret.

L'ordinateur quantique d'une puissance suffisante pour exécuter ces algorithmes pourrait exister dans la prochaine décennie. La cryptographie asymétrique actuellement déployée ne serait alors plus en mesure d'assurer une sécurité face à un attaquant utilisant ce type d'ordinateur.

Une solution consiste à identifier de nouveaux problèmes mathématiques résistant à l'ordinateur quantique pour bâtir de nouveaux algorithmes offrant les services de la cryptographie asymétrique.

De nombreux pays estiment que le développement de ces algorithmes « post-quantique » permettra de faire face à la menace que représentent les ordinateurs quantiques pour la cryptographie actuelle. D'autres nations, comme la Chine et la Russie, semblent faire le pari de se tourner vers la cryptographie quantique pour sécuriser leurs échanges. C'est le principe d'échange quantique de clé (*quantum key distribution* - QKD). L'échange quantique garantit la possibilité de détecter toute tentative d'interception, mais il impose des contraintes très lourdes sur l'infrastructure de distribution.

La plupart des protocoles de communication sécurisés déployés sur internet ou sur des réseaux privés reposent actuellement sur des mécanismes asymétriques de négociation de clé. La menace dépasse donc largement les enjeux de défense et de sécurité. Elle doit être anticipée compte tenu de la stratégie de certaines nations à stocker dès à présent pour déchiffrer plus tard (stratégie "*harvest now, decrypt later*").

Au-delà des projets, un plan quantique ministériel

L'action du ministère des Armées et des Anciens combattants se veut résolument coordonnée avec la stratégie nationale quantique. Au-delà d'un soutien financier, l'accélération des efforts dans les technologies quantiques nécessite de créer une communauté structurée évitant un éparpillement des efforts, de faire émerger des coopérations internationales « défense » dans le domaine quantique, et d'anticiper les opportunités et menaces.

Ces objectifs ont été traduits dans un plan quantique ministériel, annoncé par le ministre des Armées en juin 2025, et qui s'articule autour de trois piliers.

- Le premier concerne le renforcement des efforts dans les technologies quantiques déjà consentis dans la loi de programmation militaire (LPM) et la stratégie nationale quantique, pour accélérer et diversifier la montée en maturité des technologies, dans une perspective d'intégration opérationnelle au cours de la prochaine décennie, dans le domaine des capteurs, du calcul et des communications. Ce pilier est intégré dans les travaux d'actualisation de la LPM.
- Le deuxième pilier sera constitué du Laboratoire Quantique Défense, créé fin 2025 et rattaché à l'AID. Ce laboratoire éclairera par la pratique l'ensemble des applications d'intérêt défense, non seulement dans le domaine du calcul – y compris les environnements applicatifs –, mais aussi des capteurs et des communications. Le laboratoire s'appuiera sur les organismes de recherche et les entreprises actives dans le domaine, il aidera à l'identification des cas d'usage et des technologies prometteuses. Il participera au développement de coopérations internationales. Enfin, il contribuera aux expertises et essais ainsi qu'à l'acculturation et au développement des compétences au sein du ministère.
- Le dernier pilier consiste en la création d'une communauté quantique de défense, le « Campus Quantique de Défense », qui rassemblera les acteurs du ministère, des chercheurs, start-ups, industriels et investisseurs, pour fédérer les réflexions. Les événements organisés par le campus investiront différents sites en fonction des communautés visées, de l'effet recherché et des éventuels besoins de confidentialité. Ce campus verra le jour au premier semestre 2026.

Le quantique englobe une constellation de technologies aux potentiels disruptifs. Le plan ministériel a vocation à développer de nouvelles capacités innovantes, et de les éprouver sur le terrain.

Technologies quantiques pour les applications aéronautique, spatial et défense : Rapport du GIFAS

Par Sylvain SCHWARTZ
ONERA

Mathias VAN DEN BOSSCHE
Thales Alenia Space

& Frédéric BARBARESCO
THALES Land & Air Systems

Il convient de distinguer, d'un côté, les capteurs et les communications pour lesquels les industriels du GIFAS sont à la fois constructeurs et utilisateurs potentiels, et, de l'autre, le calcul quantique, pour lequel le matériel est majoritairement développé par des entreprises hors GIFAS, le principal apport des industriels du GIFAS devant se situer au niveau du développement des algorithmes adaptés à ces nouvelles machines. Les échéances pour les différents piliers sont également diverses. S'il est difficile de prédire l'avenir, et ce d'autant plus pour un secteur qui évolue très rapidement, il semble toutefois clair que les capteurs quantiques sont les plus susceptibles d'apporter à court terme (moins de cinq ans) des avantages concrets pour un certain nombre d'applications ASD. Le déploiement d'un réseau de communications quantiques semble envisageable à moyen terme (cinq ans ou plus) tandis que les applications du calcul quantique, plus incertaines, sont plutôt espérées à moyen ou long terme.

Introduction

Le rapport du GIFAS a souligné l'importance, dans le contexte actuel, de renforcer les investissements sur les capteurs et les communications quantiques, tout en développant la recherche de nouveaux algorithmes quantiques pour les applications ASD. En termes de technologies habilitantes, on note un fort recouvrement entre les différents piliers, qui fait qu'un investissement initialement dédié aux capteurs quantiques (par exemple le développement d'un détecteur de photons à bas bruit) pourrait ensuite bénéficier aux communications quantiques puis au calcul quantique (calcul quantique photonique, ici). À cet égard, nous avons identifié un certain nombre de technologies habilitantes clés qu'il conviendrait de soutenir, afin de pérenniser la filière et de garantir un accès aux composants dans les années qui viennent. On pense, notamment, à la photonique intégrée, aux cryostats 4K transportables ou à certains types de lasers et de composants optiques. Il nous semble également important de continuer à soutenir le développement d'une offre de formation à la physique quantique générale pour les futurs ingénieurs et techniciens des métiers du quantique, aussi bien au niveau universitaire qu'en ce qui concerne la formation continue.

Recommandations concernant les capteurs quantiques

Classes de capteurs quantiques

Nous avons identifié quatre classes de capteurs quantiques et d'applications associées d'intérêt majeur à court terme (moins de cinq ans) pour le GIFAS :

- Les technologies à base d'atomes froids peuvent apporter des références gravimétriques et gradiométriques (permettant, notamment, l'établissement de cartes de gravité) ainsi que la réalisation de centrales inertielles absolues. Ces dernières pourraient contribuer à une navigation purement inertielle, précise et résiliente.
- Le partage d'un temps précis est nécessaire pour de nombreuses fonctions des systèmes d'armes, en particulier les communications. Les systèmes de navigation par satellite fournissent cette base de temps, mais leur disponibilité en environnement de guerre électronique ne peut être garantie. L'apparition d'horloges atomiques d'un SWaP-C1 extrêmement contenu permet d'envisager de nouvelles architectures de partage du temps pour les systèmes d'armes avec des capteurs nombreux et

répartis, nécessitant moins de resynchronisation, participant à l'accroissement de la résilience vis-à-vis du brouillage des GNSS.

- Les solutions issues des technologies quantiques pour obtenir des capteurs magnétiques très performants sont nombreuses : centres NV, SQUIDS, cellules à gaz. Leur maturité est élevée, leurs applications au domaine de la défense peuvent être testées rapidement. Les avantages de la navigation magnétique ne font pas l'objet d'un consensus, mais la maîtrise de la signature de bâtiments, voire la détection magnétique de cibles maritimes ou la surveillance de l'environnement spatial sont à considérer.
- Les capteurs quantiques permettent d'envisager des améliorations majeures en guerre électronique (SIGnal INTelligence). Les technologies envisagées sont les cellules à gaz (atomes de Rydberg), les centres NV, les cristaux dopés aux ions terre-rare et les antennes supraconductrices à interférence quantique (SQUID / SQIF). L'appréciation des performances d'un capteur RF est complexe : la bande passante d'accord, la bande passante instantanée, la dynamique, la sensibilité et le bruit sont les facteurs essentiels, en plus du SWaP-C. Les capteurs quantiques actuels présentent déjà des niveaux de performance exceptionnels pour certaines de ces caractéristiques. Des travaux sont nécessaires pour couvrir l'ensemble des spécifications.

Les recommandations concernant les capteurs quantiques sont les suivantes :

R1 - Encourager, au niveau national, le soutien au développement des capteurs quantiques, notamment, dans les domaines suivants d'intérêt majeur pour les applications ASD : centrales inertielles et horloges compactes (atomes froids), magnétomètres capteurs électromagnétiques large bande (SQIF, NV, Rydberg).

R2 - Inciter les membres du GIFAS à collaborer activement entre eux et avec les autres parties prenantes à l'élaboration de nouveaux cas d'usage pour tirer le meilleur parti des propriétés uniques des capteurs quantiques.

R3 - Explorer dès maintenant avec les parties prenantes l'intégration des capteurs quantiques dans des futurs systèmes afin de maximiser la performance système atteignable et d'accélérer cette intégration.

Recommandations concernant les communications quantiques

Les communications quantiques exploitent les propriétés de la physique quantique pour transférer de l'information quantique, utilisée par les ordinateurs et capteurs quantiques. Ce transfert permet la mise en réseau de ces dispositifs, améliorant leurs performances et l'accès aux utilisateurs. De plus, ces communications sont intrinsèquement sécurisées. Deux catégories principales existent : les réseaux d'information quantique (RIQ) et les réseaux sécurisés par voie quantique (RSQ). Bien que distincts par leur maturité et leurs enjeux, ils partagent de nombreuses technologies fondamentales.

Réseaux d'information quantique

Les réseaux d'information quantique proposent d'exploiter toutes les possibilités que la physique quantique met à

disposition, c'est-à-dire transférer de l'information quantique d'un endroit à un autre. L'information quantique est ce qui décrit l'état d'un système quantique. Cette information est ce que les ordinateurs quantiques et certains capteurs quantiques vont produire et manipuler pour calculer ou mesurer. Le fonctionnement des ordinateurs quantiques indique que leur puissance de calcul croît comme l'exponentielle du nombre de qubits qu'ils peuvent utiliser. On voit donc rapidement qu'associer de tels ordinateurs en réseau ne va pas additionner, mais bien multiplier entre elles leurs puissances de calcul. De façon similaire, mettre N capteurs quantiques dans un état cohérent va permettre d'améliorer le rapport signal à bruit non pas en $1/\sqrt{N}$ mais en $1/N$, donc bien plus rapidement. On voit donc qu'outre la résilience, dans les deux cas, la mise en réseau est un moyen d'améliorer significativement les performances de ces deux autres technologies quantiques. En outre, ces réseaux peuvent être utilisés pour générer des clés de chiffrement inconditionnelles.

Les cas d'usage sont donc : distribuer du calcul entre plusieurs ordinateurs quantiques, donner accès à des utilisateurs distants à des fermes de calcul quantique, construire des moyens de détection étendus et cohérents de haute performance, etc.

Transporter de l'information quantique nécessite un nouveau type de réseau. La ressource de communication y est *l'intrication* ; elle permet de réaliser des opérations de téléportation d'information quantique. Ceci peut se faire dans de la fibre optique déjà déployée, mais *on aura besoin de connexions par satellite* pour couvrir des distances supérieures à quelques dizaines de kilomètres, car les fibres absorbent les signaux quantiques que l'on ne peut pas amplifier.

Réseaux sécurisés par voie quantique

Une utilisation plus simple de la physique quantique dans les télécommunications consiste à mettre en œuvre des protocoles de négociation de séquences aléatoires à la confidentialité contrôlée, c'est-à-dire des clés de chiffrement qui ne peuvent être compromises. Les cas d'usage se limitent à la sécurisation des communications par ailleurs classiques. Les liens longue distance vont aussi nécessiter la mise en œuvre de nœuds de réseau en orbite. Au sol, des produits commerciaux – non européens – que l'on branche sur des fibres optiques sont disponibles. Il faut aussi mentionner qu'en absence de RIQ, les communications sont sécurisées seulement sur le lien qui relie deux nœuds de réseau, et non de bout en bout. Mais lorsque qu'un RIQ sera disponible, on saura établir des clés de bout en bout : la sécurité deviendra un sous-produit de RIQ.

Les enjeux pour l'aéronautique et le spatial

- Les acteurs de l'aéronautique et du spatial *utiliseront* les ordinateurs quantiques, mais contribueront à la *construction* des infrastructures réseau. C'est donc une priorité de la filière.
- Les usages tant civils que militaires des ordinateurs et capteurs quantiques seront étendus (en performance, en résilience) par la disponibilité des RIQ. Les enjeux sont duaux, et il faut s'attendre à une compétition économique dure sur ces objets, et ceux qui auront le plus progressé grâce à de l'aide publique sur le long terme domineront le marché – pour la souveraineté et l'exportation.

