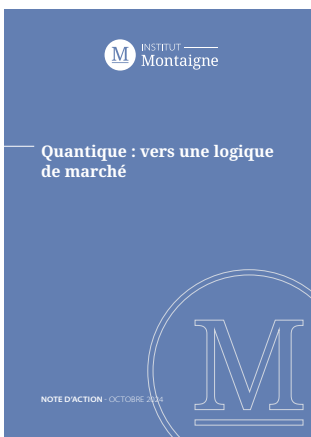


NOTE D'ACTION - Octobre 2024

# Quantique: vers une logique de marché



**L**es technologies quantiques représentent une révolution en devenir : elles offrent pour la première fois un langage informatique capable de coder des systèmes complexes jusque-là impossibles à modéliser, et d'y associer de nouvelles logiques mathématiques. Si ces technologies n'ont pas vocation à irriguer l'ensemble des domaines scientifiques, elles marquent néanmoins un tournant décisif. En effet, elles permettent de passer d'une logique de découverte accidentelle, souvent fondée sur des approches par essai-erreur, à une capacité de prédiction systématisée sur des problématiques aujourd'hui impossibles à modéliser avec les outils classiques.

Si l'IA permet également d'automatiser les prédictions, les deux technologies restent complémentaires. L'IA s'appuie sur des données déjà disponibles, alors que le calcul quantique explore plusieurs possibilités en même temps, ce qui permet d'anticiper des scénarios futurs encore inconnus. Construire une stratégie quantique en parallèle d'une stratégie d'IA devient donc essentiel pour rester compétitif dans un monde où les puissances investissent massivement dans ces technologies. **Une économie qui manquerait ce virage risquerait de se retrouver marginalisée alors que les autres puissances investissent massivement dans les technologies quantiques.**

**Aujourd'hui, la France est bien positionnée tant sur le plan scientifique qu'en matière d'exportation de ses infrastructures et de son matériel quantique :**

- Sur le plan scientifique, la France, grâce à l'excellence de sa recherche fondamentale et à la vitalité de son écosystème entrepreneurial, a su faire émerger quatre des six technologies quantiques les plus prometteuses : les atomes neutres, les photons intriqués, les supraconducteurs et les systèmes spin/silicium.
- Sur le plan de la commercialisation de ses infrastructures et de son matériel quantique, les acteurs

français détiennent 28% des parts de marché des infrastructures quantiques mondiales, principalement concentrées sur les processeurs, rivalisant ainsi directement avec les leaders américains.

**L'Europe dispose en outre d'avantages significatifs sur la chaîne de valeur des technologies quantiques, susceptibles de conforter son avance. Parmi ces atouts figurent notamment les émulateurs quantiques, capables de simuler le comportement de qubits sur des machines quantiques, et ainsi d'acculturer les acteurs au développement de solutions quantiques.**

**Ces atouts sont pourtant menacés par deux éléments principaux :**

**1. La quasi absence d'acteurs français sur des segments de marché essentiels à la construction d'une offre quantique à vocation internationale, notamment ceux des intergiciels et des logiciels quantiques. Sur les 85 startups spécialisées dans le logiciel quantique créées à travers le monde, seulement cinq sont françaises, et ces dernières représentent moins de 1% des 1,6 Md \$ investis dans ce secteur au niveau mondial.**

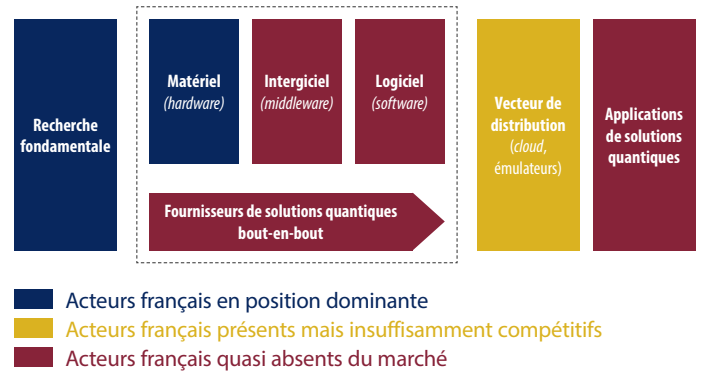
Sur le plan mondial, les montants investis par les pouvoirs publics à l'échelle internationale ont dépassé les 40 Mds \$ en 2024, avec un marché projeté entre 106 Mds \$<sup>1</sup> à 850 Mds \$ à horizon 2030<sup>2</sup>. **En outre, les investissements des États-Unis semblent plus efficaces que ceux des européens : alors que l'Europe et les États-Unis représentent respectivement près de 30% du marché du quantique, les États-Unis y ont seulement investi 3 Mds €, soit moins de la moitié des 7 Mds € investis par les Européens<sup>3</sup>.** Cette situation est d'autant plus regrettable que le marché du logiciel quantique, centré sur les solutions B2B (*business-to-business*), correspond précisément à un domaine où l'Europe bénéficie d'avantages comparatifs significatifs pour faire émerger des acteurs globaux intégrant l'ensemble de la chaîne de valeur.

<sup>1</sup> Source : Qureca, avril 2024, *Quantum Initiatives Worldwide*.

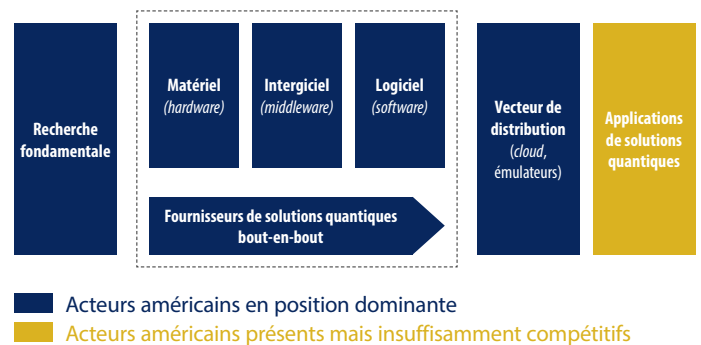
<sup>2</sup> Source : étude du BCG de 2022 qui a été actualisée pendant l'été 2024.

<sup>3</sup> Source : BCG, *L'informatique quantique : la course que l'Europe ne doit pas perdre*, 2022.

**Positionnement des acteurs français sur la chaîne de valeur quantique :**



**Positionnement des acteurs américains sur la chaîne de valeur quantique :**



**2. Des sources de financement de la stratégie nationale quantique trop rigides pour accompagner les mutations d'un marché en devenir. Lors de l'étape 1 du plan quantique, une majorité des 1,8 Md € mobilisés provenaient de reconductions de programmes ministériels, de co-financements industriels et de financements européens. Seuls 650 M € représentaient une véritable marge de manœuvre budgétaire pour les pouvoirs publics.**

**Cette note propose dès lors des recommandations stratégiques et actionnables, prêtes à être mises en œuvre dans le cadre de l'étape 2 de la stratégie nationale quantique. L'objectif est de pallier ces problèmes et d'éviter de reproduire les erreurs du passé, où la France a perdu son avantage technique initial faute d'avoir su valoriser ses atouts.**

Trois leviers : la consolidation de l'offre technologique française et européenne, sa rentabilisation pour qu'elle réponde à un besoin de marché, et la mise en œuvre d'une gouvernance politique qui soutiendra son développement sans le freiner.

**1. De manière prioritaire, les pouvoirs publics doivent consolider l'offre technologique quantique française que nos acteurs ont su développer en optimisant les programmes existants, en stimulant l'investissement privé et en formant la prochaine génération d'experts.**

Cette orientation nécessite d'abord d'optimiser le programme Proqcima, géré par la Direction générale de l'Armement (DGA). Celui-ci a pour mission de retenir les deux technologies de qubits les plus prometteuses pour être passées à l'échelle dans l'industrie. Une fois ces technologies choisies, le programme pourrait prévoir de les confier à des laboratoires communs aux méthodes éprouvées, afin de gérer l'industrialisation dans un contexte d'incertitude scientifique. Il est également essentiel d'ajouter des mesures d'impact à Proqcima pour suivre l'évolution des avancées technologiques et, en fonction de celles-ci, permettre une réversibilité des choix technologiques.