- Les acteurs chinois ont pris une avance considérable dans le domaine (démonstration en orbite en 2017) ; un RSQ terrestre étendu est en place. Huawei produit des équipements RSQ. Les progrès sur les ordinateurs quantiques chinois alimentent la feuille de route de leurs réseaux.
- Le gouvernement US a bien compris qu'autant les ordinateurs quantiques seraient des objets qui se vendraient à l'unité et donc pouvaient être confiés à des acteurs privés, autant les réseaux de communication quantique sont une infrastructure d'équipement du pays et ne trouveraient pas le même soutien. Le Department of Energy a une feuille de route ambitieuse sur le sujet, de nature à dépasser rapidement les européens.

Les recommandations concernant les communications quantiques sont les suivantes :

R1 - Pour les réseaux d'information quantique, soutenir le développement d'un système de démonstration de la distribution de la ressource d'intrication depuis l'orbite basse vers des stations au sol dans le cadre du programme national QINSAT. Dans ce cadre, soutenir en particulier des démonstrateurs opérationnels de source de photons intriqués spatialisée, terminaux récepteurs d'intrication, systèmes de synchronisation et de datation ultra précis, système d'optique adaptative sol, légère et bas coût, système de contrôle de la polarisation des photons, mémoires / *buffers* quantiques.

R2 - Aider les industriels français à se positionner dans les projets de clés quantiques européens (EuroQCI) en contribuant aux actions européennes sur le sujet lorsqu'elles demandent une coparticipation des États membres, en participant aux comités de standardisation de ces systèmes qui ont vocation à être multi vendeurs et devront être interopérables, et en promouvant l'intérêt du sujet auprès de l'ANSSI, avec laquelle nous partageons le besoin de sécurité de bout en bout. Dans ce but, on s'attachera, notamment, au développement des briques technologiques suivantes : terminaux de clés quantiques, sources de photons uniques si possibles non cryogéniques, générateurs quantiques de nombres aléatoires, systèmes de gestion de clés.

R3 - Pour la préparation de la phase 2 de QINSAT, qui visera à assembler plusieurs liens réseaux à la fin de la décennie, soutenir les acteurs qui développent les mémoires quantiques à long temps de cohérence et facilement adressables, les routeurs d'intrication qui utiliseront ces mémoires quantiques et les dispositifs de distillation d'intrication pour améliorer les performances des liens individuels en soutenant les acteurs plus amont qui travaillent sur ces sujets (start-ups, laboratoires publics ou privés, intégrateurs système) par du développement d'équipements ou de démonstrateurs sur table.

Recommandations sur le calcul quantique

Feuille de route vers le calculateur quantique tolérant aux fautes (FTQC, fault-tolerant quantum computer)

Face aux incertitudes, un certain nombre d'étapes clés peuvent être mises en place pour suivre et développer la feuille de route de l'informatique quantique, selon la liste suivante :

- La disponibilité du premier qubit logique, suivie de celle de 50 qubits logiques (équivalant à la puissance d'un supercalculateur parmi les 500 plus performants). La disponibilité de 60 qubits représente un bond en avant en termes de puissance de calcul, d'un facteur 1000 par rapport à 50 qubits ($2^{60} = 2^{10} \times 2^{50}$).
- La mise en place d'un système quantique permettant de démontrer la suprématie quantique consiste à résoudre un problème simple et utile, aujourd'hui inaccessible au calcul classique. Les technologies étant différentes, il convient de distinguer l'approche *analogique* de l'approche *numérique* (à base de portes logiques). La première permettrait d'obtenir un avantage quantique plus rapidement, mais elle demeure moins universelle.
- La mise à disposition d'un OQ permettant de démontrer la suprématie énergétique à puissance égale avec une calculatrice classique.
- Le développement commercial d'un OQ « utile » à base de portes: capable de résoudre des problèmes d'intérêt pratique sur un nombre très limité d'applications.
- Le développement d'un OQ affichant 100 qubits logiques et une fidélité plus élevée (50 qubits logiques étant considérés comme la puissance actuelle d'un grand système HPC)
- Développement d'un OQ affichant plus de 1000 qubits logiques.
- Le développement d'un couplage OQ tolérant aux pannes entre plusieurs OQ.

Les QPU (*quantum processing unit*) et leurs benchmarks

Afin de pouvoir suivre le développement des performances des calculateurs quantiques, il est nécessaire de disposer de *benchmarks* caractérisant les performances des QPU :

- Nous devons continuer à soutenir les start-ups qui produisent des ordinateurs, des interconnexions d'ordinateurs quantiques multimodaux (par exemple la technologie de *Welinq*), et les technologies habilitantes, et tout ce qui est lié (matériel et logiciel) aux codes de correction d'erreurs : code de surface, codes LDPC, codes bosoniques (Cat Qubit, GKP Qubit, etc.) avec rétroaction quantique.
- Concernant les initiatives de *benchmarking* pour les ordinateurs quantiques, des actions existent à l'étranger (QED-C, DARPA/Raytheon, etc.), et le projet BACQ répond à ce besoin en France. Il semble pertinent d'étendre cette initiative de *benchmarking* à l'échelle européenne (avec l'Université de technologie de Delft/TNO aux Pays-Bas, l'Institut Fraunhofer IKS en Allemagne, etc.) afin de promouvoir un *benchmark* de référence européen.
- Le projet BACQ vise à fournir un banc d'essai pour le LNE. Il existe un intérêt pour étendre BACQ à un banc d'essai orienté vers des applications de segments de marché verticaux (par exemple : calcul optimisé de la forme des avions, vol en essaim, etc.)

conformément aux besoins du GIFAS, en coordination avec le LNE et Thales.

- Il existe un ensemble d'outils / environnements de programmation (Microsoft #Q, Rigetti Forest, IBM QX [OpenQASM], QISKIT, SiIQ , CIRQ, Quipper , QFC, QPL, Atos QLM), un effort pour éviter d'être dispersé en factorisant les développements autour d'outils de confiance *open source* communs serait profitable (voir ce qui a été fait pour l'IA avec Scikit-learn).

Les recommandations concernant les calculateurs quantiques sont les suivantes :

R1 : Encourager le développement de la recherche sur les algorithmes quantiques et les cas d'utilisation associés dans le domaine de la détection automatique (par exemple, en soutenant des projets impliquant des fabricants de systèmes d'analyse de données quantiques et des acteurs académiques du domaine). Cette action, cohérente avec les actions en cours, notamment le projet PROQCIMA récemment lancé par la DGA du ministère français de la Défense, pourra s'appuyer sur le projet BACQ existant.

R2 : Faciliter l'accès des fabricants de GIFAS aux ordinateurs quantiques (OQ) déjà disponibles avec le niveau de sécurité approprié : à court terme en subventionnant les heures de calcul pour pouvoir tester des algorithmes élémentaires, et à long terme en soutenant la maturation technologique d'un réseau d'information quantique pour interconnecter les ordinateurs quantiques et également permettre l'exécution sécurisée d'algorithmes sensibles ou confidentiels *via* le *cloud*.

R3 : Encourager les fabricants du GIFAS à adopter et à développer les *benchmarks* proposés par le projet BACQ et à publier les valeurs mesurées afin de partager un outil d'évaluation commun pour suivre quantitativement les progrès des ordinateurs quantiques disponibles.

R4 : Encourager le développement de piles logicielles fiables (compilateur, bibliothèque, outils de programmation / génie logiciel) pour passer des langages de haut niveau aux circuits quantiques. Dans ce contexte, nous veillerons à promouvoir les liens entre le calcul haute performance classique et l'informatique quantique, car il est clair que cette dernière trouvera des applications complémentaires aux moyens de calcul classiques existants.

R5 : Consolider / garantir que nous sommes en mesure d'établir un secteur industriel européen afin d'assurer à terme l'accès aux ordinateurs quantiques et un modèle économique viable pour les fabricants français d'unités quantiques.

Conclusion

Ce rapport a été rédigé à la demande de la commission R&D du GIFAS par un groupe de travail dédié aux technologies quantiques et constitué de représentants des principaux industriels du domaine, sous la coordination de l'ONERA. Fin 2022, il s'est vu confier par la commission R&D la mission suivante, dont le présent rapport relate les principales conclusions :

- Définir les apports majeurs pour la filière des technologies quantiques, les applications ciblées et les horizons calendaires associés ainsi que d'éventuelles recommandations pour la filière et pour le coordinateur

national pour la stratégie quantique. Le sous-groupe Technologies quantiques, animé par l'ONERA et rassemblant une douzaine de sociétés du GIFAS, sera sollicité pour mener ces réflexions en coordination avec la Commission R&D.

Ce rapport GIFAS est accessible en ligne :

https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/Documents/Rapport_Technologies_Quantiques-GIFAS_mai_2024.pdf

Il a été conçu pour permettre plusieurs niveaux de lecture. Les lecteurs les plus pressés pourront se limiter au résumé général et à la liste consolidée des recommandations qui suivent. Un deuxième niveau de lecture possible est de ne considérer, dans chacune des quatre parties principales du rapport (capteurs quantiques, communications quantiques, calcul quantique et technologies habilitantes), que le résumé initial qui figure au début de chaque partie et / ou la liste plus détaillée des recommandations qui figure à la fin. Enfin, le lecteur disposant de plus de temps trouvera dans chacune des parties un descriptif détaillé des technologies et des cas d'usage que nous avons identifiés pour les applications intéressantes le GIFAS.

Initiatives de l'OTAN dans les technologies quantiques

Par Olivier PERNAUDET

Champion pour l'intelligence artificielle et conseiller spécial auprès du Commandant suprême allié pour la transformation (SACT), commandement allié Transformation de l'OTAN à Norfolk

Et Jean-Marc PUEL

Senior analyste pour les technologies émergentes et disruptives (EDT) de l'OTAN (Quantique, IA, biotechnologie, spatial) au quartier général de l'OTAN, SACT Norfolk, Virginie, États-Unis

L'OTAN a adopté sa première stratégie globale dédiée aux technologies quantiques en 2023. Elle vise à accélérer le développement et l'adoption des technologies quantiques afin de préserver l'avantage technologique. C'est dans ce contexte que le Commandement allié pour la Transformation (ACT) de l'OTAN conduit des campagnes d'expérimentation en testant des solutions résistantes aux menaces quantiques dans des scénarios opérationnels réalistes.

En 2025, les travaux menés ont ainsi conduit à évaluer distribution quantique des clés (QKD), cryptographie post-quantique (PQC), crypto-agilité, analyse des fuites RF et détection quantique. Si ces expérimentations ont confirmé l'importance d'architectures crypto-agiles et la maturité de la PQC pour une adoption précoce sur les systèmes stratégiques et tactiques de l'OTAN, elles ne sont qu'une première étape pour la transition vers des infrastructures résilientes face aux menaces quantiques.



Contexte de l'OTAN pour les technologies quantiques

L'OTAN progresse vers un avenir prêt pour l'ère quantique

L'OTAN accélère ses efforts afin de préparer ses systèmes militaires et de communication à l'émergence des technologies quantiques. À mesure que l'informatique quantique et les technologies associées progressent, elles promettent des bénéfices importants dans des domaines tels que la cryptographie, la détection, les communications, la navigation et l'optimisation, tout en introduisant de nouveaux risques en matière de cybersécurité. En réponse, l'OTAN a adopté sa première stratégie globale dédiée aux technologies quantiques, approuvée par les ministres des Affaires étrangères en novembre 2023, visant à garantir que l'Alliance soit « prête pour l'ère quantique ».

Initiatives du HQ SACT

Au cœur de cet effort se trouve le travail mené par le Commandement allié de transformation de l'OTAN (ACT) à travers l'**Innovation Continuum 2025**, une campagne d'expérimentation conçue pour tester des

solutions résistantes aux menaces quantiques dans des scénarios opérationnels réalistes. L'initiative s'est concentrée sur le renforcement de la sécurité des réseaux de communications stratégiques ainsi que des plateformes tactiques opérant dans des environnements complexes et contestés.

La campagne a ainsi réuni un vaste écosystème de partenaires, incluant de nombreuses entreprises, un laboratoire national et des partenaires académiques. Les technologies testées allaient du matériel de **distribution quantique de clés (QKD)** et des logiciels de **cryptographie post-quantique (PQC)** à des plateformes de crypto-agilité, des outils d'analyse des fuites radiofréquences et des systèmes de détection quantique.