Ensuite, il apparaît impératif de développer des systèmes d'interconnexion entre ordinateurs quantiques afin de garantir leur interopérabilité entre eux, et avec des ordinateurs classiques, une fois que les usages offrant un avantage quantique auront été définis. Cela exige une stratégie de normalisation alignée avec les réalités d'un marché où c'est l'usage des technologies qui définit les normes. De fait, une stratégie de standardisation intelligente permet de construire des avantages compétitifs même si la technologie n'est pas encore mature. En plus de renforcer la présence française au sein des instances de normalisation telles que l'IEEE, il est essentiel de s'assurer de la participation active des acteurs français et européens aux projets open-source majeurs, qui deviennent aujourd'hui des standards *de facto*.

Enfin, des ajustements financiers et humains sont nécessaires pour soutenir le développement de

l'informatique quantique. Étant donné que les investissements publics dans ce domaine dépassent largement les investissements privés, il est crucial d'aligner les financements publics avec les contributions privées, notamment en incitant les grands groupes industriels à acquérir des *startups* quantiques. Pour renforcer la masse salariale dédiée à la recherche quantique, des décisions stratégiques doivent être prises par les directeurs de laboratoires, telles que la création de chaires dirigées par des experts internationaux. Enfin, l'intégration de la logique non binaire (dite « non booléenne ») dans les programmes scolaires, notamment au cycle 4 en informatique, est essentielle pour préparer les élèves à modéliser les problématiques quantiques.

**2. Consolider l'offre technologique française doit permettre de construire un leadership français et européen sur le marché mondial du quantique.**

Pour cela, il est impératif de construire une offre quantique qui réponde à un besoin réel du marché, en accompagnant le développement d'acteurs compétitifs sur tous les segments de la chaîne de valeur du quantique. Bien que la France bénéficie d'une avance technologique sur le matériel quantique, la majorité des projets en cours se trouvent encore au stade de preuve de concept (POC). Afin de préparer l'émergence des avantages tangibles de la technologie quantique et d'orienter les choix stratégiques des décideurs publics et privés, l'Institut Montaigne a identifié les usages les plus prometteurs des technologies quantiques actuelles, notamment le calcul intensif, les capteurs et la communication quantique. Il est difficile de prédire précisément les domaines où les avantages quantiques se concrétiseront, mais il est certain que les technologies quantiques vont durablement transformer le marché du *High Performance Computing* (HPC). En effet, l'incertitude porte essentiellement sur le niveau de performance des futurs calculateurs quantiques et sur la montée à l'échelle des technologies habilitantes associées<sup>4</sup>. Néanmoins, tous les scénarios prospectifs montrent qu'il y aura *a minima* une coexistence entre des machines de type NISQ et des machines analogiques dans les centres HPC avec des correcteurs d'erreurs de plus en plus fines. Dans les scénarios les plus optimistes, les processus industriels seront durablement

impactés, que ce soit dans le cadre d'une arrivée de processeurs de type FTQC ou d'un « saut quantique », avec des architectures modulaires permettant d'interconnecter des FTQC entre eux.

**3. Enfin, il convient d'assurer un pilotage efficace de ces ambitions avec une gouvernance politique et scientifique qui soutienne le développement quantique sans le freiner.** Actuellement, la responsabilité politique est trop diluée, avec une exécution souvent laissée à la Coordination Nationale, seule chargée des décisions budgétaires. Ce manque de clarté dans les rôles – entre décision, exécution et évaluation – se complique davantage avec les trois comités de France 2030 (orientation, suivi, lisibilité), plaçant l'informatique quantique parmi les 30 priorités stratégiques, contrairement aux approches plus ciblées du Royaume-Uni ou des États-Unis. Sur le plan scientifique, pour une intégration efficace des technologies quantiques, il est crucial de les cartographier et de les combiner avec d'autres technologies existantes ou émergentes, afin de réduire les coûts et de faciliter la commercialisation. En 2023, le SGPI a initié avec l'Académie des Technologies une feuille de route technologique quantique nationale, visant à partager les risques dès les phases préliminaires du développement technologique, qui va dans cette direction et gagnerait à être actualisée régulièrement.