Contenu de la campagne d'expérimentation 2025

Les expérimentations ont exploré plusieurs approches destinées à préparer les systèmes militaires aux enjeux de sécurité et d'opérations induits par l'émergence des capacités de calcul quantique, dans l'ensemble de leurs domaines d'application. Les travaux ont ainsi porté sur la résilience cryptographique, la sécurisation des communications, la confiance dans les chaînes

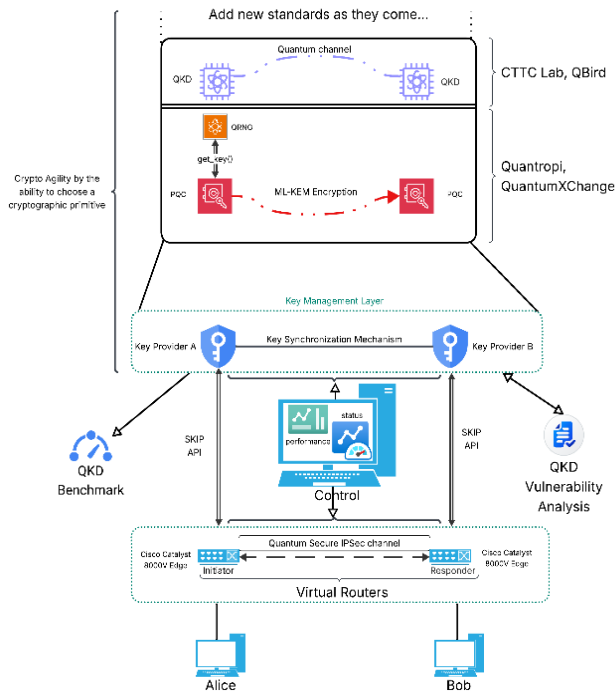


Figure 1: Expérimentation Architecture Communications Quantique.

d'approvisionnement logicielles, l'authentification des systèmes sans pilote, les technologies de communication quantique ainsi que l'emploi de capteurs quantiques pour la navigation.

Un axe structurant de la campagne a concerné la **crypto-agilité**, entendue comme la capacité des réseaux à adapter rapidement leurs mécanismes cryptographiques en fonction de l'évolution des menaces. Les expérimentations ont évalué des architectures hybrides associant cryptographie post-quantique (PQC) et distribution quantique de clés (QKD) à des schémas de chiffrement symétrique de type AES-256. Les essais ont été conduits sur des liaisons sécurisées longue distance entre états-majors, en mobilisant plusieurs fournisseurs de clés, incluant des systèmes QKD physiques, des simulations numériques de QKD et des générateurs quantiques de nombres aléatoires. Les résultats ont mis en évidence l'intérêt d'architectures modulaires capables de basculer dynamiquement entre différentes sources de clés et de maintenir la distribution sécurisée de clés y compris vers des nœuds ne disposant pas d'équipements QKD. La résilience aux environnements tactiques caractérisés par des connexions intermittentes a également été évaluée avec la crypto-agilité dans des **réseaux de registres distribués (blockchain)**. L'architecture expérimentée reposait sur des nœuds coordonnés par une « autorité d'agilité » chargée de mettre à jour en temps réel les politiques cryptographiques. Le système a démontré sa capacité à migrer d'algorithmes classiques vers des algorithmes post-quantiques pour les certificats, les signatures de transactions et l'échange de clés, tout en préservant l'intégrité et le consensus du registre distribué.

La question de la confiance dans les logiciels a été abordée à travers l'expérimentation dite **quantum-safe software supply chain**, visant à garantir l'authenticité des logiciels déployés sur des plateformes militaires pendant la transition vers la cryptographie post-quantique, malgré des contraintes opérationnelles telles qu'une puissance de calcul limitée, une bande passante restreinte ou l'hétérogénéité des flottes. La solution démontrée

reposait sur l'utilisation de certificats d'équipement post-quantiques délivrés par les fabricants, sur la signature de code fondée sur des algorithmes PQC, sur la distribution sécurisée des logiciels *via* des protocoles TLS résistants au quantique et sur une vérification locale avant installation. Les mécanismes de démarrage sécurisés imposaient la validation de signatures post-quantiques, garantissant que seuls des logiciels authentifiés puissent être exécutés sur les systèmes déployés.

Les communications opérationnelles ont également fait l'objet d'essais, notamment à travers la démonstration d'une capacité de **diffusion vidéo sécurisée résistante aux menaces quantiques**, conçue pour des plateformes sans pilote à contraintes de taille, de masse et de consommation (*low-SWaP*) évoluant dans des environnements radiofréquences contestés. Un drone maritime a ainsi transmis une vidéo haute définition compressée *via* des radios tactiques en utilisant un chiffrement symétrique associé à un renouvellement dynamique des clés fondé sur la cryptographie post-quantique. Le système a maintenu une latence compatible avec des opérations de pilotage en vue directe, tout en assurant que seuls les utilisateurs autorisés puissent accéder au flux vidéo.

La campagne a également exploré les problématiques d'identification sur le champ de bataille au moyen d'un **système IFF (identification friend or foe)** pour drones sécurisé contre les menaces quantiques. Le prototype, fondé sur des algorithmes post-quantiques tels que ML-DSA et ML-KEM, mettait en œuvre un protocole de défi-réponse entre les modules embarqués et les stations au sol. L'emploi d'antennes directionnelles et de données de positionnement a permis d'obtenir une authentification fiable, y compris en présence d'interférences.



Figure 2: QKD sur Drone.

Plusieurs expérimentations ont porté sur les **technologies de communication quantique** elles-mêmes. Une démonstration a, notamment, testé la distribution quantique de clés en espace libre à partir d'un drone. Celui-ci transportait une source de photons intriqués et établissait un lien optique entre deux stations au sol *via* le protocole BBM92. Le système générait des clés de chiffrement en temps réel pour sécuriser une visioconférence en direct, avec un renouvellement des clés chaque seconde.

Au-delà, les vulnérabilités potentielles des systèmes quantiques ont également été examinées à travers une analyse par **canal auxiliaire appliquée aux détecteurs de QKD**. Les essais ont cherché à déterminer si les détecteurs de photons uniques pouvaient émettre des signaux radiofréquences involontaires susceptibles de révéler des événements de détection et d'exposer des informations sur les clés. Les résultats ont confirmé l'existence de telles fuites, et ont permis d'identifier des contre-mesures, notamment le blindage électromagnétique, la réduction des émissions parasites et la mise en place de mécanismes de détection d'anomalies.

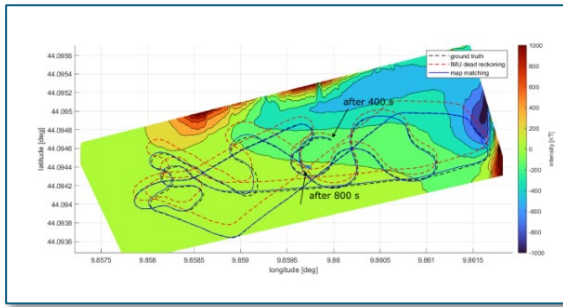


Figure 3 : Experimentation capteurs quantiques

Enfin, des travaux ont été consacrés aux **capteurs quantiques pour la navigation maritime**. Des essais menés par le Centre OTAN pour la recherche et l'expérimentation maritime (CMRE) ont démontré l'utilisation de magnétomètres quantiques pour naviguer dans des environnements où les signaux GNSS sont dégradés ou indisponibles. En cartographiant les anomalies du champ magnétique terrestre et en les comparant avec des mesures embarquées, les navires peuvent déterminer leur position sans recourir aux satellites.

Résultats de la campagne d'expérimentation 2025 du HQ SACT

L'un des enseignements principaux de la campagne d'expérimentation conduite en 2025 par le HQ SACT concerne le rôle central de la **crypto-agilité**, entendue comme la capacité des architectures de communication à basculer rapidement entre différents mécanismes cryptographiques, incluant les solutions classiques, la cryptographie post-quantique et la distribution quantique de clés. Les travaux ont montré l'intérêt d'architectures modulaires dissociant la gestion des clés des couches de transport, ce qui permet d'assurer des transitions transparentes entre plusieurs schémas de chiffrement et d'accroître la résilience des systèmes face à l'évolution des menaces.

Les expérimentations consacrées à la cryptographie post-quantique ont produit des résultats particulièrement encourageants. Elles ont confirmé que des algorithmes résistants au quantique peuvent être mis en œuvre de manière efficace sur des plateformes soumises à de fortes contraintes de taille, de masse et de consommation énergétique, telles que les drones maritimes. Des flux vidéo chiffrés ont pu être transmis avec une latence réduite *via* des radios tactiques, démontrant la faisabilité d'applications opérationnelles dans les missions de renseignement, de surveillance et de reconnaissance, tout en conservant un niveau élevé de sécurité face aux menaces futures.

Parmi les solutions testées, deux capacités ont été identifiées comme particulièrement mûres en vue d'une adoption opérationnelle à court terme dans le cadre des systèmes de l'OTAN :

- un prototype de système **IFF sécurisé contre les menaces quantiques** pour drones, capable d'assurer une authentification fiable même dans des environnements fortement perturbés ;
- une **capacité de diffusion vidéo résiliente aux menaces quantiques** pour plateformes *low-SWaP*, combinant cryptographie post-quantique, renouvellement dynamique des clés et compression vidéo

avancée, afin de maintenir une latence minimale pour les opérations de drones en vue directe.

Évaluation et perspectives

Dans leur ensemble, les expérimentations menées dans le cadre de l'Innovation Continuum 2025 ont permis d'approfondir significativement la compréhension, par l'OTAN, des enjeux liés à la sécurisation des communications face aux menaces induites par le calcul quantique, ainsi que des perspectives offertes par les technologies de détection quantique. Les résultats mettent en évidence la nécessité de concevoir des architectures **crypto-agiles**, condition indispensable pour assurer la pérennité des infrastructures de communication de l'Alliance dans un contexte d'évolution rapide des capacités de calcul. Ils confirment également le potentiel de la distribution quantique de clés, dont la maturité opérationnelle demeure encore limitée, ainsi que le niveau de préparation désormais élevé de la cryptographie post-quantique, en particulier pour une adoption précoce sur des systèmes tactiques soumis à de fortes contraintes de ressources.

Collectivement, cette campagne d'expérimentation constitue une étape importante vers la définition d'architectures résilientes adaptées à l'ère quantique, capables de soutenir aussi bien les opérations stratégiques que les opérations tactiques de l'OTAN. Si des défis techniques, industriels et d'infrastructure subsistent, les résultats obtenus montrent que des solutions concrètes permettant d'opérer de manière sécurisée dans un environnement marqué par l'émergence du calcul quantique commencent à se structurer. Dans cette perspective, les travaux engagés seront poursuivis et amplifiés en 2026, afin d'accompagner la montée en maturité des technologies, de maintenir une veille active sur l'état de l'art et de préparer l'intégration progressive de ces capacités dans les architectures opérationnelles de l'Alliance.

Référence

Synthèse de la stratégie de l'OTAN relative aux technologies quantiques

<https://www.nato.int/fr/about-us/official-texts-and-resources/official-texts/2024/01/16/summary-of-natos-quantum-technologies-strategy>

Les formations initiales, de reconversion et les recrutements ("Quantum skills")

Par Thomas ANTONI

Responsable du programme de formation en ingénierie quantique à CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

La stratégie nationale quantique a pour ambition que le secteur représente 16 000 emplois d'ici à 2030, pour lesquels il faudra former 5 000 nouveaux talents. La croissance est là : il a fallu moins de cinq ans aux start-ups pour compter plus de cent salariés. Les jeunes diplômés doivent être capables de s'insérer rapidement en entreprise et d'être suffisamment agiles pour s'adapter à des métiers qui évoluent tous les six mois et qui, parfois, n'existent pas encore. Ils ont également pour mission d'assurer l'interface entre des fondateurs ultra spécialistes et des partenaires profanes, le temps que les sciences et technologies quantiques ne s'intègrent dans l'ensemble du système éducatif pour accompagner la société dans cette nouvelle révolution industrielle.

Avec une longue tradition de recherche en physique quantique, un modèle unique d'ingénieur et de grands pôles où cohabitent universités, grandes écoles et entreprises, la France est particulièrement bien placée pour relever ce défi.

Longtemps, il a fallu compter un siècle pour qu'une théorie scientifique donne lieu à des applications, mais, dans le monde quantique, ce délai paraît se réduire. C'est ainsi le temps qui s'est écoulé entre le moment où Volta fit contracter des pattes de grenouilles avec sa pile et l'arrivée de l'ampoule et du téléphone. Au début du XX^e siècle, Planck découvrait que l'énergie de la lumière se divisait en paquets. Puisque les ondes avaient un comportement corpusculaire, de Broglie proposa, réciproquement, de décrire les particules massiques par des fonctions d'onde.

Cette première révolution quantique a déjà transformé notre quotidien : elle est à l'origine des semi-conducteurs, omniprésents dans les processeurs et mémoires de nos téléphones et ordinateurs. Sans elle, les économies d'énergie des diodes électroluminescentes ou l'internet haut débit *via* les lasers n'existeraient pas.

Des zones d'ombre ont cependant longtemps subsisté dans la compréhension des postulats originels. Il a fallu attendre les expériences d'Aspect dans les années 1980 pour obtenir la confirmation définitive d'une propriété émergente, unique à la mécanique quantique : l'intrication des états. Ce sont les promesses d'innovation liées à cette découverte qui fondent la deuxième révolution quantique.

L'intrication a été observée sur des systèmes de nature physique de plus en plus variée entre les années 1990 et 2010. Dans le même temps, les recherches se sont déplacées du test d'une loi fondamentale vers les applications. Puis, entre 2010 et 2020, les premiers

démonstrateurs technologiques sont sortis des laboratoires.

La période actuelle est au passage du prototype à l'industrialisation. C'est le temps des ingénieurs. Les besoins en emplois peuvent être divisés en cinq catégories : la recherche et développement ; le management de projets et de produits ; l'entrepreneuriat ; les métiers de la norme et de la propriété intellectuelle ; ainsi que ceux de la stratégie et de la finance. Pour chacun de ces métiers, une formation scientifique solide reste un réel avantage. Elle confère la légitimité nécessaire pour dialoguer avec les équipes techniques et les fondateurs des entreprises, souvent titulaires de doctorats. Surtout, elle apporte de la crédibilité, et rassure lorsqu'il s'agit de convaincre des investisseurs ou des décideurs publics.

Représentant 20 % des parts de marché du secteur quantique à l'échelle mondiale, la France est en avance dans la course industrielle internationale. Ce n'est pas un hasard : elle compte huit prix Nobel dans la discipline. Ils ont cultivé l'excellence de la recherche et enthousiasmé des générations d'étudiants pour les études en physique. Ces vocations ont démultiplié le potentiel de découvertes et leur conversion en entreprise. Il existe donc une tradition française de l'enseignement de la physique quantique, historiquement portée par l'École normale supérieure, et qui s'incarne dans le livre *Mécanique quantique* de Claude Cohen-Tannoudji. Il s'agit désormais de convertir une discipline fondamentale en sciences de l'ingénieur.

Si, en France, comme ailleurs dans le monde, les programmes d'enseignement en ingénierie quantique

semblent se multiplier, la réalité est plus nuancée. Il s'agit souvent de formations en physique fondamentale qui se reconvertissent en changeant de nom et en élargissant leurs débouchés, mais qui restent ancrées dans la recherche amont, et très sectorisées. Pourtant, au fur et à mesure qu'il se développe, le secteur est de moins en moins l'apanage de la physique, et nécessite une approche multidisciplinaire touchant à l'informatique, l'électronique, l'automatisme ou les réseaux.

La création de telles formations *ex nihilo* est forcément compliquée. Pour assurer l'employabilité de leurs étudiants et coïncider avec les activités de leurs laboratoires, universités et grandes écoles doivent conserver des thématiques historiques à côté des thématiques émergentes. En effet, les programmes d'enseignement s'appuient sur les domaines d'expertise des chercheurs, et les établissements ne peuvent pas, du jour au lendemain, recruter massivement afin de pourvoir un domaine en particulier. Il faut donc compter sur des reconversions thématiques dans les laboratoires, dont les équipes de recherche ne sautent le pas que lorsqu'elles entrevoient l'opportunité de financements pérennes. La montée en puissance des formations en ingénierie quantique est donc très progressive. Les écoles préfèrent, d'abord, proposer des cours optionnels pour permettre à leurs étudiants de s'ouvrir ou de se sensibiliser au domaine, plutôt que de créer des filières d'enseignement dédiées. Cette dynamique permet de lisser les effets de mode et de privilégier les temps longs nécessaires à la recherche, mais elle manque de réactivité pour s'adapter aux besoins du marché de l'emploi. En définitive, les employeurs déplorent encore le déficit de candidats formés nationalement, et doivent se tourner vers les universités étrangères.

Transitoirement, universités et écoles d'ingénieurs peuvent s'appuyer sur des « objets transverses » pour trouver des compétences à l'extérieur et proposer à leurs étudiants des cadres pour se former aux sciences et technologies quantiques. À l'échelle européenne, le programme de master en deux ans QUARMEN offre une sélection de cours consacrés aux technologies quantiques entre les Universités de la Sapienza (Rome), Porto, Paris-Saclay et Toronto. Nationalement, le programme QUAEDU a pour objectif d'accompagner la création de nouvelles activités pédagogiques et l'allocation de bourses de doctorat. Unique en son genre, la formation ARTeQ (Année de recherche en technologies quantiques) est commune à l'Université Paris-Saclay et à l'Institut polytechnique de Paris, tout en se voulant hors de tout programme universitaire ou d'école. Elle offre aux étudiants l'opportunité de se consacrer à temps plein pendant un an – six mois de cours et six mois de stage – aux enjeux de la recherche dans les technologies quantiques.

Dans cette période d'adaptation, la France tire toutefois son épingle du jeu grâce à son modèle d'ingénieur généraliste, qui combine rigueur scientifique et polyvalence technique. Ce sont des profils particulièrement pertinents dans le contexte où il s'agit de maîtriser des principes théoriques tout en étant capables d'intégrer les contraintes technologiques et d'avoir une culture multisectorielle.

En effet, l'industrie quantique nécessite un socle scientifique solide, car les technologies reposent sur une diversité inédite d'objets physiques : photons, supraconducteurs, atomes, spins, nanotubes, centres colorés du diamant, etc. Elle est fortement pluridisciplinaire, car elle couvre non pas un, mais trois champs d'application :

les ordinateurs, les capteurs et les communications. Enfin, elle nécessite de la polyvalence, car les ingénieurs ne sont pas attendus uniquement chez les fournisseurs de technologies, mais également chez leurs futurs clients, qui recrutent déjà pour développer leurs cas d'usage ou s'acculturer. Les collaborateurs doivent donc être en capacité de s'insérer dans des secteurs aussi variés que la banque, l'assurance ou la production d'énergie.

Là-dedans, le calcul quantique est un peu à part, car il est à l'interface entre le composant et le logiciel. Pendant les premières années, les jeunes pousses se sont chacune concentrées sur la maîtrise de leurs bits quantiques. C'est seulement une fois ce défi technique surmonté que s'est posée la question de trouver une utilité à ces nouveaux ordinateurs. Regroupant essentiellement des physiciens au départ, les entreprises se sont massivement tournées vers les théoriciens et les informaticiens, pour identifier les classes de problèmes auxquelles elles pourraient répondre. En effet, contrairement aux ordinateurs classiques qui reposent tous sur des technologies silicium, les processeurs quantiques peuvent être basés sur des photons, des supraconducteurs, des spins ou des nanotubes de carbone. Chacun de ces objets est interrogé différemment et conditionne le type de problèmes qu'il peut résoudre. Les profils hybrides entre physicien et informaticien sont donc particulièrement prisés par les recruteurs.

Quelle que soit la technologie à laquelle ils se destinent, les étudiants doivent être confrontés à la réalité des systèmes dans toute leur complexité, et ne pas se limiter à une appréhension théorique. Il ne suffit pas de comprendre ce qu'est un bit quantique pour faire un ordinateur. Il faut se rendre compte qu'il est soumis à des bruits et que la correction d'erreurs est indispensable. De même pour les communications et les capteurs : il faut réaliser que les sources, les détecteurs et les réseaux conditionnent le champ des possibles. Les travaux pratiques, qu'ils soient expérimentaux ou numériques, sont donc essentiels, mais nécessitent des investissements financiers et humains conséquents.

De bonnes compétences en programmation sont également attendues. Les nouveaux ingénieurs seront généralement exposés à de grandes quantités de données dans lesquelles il s'agira d'extraire l'information utile. Par ailleurs, ils devront développer des interfaces logicielles afin que les systèmes qu'ils conçoivent puissent être utilisés sans expertise technique particulière.

La plupart des écoles d'ingénieurs offrent à leurs élèves la possibilité de compléter leur formation par un master dans une université partenaire, souvent dans l'optique de préparer une thèse. Le doctorat n'est toutefois plus aussi indispensable qu'à l'époque où il fallait faire émerger les technologies. Même pour les métiers de recherche et développement, les entreprises n'hésitent plus à embaucher directement en sortie d'école. Cette modalité est appréciée par les nouvelles recrues, car elle offre la flexibilité de pouvoir changer de projet, voire de métier, là où le travail de thèse implique de se dédier à son sujet pendant trois ans. Néanmoins, elle les prive d'un diplôme qui reste la référence internationale d'expertise, et la norme chez les pionniers du secteur. Pour les personnes désireuses de travailler dans l'industrie tout en obtenant un doctorat, le dispositif CIFRE (Convention industrielle de formation par la recherche) entre une entreprise et un laboratoire public offre un cadre privilégié.

L'industrialisation du secteur quantique ouvre également de nouveaux débouchés aux techniciens supérieurs

ou aux assistants ingénieurs, notamment pour répondre aux besoins de la production en petite série ou de la maintenance en condition opérationnelle. Les programmes des bachelors universitaires de technologie (BUT) et des brevets de technicien supérieur (BTS), définis nationalement, laissent peu de degrés de liberté pour adapter les enseignements. Cependant, plusieurs mentions de BUT et de BTS préparent naturellement aux enjeux du secteur quantique : mesures physiques, génie électrique et informatique industrielle, réseaux et télécommunications, sciences et génie des matériaux, et génie photonique. Ces formations sont polyvalentes et offrent une bonne préparation aux technologies habilitantes : électronique, automatisme, traitement du signal, techniques du vide et cryogénie.

La formation en cours de carrière est un autre levier pour accompagner la transition industrielle. Elle concerne autant les experts techniques en reconversion que les dirigeants soucieux d'évaluer les risques et opportunités pour leur stratégie. Ces formations échoient traditionnellement aux écoles d'ingénieurs et aux instituts universitaires technologiques, de par leur proximité avec l'industrie.

Les entreprises ont un rôle central à jouer dans le développement de l'ensemble des formations. Leur investissement auprès des étudiants sous forme de projets, de contrats d'apprentissage, de séminaires, d'offres de stage et finalement de recrutement, sont autant de signes qui crédibilisent et encouragent l'ouverture de nouveaux cursus d'enseignement.

Il n'est donc pas surprenant que, à l'échelle française, l'enseignement et l'industrie quantiques se structurent autour de trois pôles, qui rassemblent sur un même territoire universités, grandes écoles, grands centres de recherche et entreprises, leur permettant de s'alimenter mutuellement. En première ligne, le plateau de Saclay, qui concentre 20 % de la recherche nationale, a vu naître les deux premiers fabricants d'ordinateurs quantiques : Pasqal, issue de l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS), et Quandela, issue du Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N). Thales Research and Technology, très actif dans le domaine des capteurs, y est installé de longue date, tout comme l'Orange Lab de Bagnaux, en pointe sur les communications quantiques. C'est également là que l'on trouve les principales grandes écoles d'ingénieurs : l'École polytechnique et Télécom du côté de l'Institut Polytechnique de Paris, CentraleSupélec et l'IOGS de celui de l'Université Paris-Saclay. Au centre de Paris, l'activité se concentre autour des émanations de l'ENS-PSL : Alice&Bob et C12, et de Sorbonne Université : CryptoNext et WeLinq. La région grenobloise est également extrêmement dynamique. L'Université Grenoble Alpes pilote QuantEdu, et fédère une vingtaine d'organismes de recherche dans QuantAlps, qui propose un programme doctoral très exigeant. On trouve à proximité le CEA-Leti dont est issu Quobly, cinquième champion français du calcul quantique.

Le savoir doit désormais quitter les campus de recherche et ruisseler afin que le grand public s'approprie le domaine. À cet égard, les dernières réformes des programmes nationaux ont continuellement renforcé l'enseignement de la physique quantique et de ses applications. Aujourd'hui, les futurs ingénieurs sont initiés à ces notions dès les classes préparatoires, quels que soient leurs projets professionnels, et les lycéens les plus impatients peuvent même s'y sensibiliser dès la terminale.

Attractivité de la Région Île-de-France pour les acteurs internationaux des technologies quantiques : Quels enjeux ?

Par Thomas FAUVEL

Expert Deep Tech au sein de l'agence Choose Paris Region

Portée par une concentration scientifique unique autour de Paris et de Paris-Saclay, la Région Île-de-France s'est imposée en quelques années comme un *hub* incontournable des technologies quantiques. Recherche de rang mondial, infrastructures de calcul et de communication de pointe, dispositifs innovants comme le Pack Quantique et le DIM QuanTiP : autant d'atouts qui ont attiré une dizaine d'acteurs internationaux tout en nourrissant une compétition intense pour les talents avec les champions locaux. Dans un paysage européen où Delft, la Bavière et Grenoble jouent aussi un rôle de premier plan, l'Île-de-France doit conjuguer *leadership*, coopérations et exigences de souveraineté pour rester au cœur de la seconde révolution quantique.