## Synthèse des propositions

### Objectif 1

Affiner notre stratégie de sécurisation de la technologie quantique française pour mieux articuler la recherche fondamentale et le passage à l'échelle.

### RECOMMANDATION 1

Confier à Proqcima, reconnu à l'échelle européenne comme l'acteur le plus légitime en la matière, l'identification et la sécurisation de la technologie française la mieux adaptée à une offre compétitive militaire et civile à l'échelle de l'Europe. Piloté par la direction générale de l'armement (DGA), Proqcima doit sélectionner les deux technologies françaises de qubits les plus performantes, prêtes à passer à l'échelle industrielle. Pour assurer l'efficacité de cette sélection, il est essentiel de :

- confronter les 2 technologies françaises retenues aux technologies européennes d'égale maturité ;
- rendre Proqcima plus dynamique en confiant les technologies à des laboratoires communs, en intégrant des mesures d'impact adaptées et en permettant à QuLoop de suivre les technologies non sélectionnées pour garantir une réversibilité en cas d'évolution de leur maturité ;
- réserver les technologies les plus performantes pour des usages militaires et régaliens, afin de protéger les avancées françaises.

### Objectif 2

Mettre en œuvre à l'échelle européenne une stratégie de normalisation intégrant des standards techniques français.

### RECOMMANDATION 2

Conscient de la nécessité de prioriser les solutions tout en veillant à ne pas se faire imposer de facto des standards structurés par d'autres, inciter les acteurs français et européens à contribuer aux programmes open-source internationaux dans lesquels il y a un intérêt commercial à être contributeur.

### RECOMMANDATION 3

À long-terme, et au sein des instances internationales de normalisation, dans le cadre du programme MetriQs France, définir une stratégie de normalisation à partir des acteurs et des technologies françaises et européennes en matière de normes de calcul, normes de sécurité et de compatibilité des technologies

<sup>4</sup> Source : Rapport d'avril 2024 du CEA et de Futurible « Quantum 2042 : étude prospective sur les impacts du calcul quantique en 2042 ».

habilitantes et protocoles de communication entre infrastructures quantiques.

### Objectif 3

Embarquer les investisseurs privés à hauteur des financements publics.

#### RECOMMANDATION 4

Mettre en place des incitations ciblées pour les grandes entreprises françaises afin d'encourager les acteurs du capital risque et du capital croissance à investir dans le quantique, incluant des avantages fiscaux de type CIR pour les acquisitions de jeunes pousses quantiques, des indicateurs de performance valorisant ce type d'acquisitions et la création d'un fonds de capital-risque multiples entreprises (*multi corporate venture*) dédié à l'achat de *startups* quantiques au moment de la série B.

### Objectif 4

Faire du secteur quantique un domaine d'attrait pour les jeunes talents français et internationaux.

#### RECOMMANDATION 5

Mettre en place des chaires quantiques dans les laboratoires de recherche fondamentale et appliquée généraux aux méthodologies éprouvées.

#### RECOMMANDATION 6

Intégrer des compétences fondamentales faisant appel à la logique mathématique non binaire (dite logique non booléenne) dans les programmes mathématiques révisés du cycle 4 qui seront prochainement publiés par le Conseil Supérieur de Programmes.

### Objectif 5

Construire une offre quantique qui réponde à un besoin pour créer un marché rentable.

#### RECOMMANDATION 7

Confier à la Direction générale des entreprises (DGE), qui se situe au cœur de l'écosystème quantique, le soin de diffuser aux entreprises et aux investisseurs une feuille de route recensant les usages quantiques dans lesquels investir de manière à en retirer des avantages concurrentiels. Ces usages concernent prioritairement :

#### 1. Le calcul intensif avec les applications qui font appel à de l'explosion combinatoire et du calcul en parallèle dans 4 secteurs prioritaires :

- a. chimie / pharmaceutique avec la conception automatisée de processus de synthèse et la modélisation de molécules pour détecter des pathologies de manière plus précoce ;
- b. industrie manufacturière / transport avec l'optimisation des routes de transport ou de la logistique avec des processus intelligents ;
- c. énergie / développement durable avec le pilotage des infrastructures d'énergies renouvelables, des réseaux électriques et des systèmes de stockage sensibles aux aléas climatiques ;
- d. finance (banque / assurance) avec l'optimisation de la gestion de portefeuille et l'analyse de corrélations de plus en plus complexes entre les différents facteurs de risque du marché.

#### 2. Les capteurs avec les applications pour lesquels des progrès de mesure restent à faire ou pour lesquels il n'existe pas d'outils de mesure :

- a. dans le secteur militaire, il s'agit de s'affranchir de la dépendance au GPS dans les lieux connus et explorer des lieux encore inconnus ;
- b. dans le civil, il s'agit d'améliorer, avec des capteurs quantiques, les techniques d'imagerie médicale telles que les IRM et la tomographie, les techniques de détection et de modélisation de

phénomènes complexes (systèmes autonomes, systèmes environnementaux, outils d'observation spatiale).

**3. Les communications quantiques, avec la sécurisation de nos réseaux existants et l'anticipation des réseaux d'un « monde post quantique » :**

- a. dans le secteur militaire, remplacer urgemment les algorithmes de chiffrement existants basés sur la factorisation de nombres premiers ou sur les courbes elliptiques par des algorithmes résistants aux algorithmes de Shor et veiller à empêcher la collecte de données cryptées ;
- b. dans le civil, favoriser le dépôt de brevets français et européens sur les distributions de clés quantiques (QKD) afin de mieux anticiper les mutations des réseaux de connectivité et résister au monopole des réseaux dits « post-quantiques » que confèrent actuellement les brevets chinois et américains ;
- c. favoriser l'interopérabilité des clés de distribution quantique au service d'un futur réseau quantique européen terrestre et satellitaire via le projet européen EuroQCI et l'expertise des opérateurs télécom et des fournisseurs de solutions de sécurité.

**RECOMMANDATION 8**

Accélérer la production d'intergiciels (sur la base d'émulateurs ou de plateformes cloud existantes) pour tester des avantages quantiques en situation réelle. Pour cela, lancer un programme de partenariats public-privé, s'appuyant sur le centre HPC de *France Hybrid HPC Quantum Initiative* (HQI) financé par le PIA 4 afin de tester les usages bénéficiaires du quantique et sur l'appel à projet de Bpifrance « *Advanced Quantum Understanding: Implementing Large-Scale Applications* » (AQUILA), voué à diffuser les technologies quantiques dans les environnements industriels.

**RECOMMANDATION 9**

En parallèle du développement d'une offre stratégique telle que décrite dans la recommandation 7, démontrer aux acteurs financiers les avantages d'une offre quantique afin d'inciter à la création et au développement d'un écosystème applicatif dédié au quantique en Europe.

**Objectif 6**

Militer pour une gouvernance simple et agile adaptée à la maturité du secteur.

**RECOMMANDATION 10**

Passer de 6 à 2 instances de gouvernance de la stratégie quantique, l'une dédiée à la réflexion stratégique et l'autre à l'exécution opérationnelle, en confiant au Comité exécutif actuel (émanant des ministères concernés) la responsabilité totale de la stratégie quantique nationale et des financements à y allouer, et en fusionnant le Conseil Consultatif Scientifique et Technique avec le Comité Opérationnel de la stratégie nationale quantique, et l'utiliser pour renforcer la Coordination Nationale en la dotant ainsi d'un Comité d'exécution sur le modèle britannique.

**RECOMMANDATION 11**

Actualiser tous les deux ans la *roadmap* technologique pilotée par l'Académie des Technologies afin de permettre un ajustement des politiques technologiques dans le temps industriel.