La seconde révolution quantique est devenue un enjeu de compétitivité et de souveraineté. Dans cette course mondiale, la Région Île-de-France s'est imposée en moins d'une décennie comme un *hub* de référence, capable à la fois de soutenir des champions locaux et d'attirer des acteurs internationaux de premier plan. Cette attractivité n'est pas le fruit du hasard : elle combine densité scientifique, stratégie économique assumée et dispositifs d'incitation originaux visant à structurer des partenariats entre laboratoires, start-ups et grands groupes.

Sept ans d'attractivité : une vitrine

européenne pour les acteurs internationaux

Depuis 2019, l'Île-de-France a accueilli une série d'implantations emblématiques dans les technologies quantiques, en particulier sur les maillons logiciels et applicatifs qui viennent compléter la base matérielle déjà très solide. Des sociétés comme QC Ware (États-Unis), Multiverse Computing (Espagne), KETS Quantum Security et PQShield (Royaume-Uni), IQM (Finlande), Quantinuum (Royaume-Uni / États-Unis), ParityQC (Autriche) ou encore Qruise (Allemagne) ont choisi d'ouvrir un bureau ou une filiale en région parisienne pour se rapprocher de ses laboratoires, de ses champions industriels et de ses marchés utilisateurs.

Certaines de ces entreprises se positionnent comme des briques logicielles stratégiques de la pile quantique : optimisation, calibration de qubits, machine learning quantique ou post quantique. Leur installation en Île-de-France répond à un triple objectif : accéder aux talents, à un marché européen important, et, enfin, bénéficier d'un écosystème où coexistent déjà les fabricants d'ordinateurs quantiques comme Pasqal, Quandela, Alice & Bob, C12, ou encore Weling.

En effet, cette dynamique d'implantation d'entreprises internationales vient compléter un tissu local déjà riche, au point que la France représentait environ 20 % des ventes mondiales d'ordinateurs quantiques en 2025.

Au-delà des chiffres, le message envoyé est clair : l'Île-de-France n'est pas seulement un terrain d'expérimentation scientifique, mais un lieu où les acteurs internationaux peuvent co-concevoir des cas d'usage avec de grands comptes – de l'énergie à la finance, en passant par la mobilité ou la défense – et tester des modèles économiques dans un environnement partenarial bien outillé.

Pourquoi la Région Île-de-France est-elle leader ?

Le premier facteur d'attractivité est la concentration exceptionnelle de recherche. Autour du réseau DIM QuanTiP (Quantum Technologies in Paris Region), labellisé Domaine de recherche et d'innovation majeur pour 2022-2026, la région fédère 42 laboratoires universitaires, 153 équipes, plus de 1 200 chercheurs et près de 380 doctorants travaillant sur le quantique.

Cette masse critique se structure autour de deux pôles principaux : le cœur parisien, animé, notamment, par le Paris Centre for Quantum Technologies (PCQT), et le plateau de Paris-Saclay, reconnu par le magazine *MIT Technology Review* comme l'un des huit *clusters* d'innovation les plus puissants au monde. C'est sur ce plateau que Albert Fert et Alain Aspect ont respectivement illustré la première et la seconde révolution quantique, et que sont nées des entreprises comme Pasqal et Quandela.

L'Île-de-France bénéficie de retombées entrepreneuriales exceptionnelles avec la présence de quatre plateformes technologiques de calcul quantique en développement simultané dans un même écosystème,



Le plateau de Saclay, berceau de nombreuses innovations dans les technologies quantiques (© EPA Paris-Saclay).

incluant des approches supraconductrices, photoniques, à atomes neutres, ou à spins. Cette densité et cette diversité de technologies constituent un cas unique au monde.

La Région souhaite désormais accélérer l'ouverture internationale de cet écosystème afin de :

- renforcer le continuum matériel logiciel, en attirant des éditeurs, intégrateurs et spécialistes du *quantum software* ;
- encourager la venue d'acteurs complémentaires sur les couches *middleware*, orchestration, *benchmarking* et algorithmique appliquée ;
- aider les industriels et laboratoires à tirer pleinement parti des plateformes matérielles locales.

L'ambition est claire : faire de l'Île-de-France un écosystème complet, du *hardware* au *software*, capable d'intégrer des acteurs mondiaux pour accélérer l'adoption du quantique dans les usages industriels.

À cette base académique s'ajoute une **infrastructure de calcul et de communication unique** :

- le Très Grand Centre de Calcul du CEA à Bruyères-le-Châtel, où le supercalculateur Joliot-Curie est désormais hybridé avec un processeur de Pasqal ;
- des salles blanches et plateformes technologiques (C2N, LNE, iXCampus, etc.) indispensables pour la cryogénie, la photonique ou l'ultravide ;
- le réseau de communications quantiques Paris Region QCI entre Saclay, Châtillon et Paris, pierre angulaire des infrastructures EuroQCI.

En outre, la Région bénéficie d'une articulation forte avec la stratégie nationale : le plan quantique français de 1,8 milliard d'euros sur cinq ans, lancé en 2021, finance

à la fois la recherche fondamentale (PEPR quantique), la plateforme de calcul hybride HQI et la montée en puissance des compétences. L'Île-de-France concentre une part majoritaire de ces efforts, du fait de la présence conjointe de GENCI, du CEA, du CNRS, de l'Inria ou encore de grands groupes comme Thales, Orange, ou EDF.

Enfin, la Région s'affirme comme la première place financière d'Europe, ayant enregistré en 2025 les plus importants montants levés en *deep tech* : 3 Mds €, devant Londres (2,2 Mds €). Cette dynamique confirme sa capacité à offrir aux entreprises les ressources nécessaires pour prendre des risques et réaliser des avancées majeures.

Talents : Une ressource convoitée et un terrain de compétition

Pour les entreprises internationales, la question de l'implantation se résume souvent à une question de talents. Sur ce plan, la Région dispose d'atouts rares :

- une offre de formation très complète en physique quantique, photonique, informatique quantique et cryptographie (masters et doctorats à l'Université Paris-Saclay, IP Paris, Sorbonne Université, Université PSL...);
- des programmes dédiés comme Quantum Paris-Saclay et Quantix, des écoles d'été internationales et des parcours d'"*executive education*" (projet EduQuantum) destinés aux cadres et dirigeants qui doivent comprendre les enjeux du quantique ;
- les chiffres parlent : le seul DIM QuanTiP agrège plus de **1 200 chercheurs** et **380 doctorants**, auxquels s'ajoutent des centaines d'ingénieurs R&D dans les grands groupes et start-ups franciliens, une part significative de ces talents étant internationale.

Cette abondance est toutefois source de tension. Les start-ups locales – Pasqal, Quandela, Alice & Bob, C12, Welling, Qubit Pharmaceuticals – doivent déjà composer avec une pénurie relative de profils seniors. L'arrivée de nouveaux acteurs internationaux qui proposent des *packages* attractifs renforce la compétition pour les meilleurs profils, en particulier sur les postes d'ingénierie quantique, d'algorithmique et de cryogénie avancée.

L'enjeu pour la Région n'est donc pas seulement d'attirer des talents, mais de synchroniser l'implantation des acteurs étrangers avec la montée en puissance des dispositifs de formation, pour éviter un assèchement de la ressource au détriment des champions locaux.

Le rôle décisif de l'incitation publique : Pack Quantique et DIM QuantIP

L'un des traits les plus originaux de la stratégie francilienne est son dispositif d'incitation ciblé, conçu pour faire travailler ensemble start-ups, grands groupes et laboratoires.

Lancé en 2020, le **Pack Quantique (PAQ)** est un programme régional doté initialement de 1,5 M€ sur trois ans, géré en partenariat avec GENCI et le Lab Quantique. Il finance des projets de 24 mois, couvrant jusqu'à 45 % des coûts pour la start-up, avec un plafond de l'ordre de 500 000 € par projet. L'objectif est clair : amener rapidement des technologies quantiques à maturité sur des cas d'usage concrets, en s'appuyant sur les capacités de calcul intensif existantes.

Treize projets ont déjà été soutenus pour environ 8M€, impliquant douze start-ups et une dizaine de grands comptes. Parmi ces projets, on peut citer :

- un projet associant la filiale française de QC Ware et TotalEnergies sur l'optimisation énergétique multi-sources ;
- des collaborations entre Pasqal, Qubit Pharmaceuticals et EDF autour de la découverte de médicaments et de la gestion intelligente de flottes de véhicules électriques ;
- des expérimentations menées avec Multiverse Computing et IQM pour appliquer le *machine learning* quantique à la détection de cybermenaces dans le secteur de l'assurance.

Pour les acteurs internationaux, le PAQ joue souvent un rôle d'accélérateur d'intégration : il finance des preuves de concept avec des clients finaux, donne accès à l'écosystème HPC et crédibilise l'implantation locale, tout en reposant sur un principe simple : « Créez des emplois et collaborez avec l'écosystème francilien, nous cofinçons vos projets ».

À cela s'ajoute le pôle de compétitivité Systematic Paris Region, *via* ses *hubs* **Optics & Photonics** et **Advanced Engineering & Computing**, qui joue un rôle d'intégrateur essentiel pour accélérer les collaborations entre chercheurs académiques, start-ups *deep tech*, grands groupes industriels, et laboratoires technologiques.

Son positionnement à l'intersection des technologies optiques, photoniques, microélectroniques, logicielles et systèmes complexes en fait un catalyseur naturel des projets liés aux technologies quantiques.

Systematic contribue, notamment, à structurer les chaînes de valeur régionale, fédérer les compétences autour de feuilles de route technologiques, créer les

conditions favorables à l'émergence de projets collaboratifs de R&D, et attirer des partenaires européens et internationaux.

En parallèle, le DIM QuantIP apporte la brique amont : 2,5 M€ pour soutenir les projets de recherche, financer des équipements scientifiques ou accompagner la maturation de nouvelles start-ups issues des laboratoires. Le continuum ainsi créé, de la thèse à la preuve de concept industrielle, est l'un des ressorts majeurs de l'attractivité francilienne.

Jouer collectif avec Delft, la Bavière et Grenoble : Une souveraineté qui passe par les partenariats

Affirmer le *leadership* de l'Île-de-France ne signifie pas l'opposer aux autres *hubs* européens. Au contraire, la construction d'une **souveraineté quantique européenne crédible** suppose de jouer collectif avec des écosystèmes comme Quantum Delta NL autour de Delft, le *cluster* bavarois centré sur Munich, ou encore Grenoble, qui concentre une part essentielle de l'effort français sur les semi-conducteurs et la cryogénie.

Lors de l'édition 2025 de Quantum.Tech Europe à Rotterdam, la présence conjointe de Choose Paris Region et de l'Établissement Public d'Aménagement de Paris-Saclay aux côtés de Quantum Delta NL illustre cette logique : chaque *hub* met en avant ses spécificités – Delft sur les réseaux quantiques et la spintronique ; la Bavière sur les plateformes industrielles et l'ingénierie système ; l'Île-de-France sur la densité mathématique et la diversité des plateformes matérielles –, mais les échanges de projets, de talents et de financements sont activement encouragés.

Sur le plan technologique, cette complémentarité est une force : la standardisation des interfaces, le développement de l'EuroQCI ou les futurs réseaux d'ordinateurs quantiques distribués ne pourront être menés à bien que si les *hubs* européens mutualisent leurs efforts, plutôt que de reproduire à l'échelle du continent la compétition entre grands pôles nationaux.

Pour la Région Île-de-France, l'enjeu est donc double :

1. **continuer à se distinguer** par la qualité de son écosystème et la sophistication de ses outils (DIM, PAQ, future Maison du Quantique) ;
2. **s'affirmer comme un partenaire structurant** des autres places européennes, capable d'accueillir des R&D de pointe tout en co-construisant des programmes communs dans les communications, la métrologie et l'informatique quantiques.

Bibliographie

DEALROOM (2026), The 2026 European Deep Tech Report, mars, URL

INSTITUT PARIS REGION (2021), *Note rapide* n°907 « L'écosystème quantique francilien accélère sa croissance », septembre, URL

The second quantum revolution and its issues of sovereignty and partnerships

Foreword

Grégoire Postel-Vinay.

Introduction - From science to quantum engineering: The age of the engineer-scientist

Frédéric Barbaresco, Fabrice Dupuy & François Gerin.

Preliminary remarks: Thales and quantum physics

Patrice Caine.

Industrial challenges in quantum computing

France's national quantum strategy: Mid-term review and outlook

Loïc Le Loarer & Raphaël Bouganne.

Quantum mechanics is generating global enthusiasm for its technological promises: ultra-precise sensors, unhackable communications, and quantum computing capable of revolutionizing cryptography or chemistry. In 2021, France launched an ambitious national strategy, backed by €1 billion through France 2030 and overseen by the General Secretariat for Investment. Five years later, the results are tangible: a doubling of quantum education programs, scientific breakthroughs through the Priority Research Equipment and Programs, and flagship initiatives like PROQCIMA, which aims to develop a fault-tolerant quantum computer by 2032. France boasts a unique technological diversity.

However, financial supremacy is gradually replacing technological supremacy. To maintain its sovereignty, France must accelerate industrialization and engage in a European dynamic. The challenge by 2030 is to consolidate its leadership by protecting its stakeholders and securing its supply chains.

Quantum computing put to the test in engineering: The software stack as a matter of sovereignty

Neil Abroug.

Quantum computers are no longer just a laboratory promise. Their development has triggered a decisive transition: from physics to systems engineering. In this new landscape, the question is no longer simply

“who will produce the best qubits?” but rather “on what software stack will developers build their applications, and who will control it?” Since 2019, Inria has structured a strategy firmly focused on the software and algorithmic layers of quantum computing, in line with the national strategy and within the framework of a coordinated European response. This article describes its genesis, achievements, and future prospects.

The challenges facing the emerging quantum computing industry

Pierre Bonnet.

Future applications of quantum computing are expected to revolutionize the world of digital computing, which is fundamental to large sectors of our economy and defense systems (cryptanalysis, physical simulation, logistics, pharmaceuticals, among others). Given the technological and economic stakes, and despite remaining scientific questions, the nascent quantum computing industry is beginning to take shape. Here, we detail its value chain, divided into three components with distinct industrial implications: “computing core,” “complete system,” and “quantum software.” We emphasize the need for international organization within the field.

France and the quantum computer

Vincent Berger & Giuseppe Leo.

France has invested significantly in the field of quantum information, and particularly in research aimed at developing a quantum computer (QC). Although the French effort may seem modest compared to that of the US or China, France boasts a world-class community of quantum physicists and computer scientists, enabling it to play a leading role from a qualitative point of view. French research has no reason to be ashamed of its global standing, even if purely quantitative bibliometric measurements might suggest a secondary role.

The five French startups, funded using different technologies, have achieved interesting results on a global scale, and employ top-level scientists. It is still too early to determine which technology will prevail, as each has its own specific challenges.

An overview based on patents of the key trends and key players in the field of quantum technologies

Jérôme Planté-Bordeneuve.

The analysis of patents and patent applications is probably the best indicator of innovation worldwide. This article identifies the main trends and the key players in

the field of quantum technologies through an analysis of patents and patent applications filed by the various players in this field.

The "Maisons du Quantique" network: Building a strategic quantum computing ecosystem

Jean-Baptiste Latre.

The "Maisons du quantique" network helps shaping France's quantum computing sector by federating five regional initiatives, and facilitating access to experimental NISQ machines. Managed by GENCI as part of the HQI France program, it fosters knowledge dissemination, user training, and dialogue between academia and industry. By coordinating efforts across regions, it aligns shared requirements with local specificities, promotes scientific collaboration, and prepares for industrial adoption. Through its integration with European programs and the development of international partnerships, it helps turning French scientific excellence into a tool for sustainable technological sovereignty.

Funding for quantum activities and projects

Christophe Jurczak.

The financing of quantum technologies has followed an unprecedented trajectory in less than a decade: from virtually no investment to a sector raising over \$6 billion annually in venture capital, supported by \$56 billion in global public commitments. Yet, this relative success masks a structural tension. Current financing mechanisms may well be well-suited to supporting the emergence of these technologies. They are not however designed for scaling up. This article argues that the financing architecture must evolve with technological maturity: today, quantum computing is less in need of scientific evidence than of growth capital originating in Europe, investors capable of supporting long-term industrialization, and stock markets offering entrepreneurs and founding investors the liquidity they require.

"Standardizing to lead" in the quantum age: A bold challenge for Europe

Margherita Issoire.

As quantum technologies mature rapidly, their deployment faces a paradox: the more innovative the solutions (superconducting qubits, trapped ions, photonics, etc.), the more their fragmentation threatens their adoption due to a lack of market preparedness. Faced with this challenge, Europe and France are leveraging voluntary standardization as a catalyst for acceleration, well before commercial maturity. Why? Because standards become market drivers for disruptive innovations.

This article explains how ex-ante standardization can support investment, structure the market, and establish European standards before American or Chinese giants can dominate the market. An offensive European strategy, implemented through the European (CEN-CLC JTC 22) and international (IEC/ISO JTC 3) Joint Technical Committees, must emerge to ensure global technical diplomacy, in which France is positioned at the forefront.

Europe's initiatives

La Quantum Europe Strategy : L'Europe du quantique dans un monde en mutation

Oscar Diez.

La Quantum Europe Strategy (juillet 2025) marque un tournant : le quantique sort du laboratoire et entre dans les chaînes de valeur, avec des enjeux de compétitivité, de résilience des infrastructures critiques et, pour certains usages, de sécurité. L'Union dispose d'atouts solides, dont son excellence scientifique, son vivier de talents, un tissu dynamique de start-ups et une position solide en tant que fournisseur, mais peine encore à convertir ces forces pour la mise à l'échelle, le passage à l'industrialisation et prendre la tête du marché. L'article présente la logique de « boucle de livraison » de la stratégie (R&I, infrastructures, industrialisation, espace / *dual-use*, compétences) et discute le rôle attendu du futur Quantum Act pour réduire la fragmentation, sécuriser les chaînes d'approvisionnement et accélérer la demande. À un moment critique de la compétition mondiale, l'enjeu est de passer de l'excellence à l'exécution.

The ADEQUADE project under the European Defence Fund

Daniel Dolfi, Frédéric Nguyen Van Dau & Arnaud Brignon.

The ADEQUADE project is part of the technological breakthroughs supported by the European Defence Fund. Launched at the end of 2022 and scheduled to be completed by June 2026, it brings together around thirty partners across eight European countries. Coordinated by Thales, it is co-led by major European defense players, notably Leonardo, Diehl, Indra, and TNO. The goal of this project is to develop quantum technologies that could provide a substantial performance boost to conventional electromagnetic detection or navigation systems. The aim is not, for example, to develop a quantum radar (the relevance of which has not yet been established), but rather to equip a radar—which is conventional in its operating principles—with breakthrough performance (sensitivity, resolution, coverage, etc.) by leveraging concepts derived from quantum physics.

Quantum computing and defense

Dual investment in the service of sovereignty: The example of quantum computing

Jean-Baptiste Paing.

Dual-use public investment (civil and military) plays a major role in the development of quantum computing in France, which is considered a strategic technology capable of providing a significant scientific, economic, and military advantage. In light of technological uncertainties and high costs, the government supports this sector through joint investments between the France 2030 investment plan and defense appropriations, with a focus on national sovereignty.

Thus, the PROQCIMA project, led by the DGA (French acronym for the Defense Procurement Agency) on behalf of the SGPI (for General Secretariat for Investment in French), leverages public procurement to support the

French ecosystem and progressively select the most capable companies able to develop a quantum computer, with a view to achieving industrial consolidation. In parallel, the ALIQUANTE project aims to develop the software component of the quantum computer to prepare for the use of this technology in defense, in a way that will also benefit the civilian sector. This dual approach to sovereignty does not, however, overlook the need for European consolidation in order to achieve the critical mass required to remain competitive against the United States and China.

Defence Innovation Agency's initiatives in support of a ministerial quantum plan **Patrick Aufort.**

The development of quantum technologies, particularly sensors and computers, will have a significant impact on “the face of the battlefield and how we wage war” (Sébastien Lecornu, January 7, 2025).

Quantum computing is the subject of a geostrategic competition whose outcome will reshape the military, diplomatic, and economic balance of power between the “great powers” by 2040, just as nuclear weapons and access to space have.

From this perspective, investing in quantum technologies represents a matter of sovereignty for our armed forces. The Defence Innovation Agency coordinates support activities for the quantum strategy of the Ministry of the Armed Forces and Veterans Affairs.

Quantum technologies for aerospace and defense applications: GIFAS Report **Sylvain Schwartz, Mathias van den Bossche & Frédéric Barbaresco.**

It is important to distinguish between sensors and communications, for which GIFAS member companies are both manufacturers and potential users, and quantum computing, for which the hardware is primarily developed by companies outside GIFAS. The main contribution of GIFAS member companies should be in developing algorithms adapted to these new machines. The timeframes for the different pillars also vary. While it is difficult to predict the future, especially in a rapidly evolving sector, it seems clear that quantum sensors are the most likely to deliver tangible benefits in the short term (less than five years) for a number of ASD applications. The deployment of a quantum communications network seems feasible in the medium term (five years or more), while the applications of quantum computing, for they are more uncertain, are expected in the medium to long term.

NATO initiatives **Olivier Pernaudet & Jean-Marc Puel.**

NATO adopted its first comprehensive strategy dedicated to quantum technologies in 2023. The objective is to accelerate the development and adoption of quantum technologies in order to preserve the technological edge of the Alliance. In this context, NATO's Allied Command Transformation (ACT) is conducting experimentation campaigns to assess quantum-resilient solutions in realistic operational scenarios.

In 2025, eight companies from six countries, a national laboratory, academic partners, and firms selected through DIANA took part in these experiments, testing

quantum key distribution (QKD), post-quantum cryptography, crypto-agility, RF leakage analysis, and quantum sensing. The results confirmed the importance of crypto-agile architectures and the maturity of post-quantum cryptography for early deployment in tactical systems, marking a significant step toward resilient infrastructures able to withstand quantum-enabled threats.

Human resources issues

Quantum skills in initial training, career change programs, and recruitment **Thomas Antoni.**

The national quantum strategy aims to create 16,000 jobs in the sector by 2030, requiring the training of 5,000 new talents. The growth is evident: it took startups less than five years to reach over 100 employees. New graduates must be able to quickly integrate into companies, and remain agile enough to adapt to professions that evolve every six months—and sometimes do not yet exist. They also have the mission of bridging the gap between highly specialized founders and less technically literate partners, while quantum sciences and technologies integrate into the broader educational system to support society through this new industrial revolution.

With a long tradition of research in quantum physics, a unique model of engineers, and major hubs where universities, prestigious higher education institutions, large research centers, and companies coexist, France is particularly well-positioned to meet this challenge.

The appeal of the Paris Region to international players in quantum technologies: What are the challenges? **Thomas Fauvel.**

Thanks to an exceptional concentration of research centers around central Paris and Paris-Saclay, the Paris Region has rapidly emerged as a key European hub for quantum technologies. Worldclass labs, cutting-edge computing and communication infrastructures, and innovative tools such as the regional “Pack Quantique” program and the QuanTiP research network have attracted ten international players while intensifying the competition for talent with local champions. In a European landscape where Delft, Bavaria, and Grenoble are also gaining traction, the Paris Region must combine leadership, partnerships, and strategic autonomy to remain at the forefront of the second quantum revolution.

Issue editors:
François GERIN,
Frédéric BARBARESCO
& Fabrice DUPUY

Ont contribué à ce numéro



Neil ABROUG

est docteur en mathématiques appliquées et titulaire de deux MBA exécutifs en management de l'innovation et en sécurité économique. Il est également auditeur de l'Institut des Hautes Études de Défense Nationale (IHEDN).

Rapporteur de la mission parlementaire Forteza (2019-2020) « Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas », il est

nommé en 2021 Coordinateur national de cette stratégie au Secrétariat général pour l'investissement (Services du Premier ministre). Il y pilote pendant trois ans la mise en œuvre du plan France 2030 d'1,8 milliard d'euros, coordonne les acteurs publics et privés, et négocie les accords bilatéraux de coopération quantique avec les États-Unis, les Pays-Bas et l'Allemagne.

Depuis septembre 2024, il dirige le Programme quantique d'Inria. Il est membre du Conseil consultatif stratégique du Quantum Flagship de l'Union européenne. Il intervient régulièrement dans les forums internationaux du secteur. En 2025, il contribue à la rédaction de la Stratégie quantique de la Commission européenne.



Thomas ANTONI

professeur des universités, est responsable du programme de formation en ingénierie quantique à CentraleSupélec, l'un des établissements fondateurs de l'Université Paris-Saclay.

Après des études en France et aux États-Unis, il a entamé sa carrière au sein de Thales Research and Technology, où il contribue au développement des détecteurs à

puits quantiques. Il rejoint ensuite le Laboratoire Kastler Brossel dans l'équipe mesure et bruits fondamentaux.

En 2012, il est recruté à l'École Centrale Paris, où ses recherches portent sur les propriétés mécaniques de la lumière et leur influence sur la précision des mesures quantiques.

À l'occasion de la création de CentraleSupélec, il propose dès 2020 une formation d'ingénieurs généralistes au service des technologies quantiques, dans la tradition des deux écoles historiques d'accompagner la société dans les révolutions technologiques.

Parallèlement à ses activités académiques, il dirige les concours d'entrée des écoles Centrale.



Patrick AUFORT

débute sa carrière en 1994 dans le domaine de la guerre électronique, comme spécialiste technique renseignement d'origine électromagnétique puis comme architecte du système d'autoprotection de l'avion Rafale. En 2002, il poursuit son parcours technique comme architecte de marque des avions de détection et contrôle AWACS et des avions de guet embarqué Hawkeye.

En 2006, il est nommé manager du Système de Commandement et de Conduite des Opérations Aérospatiales (SCCOA). Son action conduit à la réception des deux premiers niveaux d'informatisation opérationnelle des bases aériennes et au transfert du centre de commandement et de conduite des opérations aériennes sans interruption de la posture permanente de sûreté.

En 2009, il rejoint l'unité de management « Opérations d'armement aéronautiques » comme manager des avions de patrouille maritime afin de piloter la rénovation de l'avion Atlantique 2. Il dirige à partir de 2013 le segment de l'unité de management chargé de l'ensemble des avions de missions : détection aérienne et contrôle, guet embarqué, surveillance et patrouille maritime, renseignement, avions de la sécurité civile, avions banc d'essais.

En 2015, il est nommé directeur de DGA Essais propulseurs. Il met en œuvre la simulation numérique dans la formation des personnels et la préparation des essais et il concrétise de nouveaux modes de fonctionnement pour les essais en cession.

En 2018, il prend la direction de DGA Ingénierie des projets. Il œuvre à l'optimisation de la gestion des ressources techniques, développe les méthodes d'ingénierie système et de simulation et adapte le centre aux enjeux de la transformation numérique.

Patrick Aufort est nommé directeur adjoint de l'agence de l'innovation de défense le 1^{er} octobre 2020 puis directeur le 15 mars 2023. Il est chevalier de la Légion d'honneur, officier de l'ordre national du Mérite, titulaire de la médaille de l'aéronautique et auditeur de la 51^{ème} session armement et économie de défense de l'IHEDN.



Frédéric BARBARESCO

est responsable du segment « Algorithmes et calcul quantiques » pour THALES, où il gère les collaborations avec les start-ups du programme DGA PROQCIMA. Membre du groupe de travail OTAN SET-IST-339 « Étude des applications militaires des algorithmes quantiques », et du comité européen EQCBC.

Il coordonne le projet de *benchmark* BACQ du programme LNE MetriQs. Il a contribué au rapport de l'Académie des technologies sur les calculateurs FTQC, et est General Chair de la conférence QUEST-IS sur l'ingénierie quantique. Diplômé de CentraleSupélec 1991, il a reçu le prix Aymée Poirson de l'Académie des sciences pour l'application de la Science à l'industrie, et la médaille Ampère de la SEE.



Vincent BERGER

est haut-commissaire à l'Énergie atomique (HCEA). Sous l'autorité du Premier ministre, il conseille le gouvernement en matière scientifique et technique, dans le nucléaire ou dans certains domaines de la défense.

Ancien élève de l'École normale supérieure, il débute sa carrière comme physicien en optoélectronique quantique,

à Thales puis à l'Université Paris Diderot (aujourd'hui Université Paris Cité). Il a été président de l'Université Paris Diderot entre 2009 et 2013, puis conseiller du président de la République François Hollande dans le domaine de l'éducation, de l'enseignement supérieur et de la recherche, entre 2013 et 2015.

Il a rejoint en septembre 2015, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), où il a été directeur de la recherche fondamentale jusqu'en 2019.

Il est devenu conseiller maître à la Cour des Comptes en 2020, et a été nommé HCEA en septembre 2023.

Pierre BONNET

est docteur en physique de l'Université Paris-Saclay, où il a travaillé sur le dopage laser du silicium et sur les propriétés de la supraconductivité du silicium ultra-dopé, sous la direction de Francesca Chiodi et Dominique Débarre au Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N). Il a poursuivi sa carrière au sein de l'Agence nationale de la recherche (ANR), où il a notamment construit le suivi financier et la sélection des programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) et de l'appel Compétences et métiers d'avenir de France 2030. Depuis 2023, il est en charge du calcul quantique et du calcul haute performance au sein de la Direction générale des Entreprises du ministère de l'Économie et des Finances où il travaille au pilotage des aspects industriels de la stratégie nationale quantique. Il est le représentant suppléant de la France au comité directeur de la coentreprise européenne EuroHPC.

Raphaël BOUGANNE

est, depuis le 1^{er} octobre 2025, l'adjoint de Loïc Le Loarer à la coordination de la stratégie nationale quantique, au Secrétariat général pour l'investissement. Il est issu de la filière « atomes froids », avec une thèse au laboratoire Kastler Brossel dans le groupe de Jean Dalibard. Il y a travaillé sur le rôle des interactions dans les gaz ultra-froids d'ytterbium bosonique. Ingénieur de l'armement, il a été directeur de cabinet du Président de l'École polytechnique (Éric Labaye) puis chef du bureau en charge de la protection de la recherche au Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale.

Arnaud BRIGNON

est diplômé de l'École Supérieure d'Optique (1991) et docteur en physique de l'Université Paris XI (1996). Il a rejoint le groupe Thales où il occupe le poste de responsable du Laboratoire Micro et Nano-Physique et d'Expert Senior au sein du Département de Physique. Les activités dont il a la charge comprennent la photonique intégrée, la nanophotonique, les composants à base matériaux 2D, les capteurs quantiques, les dispositifs pour la communication quantique et les communications optiques en espace libre. Arnaud Brignon est auteur et co-auteur d'une trentaine de brevets, de plus de 70 articles dans des revues à comité de lecture, auteur et éditeur de trois livres sur l'optique non-linéaire et les lasers. Il a fait partie du comité d'administration du Quantum Electronics and Optics Division (QEOD) de l'European Physical Society (EPS), de la Société française d'Optique (SFO) et de Photonics France. Il a reçu le prix Frabry-de Gramont de la SFO (1996), le prix Fresnel de l'EPS (2000) et le Technology Review's Top Young Innovators Award décerné par le MIT en 2001. Il est Fellow de l'Optical Society of America (Optica).

Depuis 2022, Daniel Dolfi, Frédéric Nguyen Van Dau et Arnaud Brignon coordonnent le projet ADEQUADE.



Patrice CAINE

est diplômé de l'École polytechnique et de l'École des Mines de Paris, et ingénieur en chef du Corps des Mines. Il a débuté sa carrière en 1992 dans le groupe pharmaceutique Fournier, avant de devenir conseiller en fusions et acquisitions et stratégie d'entreprise à Charterhouse Bank Limited à Londres.

De 1995 à 2000, il a occupé plusieurs postes à responsabilité au sein de l'administration française. De 2000 à 2002, il a été conseiller technique énergie au cabinet du ministre de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.

En 2002, Patrice Caine a rejoint la direction de la Stratégie du Groupe Thales, avant d'occuper des postes de direction dans différentes activités : Aéronautique et Naval, Communications, Navigation et Identification, Systèmes Aériens, Produits de radiocommunications, Réseaux et Systèmes d'Infrastructures et Systèmes de Protection.

En février 2013, il a été nommé Directeur Général Opérations et Performance et a rejoint le Comité exécutif. Patrice Caine a été nommé Président-directeur général du groupe Thales en décembre 2014. Il est membre du conseil d'administration de Naval Group depuis 2015 et de celui de L'Oréal depuis 2018.

Il est Vice-Président du Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS) depuis 2015, Président de l'Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT) depuis 2019 et Vice-Président de France Industrie depuis 2020.

En 2020, Patrice Caine est devenu membre du comité exécutif du Conseil National de l'Industrie.

Patrice Caine a reçu la médaille de la défense nationale, échelon bronze. En 2014, il a été nommé chevalier de l'ordre national du Mérite avant d'être élevé au rang d'officier en 2025. En 2017, il a été nommé chevalier de la Légion d'honneur.



Oscar DIEZ

is the Deputy Head of Unit for Quantum Technologies at the European Commission, where he leads strategic initiatives to position Europe as a global leader in the quantum domain. With a robust background in both academia and public sector innovation, he previously served as Head of the Datacentre at the European Medicines Agency in London.

Dr. Diez holds a Ph.D. in Computer Science from Universidad Politécnica de Madrid and a Master's in Open eGovernment from Stockholm University. He also shares his expertise as an adjunct professor at IE University in Madrid. His work focuses on fostering scientific excellence, supporting industrial innovation, and advancing Europe's competitive edge in quantum technologies.

Daniel DOLFI

est diplômé de l'École Supérieure d'Optique d'Orsay (1986). Il a obtenu son doctorat de l'Université Paris XI Orsay en 1993 et son habilitation à diriger des recherches en 2008. Il a rejoint Thales Research & Technology-France en 1986, où il occupe actuellement le poste de Directeur du Département de Physique.

Ses domaines de recherche couvrent la génération et le traitement optoélectroniques des signaux hyperfréquences et térahertz, l'optique non linéaire dans les fibres, ainsi que le développement de dispositifs optoélectroniques jusqu'à l'échelle nanométrique. Il a mené des travaux originaux sur les systèmes optroniques actifs, incluant les lidars, l'imagerie, les systèmes de communication en espace libre, les dispositifs hyperfréquence à base de supraconducteurs, l'optoélectronique à base de graphène, et les circuits photoniques intégrés pour des applications dans les lidars et radars. Ses recherches récentes portent également sur la détection et le traitement quantiques pour les systèmes RF et optroniques, la communication quantique et les technologies quantiques pour le positionnement, la navigation et le timing.

Daniel Dolfi est co-auteur d'environ 110 publications dans des revues à comité de lecture, d'environ 140 communications dans des conférences internationales et d'une soixantaine de brevets. Il a reçu le Thales Innovation Award en 1993, 1996, 2000 et 2016, ainsi que le prix 3AF OPTRO 2024. Il est OSA Fellow, EOS Fellow et IEEE Senior Member.

Depuis 2022, Daniel Dolfi, Frédéric Nguyen Van Dau et Arnaud Brignon coordonnent le projet ADEQUADE.



Fabrice DUPUY

est polytechnicien, ingénieur du corps des télécoms / mines. Après avoir été directeur des systèmes d'information d'Orange Europe, en République du Congo et d'Orange France, il a conclu sa carrière chez l'opérateur de télécommunications comme doctorant dans le domaine de l'Internet Quantique. Il est aujourd'hui consultant, écrivain et membre senior de la SEE.



Thomas FAUVEL

est expert *deep tech* au sein de l'agence d'attractivité internationale Choose Paris Region, où il accompagne depuis 2018 les entreprises étrangères des secteurs de l'intelligence artificielle, de la cybersécurité et des technologies quantiques souhaitant s'implanter en Île-de-France. Ingénieur généraliste de formation, il a débuté sa carrière dans l'industrie avant de virer vers le monde de

l'accompagnement de l'innovation et des partenariats européens au sein de Paris Region Entreprises.

Dans ses fonctions actuelles, il conçoit des argumentaires d'attractivité pour la Région Île-de-France, structure des mises en relation ciblées entre start-ups, grands groupes et laboratoires, et contribue à la définition de la stratégie régionale sur les filières *deep tech*. Il intervient régulièrement dans des conférences internationales dédiées au quantique, comme Quantum.Tech Europe, ou lors d'événements tels que France Quantum, pour présenter les atouts de l'écosystème francilien et le rôle des dispositifs régionaux, notamment le Pack Quantique et le DIM QuanTiP. Ses missions se situent à l'interface entre politique publique d'innovation, développement économique et diplomatie technologique.



François GERIN

X - Mines, INSEAD AMP, lauréat de la FNEP, conseille Siemens France en matière de R&D, d'innovation, et de partenariats stratégiques ; DG adjoint de Siemens SAS de 1995 à 2014, il dirigea les télécommunications du groupe en France de 1991 à 1998.

Président d'AFNOR Certification depuis 2017, à la tête de la SEE depuis 2013, il avait présidé les CA des Écoles des mines de Saint Etienne de 2002 à 2014, et d'Alès entre 1998 et 2002.



Margherita ISSOIRE

est responsable de la normalisation des technologies numériques et émergentes au Groupe AFNOR. Rapporteur du Comité d'orientations stratégiques, elle pilote le déploiement de la stratégie de normalisation française sur le volet des technologies de l'information et la communication (TIC). Auparavant, elle travaillait en Allemagne à Quantum-Systems GmbH, en tant

que chargée de projets stratégiques.

Elle est diplômée d'un double master entre Sciences Po Paris et Freie Universität Berlin, où elle s'est spécialisée en politique d'innovation et enjeux de sécurité et défense. Sa thèse de master s'intitule : « Politique d'Innovation de la France et de l'Allemagne dans la deeptech : une analyse comparée de leurs systèmes d'innovation ».



Christophe JURCZAK

est associé et co-fondateur de Quantonation, premier fonds mondial dédié aux technologies quantiques, qu'il a créé en 2018. Ancien élève de l'École polytechnique et docteur en physique quantique, il a mené une carrière à l'interface de la recherche, de l'industrie et de l'investissement. Quantonation accompagne 37 entreprises dans ses deux

fonds (330 M€ d'actifs sous gestion), et figure au premier rang mondial des investisseurs early-stage en technologies quantiques.



Jean-Baptiste LATRE

est docteur en mathématiques, et a démarré sa carrière il y a presque quinze ans en collaboration avec Philippe Ricoux de la Direction Scientifique du Groupe Total et Françoise Chatelin au CERFACS - Centre européen de recherche et de formation en calcul scientifique. Entre 2013 et 2019, il a travaillé sur les limites mathématiques du calcul haute performance, notamment

en préparation de la génération de machines exascale (1018 opérations/seconde). Son domaine principal de compétence concerne l'étude de la non-linéarité, l'analyse numérique et la modélisation algébrique adaptée naturellement à la physique selon le problème étudié.

A partir de 2018, il a contribué pendant trois ans à l'effort industriel pionnier du Groupe Total initié par Henri Calandra sur le calcul quantique. Il a approfondi plusieurs thèmes issus de son sujet initial comme l'analyse d'erreur, la simulation hamiltonienne, la pertinence des estimations de ressources quantiques et l'impact de la correction d'erreur (QEC) sur le potentiel concret des algorithmes.

Il a fondé Qualitative Computing en 2022 dans le but d'accompagner les industriels dans leur stratégie de calcul classique et quantique. Il a contribué aux actions des groupes de normalisation quantique (AFNOR CN QT, CEN/CENELEC JTC 22) ainsi que pour la Quantum Energy Initiative (IEEE P3329). Impliqué dans les activités publiques de structuration de l'écosystème quantique, en collaboration avec Teratec puis avec GENCI, il poursuit également ses activités de recherche avec des partenaires et organismes en quête d'une vision du calcul à long terme, nécessitant souvent une stratégie d'innovation confidentielle.

Dans le cadre du programme HQI, il est le coordinateur national du réseau des Maisons du Quantique depuis leur lancement en 2025.



Giuseppe LEO

est professeur de classe exceptionnelle à l'Université Paris Cité, où il dirige l'équipe Dispositifs opto-électroniques et nanophotoniques du laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques.

Ingénieur en génie électronique à l'Université La Sapienza de Rome puis docteur en physique à Paris-Saclay, il a débuté sa carrière en 1992 à l'Université Roma Tre en tant

que chercheur puis professeur associé, avec des séjours de recherche chez Philips, CSELT et Thales. Depuis 2004, il est professeur titulaire à Paris Cité, où il a créé et dirigé l'école d'ingénieurs EIDD (2010-22).

Optica Fellow, chaire de l'Institut universitaire de France et membre du conseil d'administration de la Société française d'optique, il a coordonné plusieurs projets de recherche, présidé des conférences, publié de nombreux articles scientifiques et déposé des brevets, et il est membre de comités de rédaction de revues scientifiques.

Loïc LE LOARER

est, depuis le 1^{er} septembre 2024, coordinateur national de la stratégie pour les technologies quantiques, auprès du Secrétaire général pour l'investissement. Ingénieur en informatique et en microélectronique de formation, il a d'abord travaillé pendant une douzaine d'années dans le secteur privé, d'abord dans la vidéo, notamment pour l'entreprise Sigma Designs (jusqu'en 2011), puis dans les supercalculateurs pour Bull. À partir de 2015, il rejoint le ministère des Armées, où en tant que manager en électronique puis directeur de projet, il développe les supercalculateurs et les datacentres, puis met en place un programme sur le calcul quantique qui représente le futur des supercalculateurs.

Frédéric NGUYEN VAN DAU

est diplômé de l'École Centrale de Paris (1985) et docteur de l'Université Paris XI (1989). Il a rejoint Thales Research & Technology-France en 1986, où il occupe actuellement le poste d'Expert Senior au sein du Département de Physique.

Ses centres d'intérêts incluent l'électronique de spin (matériaux, composants et applications), les dispositifs supraconducteurs et les technologies de capteurs quantiques. Il a cosigné environ 100 publications dans des revues à comité de lecture et une vingtaine de familles de brevets. Il a été membre du Comité National de la Recherche scientifique (2004-08, 2021-25), membre de la Commission Magnétisme de l'IUPAP (2008-14), membre des Conseils Scientifiques de l'Université Paris Sud (2012-16), de l'Institut de Physique du CNRS (2013-18) et de l'École Centrale Supélec (depuis 2024). Depuis 2022, Daniel Dolfi, Frédéric Nguyen Van Dau et Arnaud Brignon coordonnent le projet ADEQUADE.



Jean-Baptiste PAING

est diplômé de l'École polytechnique (promotion 2002) et de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (promotion 2006), il débute sa carrière à la direction générale de l'Armement (DGA) en tant qu'expert dans le domaine du renseignement spatial d'origine électromagnétique, d'abord à Bruz au centre d'électronique de l'armement en

2007, puis en région parisienne à partir de 2010.

De 2013 à 2016, il occupe des fonctions transverses au sein de la DGA, d'abord au sein de la chaîne financière, puis en tant que conseiller technique au cabinet du Délégué général pour l'armement Laurent Collet-Billon.

Nommé en 2016 au sein de la DGA directeur du programme MUSIS, relatif à la troisième génération de satellites militaires d'observation de la Terre, il pilote les activités menant au lancement du satellite CSO-1 fin 2018 et à la mise en service opérationnel du système à l'été 2019. Il intègre la Belgique puis l'Italie dans le périmètre de coopération du programme.

En 2019, il rejoint le service d'architecture du système de défense (SASD) de la DGA, en tant que coordinateur des activités spatiales et de connectivité pour la préparation du futur. Il participe à la mise en place du programme ARES constituant le pilier capacitaire de la stratégie spatiale de défense adoptée en 2019. Il initie également les premières étapes de l'initiative Connect@Aéro, relative à la connectivité aéronautique des armées françaises.

À partir de 2022, il est architecte du système de défense au sein du SASD, responsable d'une équipe en charge de la préparation des futurs équipements militaires dans des domaines aussi variés que le spatial, le renseignement, la cyber, la connectivité, l'intelligence artificielle, le quantique ou encore les systèmes d'information opérationnels. Il promeut une approche duale, initiant un rapprochement avec les équipes en charge du plan d'investissement France 2030, qui s'est notamment incarné au travers de la mise en place du partenariat d'innovation PROQ-CIMA relatif au développement de l'ordinateur quantique. Il contribue également activement aux réflexions relatives à la transformation numérique du ministère et de la DGA.

Depuis fin 2025, il est directeur adjoint de l'unité de management CIRCEA de la DGA, en charge de la conduite d'environ 80 programmes d'armement dans les domaines du combat infovalorisé, du renseignement, de la cyber, de l'espace et des aéronefs de mission.

Né le 15 mars 1983, marié et père de 3 enfants, il est chevalier de la Légion d'honneur et chevalier de l'ordre national du Mérite. Il est promu au rang d'ingénieur général de l'armement de 2^{ème} classe le 1^{er} janvier 2025.



Olivier PERNAUDET

est entré au ministère de la Défense en 1999. Diplômé de l'École navale, il a servi alternativement à bord de sous-marins nucléaires d'attaque (SNA), au sein d'états-majors multinationaux et dans les forces de surface, où il a été nommé commandant du chaland de débarquement EDIC Sabre en 2006. Au cours de ces huit années passées en mer, il a participé à de nombreuses opérations ainsi qu'à des missions de sécurité maritime.

En 2010, il est affecté à l'état-major de la Marine en tant qu'officier de programme pour les armes et équipements des sous-marins (système de gestion de combat, sonars et armements). Il sert ensuite à l'état-major interarmées comme adjoint au chef du bureau de gestion de l'information, où il accompagne la transformation numérique.

Il rejoint le corps du Contrôle général des armées en 2015. Après plusieurs années consacrées à des missions d'évaluation et d'audit sur des institutions militaires et publiques, il est nommé chef du département des systèmes d'information où il suit particulièrement les activités et investissements liés au numérique, aux drones, à l'espace et à la cyberdéfense. Il participe notamment à de nombreuses missions interministérielles, et est directement impliqué dans les travaux relatifs à la stratégie spatiale de défense. Il est également fortement engagé dans la transformation numérique du ministère des Armées et dans la création du commissariat au numérique de défense.

En 2024, il rejoint la nouvelle Agence ministérielle pour l'intelligence artificielle de défense (AMIAD) en tant que sous-directeur anticipation, et supervise la mise en œuvre de la stratégie d'intelligence artificielle du ministère.

Il rejoint en août 2025 le commandement allié Transformation de l'OTAN à Norfolk en tant que Champion pour l'intelligence artificielle et conseiller spécial auprès du Commandant suprême allié pour la transformation (SACT).



Jérôme PLANTÉ-BORDENEUVE

est actuellement Directeur, Analyse et Valorisation des Actifs Technologiques, au sein de la Direction Technique du Groupe THALES.

Il a d'abord travaillé chez IBM au Centre d'Études et Recherches de La Gaude, puis a rejoint Dassault Automatismes et Télécommunications, où il a travaillé sur différents projets pour France Telecom. Il a ensuite rejoint THALES, d'abord

pour l'Activité "Systèmes d'Informations et de Communications Sécurisées", puis au niveau "Corporate".

Colonel (er) Jean-Marc PUEL,

HQ SACT Branche innovation.

2024-2026 : Senior analyste pour les technologies émergentes et disruptives (EDT) de l'OTAN (Quantique, IA, biotechnologie, spatial) au quartier général de l'OTAN, SACT Norfolk, Virginie, États-Unis.

- Membre des IST panels 339, 219, NATO TSI 005 et 008 de la NATO STO pour les technologies quantiques.

2010-2024 : Ingénierie système chez Airbus Defense & Space (définition des exigences opérationnelles et de l'architecture système) :

- Soutien aux campagnes de vente de grands systèmes C5ISR, cyberdéfense et guerre de l'information en France et à l'export, notamment auprès de l'OTAN.
- Analyse opérationnelle stratégique, développement de concepts d'opérations système (CONOP), architecture opérationnelle, architecture MBSE, expérimentation et développement de scénarios pour des projets C4ISR complexes de défense gouvernementale (France, OTAN, Moyen-Orient).
- Développement organisationnel et gestion du changement pour les forces armées des pays du Moyen-Orient.

1977-2010 : Arme des Transmissions de l'Armée de terre française et état-major général, occupant divers postes à responsabilité, axés sur :

- La transformation des forces en France (niveau armée de terre et interarmées) et au sein de l'OTAN (2005-2010).
- L'analyse stratégique, la planification stratégique et le développement des capacités C4I de l'OTAN par l'analyse opérationnelle et la planification architecturale au sein du QG SACT de l'OTAN, Norfolk (2005-2008).
- Les essais, l'expérimentation, la planification et l'entraînement des systèmes C4I militaires interarmées et de l'Armée de terre (RITA, SATCOM, SIC-F, SICA). (1980-2000).
- La planification C4I des opérations militaires et quatre déploiements réels (Liban, Bosnie, Kosovo).
- La présidence du groupe de travail sur le niveau opérationnel du Plan d'action pour les capacités de l'Union européenne (ECAP) EMIA (2003-2005).
- Le commandement du 53 régiment de transmissions du Corps européen (2000-2002).

**Sylvain SCHWARTZ**

est Directeur de recherche ONERA. Il est responsable du laboratoire QTech (w3.onera.fr/qttech). Professeur chargé de cours à l'École polytechnique. Ses domaines de recherche concernent les capteurs de champs électromagnétiques à atomes de Rydberg, les capteurs inertiels à atomes froids. Il est diplômé X-Télécom, après un DEA à l'ENS Ulm. Après neuf ans comme

chercheur à Thales Research & Technology, il est Visiting Scientist au MIT et associé au département de physique de l'Université de Harvard. Après avoir été Marie Curie Fellow au Laboratoire Kastler Brossel, il rejoint le département de physique de l'ONERA en 2020.

**Mathias VAN DEN BOSSCHE**

est diplômé de l'École Normale Supérieure de Paris, et titulaire d'un doctorat en systèmes quantiques à N corps. Après quelques années de recherche en physique théorique, il s'est orienté vers l'industrie spatiale, où il a participé à d'importants programmes opérationnels, en gravissant les échelons de la recherche. Il est ensuite

revenu à la recherche pour diriger les activités de R&D de la division spatiale du groupe Thales. Il y a établi une feuille de route ambitieuse sur les technologies quantiques, en identifiant les communications comme priorité, sans pour autant négliger la détection et le calcul. Cette feuille de route se déploie avec succès en collaboration avec plusieurs universités et agences – et les principaux obstacles à la mise en œuvre des communications quantiques spatiales ont déjà été levés au sein de notre équipe, leader dans ce domaine en France et en Europe.