

Les technologies quantiques

Etat des lieux et perspectives pour les entreprises

A retenir

- ▶ Les technologies quantiques ouvrent de nouvelles possibilités pour **calculer, mesurer et transmettre l'information**. Elles regroupent plusieurs domaines, dont le calcul quantique, les capteurs et les communications quantiques.
- ▶ **La France dispose d'atouts scientifiques et industriels**, avec un écosystème diversifié, de premières machines et des produits déjà commercialisés. Le principal défi consiste désormais à faire grandir les entreprises, à produire des équipements fiables à plus grande échelle et à trouver des débouchés commerciaux durables.
- ▶ **La compétition internationale repose sur des modèles différents**. Les États-Unis s'appuient sur de grands groupes et la Chine sur des investissements publics massifs dans la recherche. **La France mise sur un écosystème diversifié de jeunes entreprises, soutenu par la commande publique et la recherche**. Elle est présente dans plusieurs technologies, mais doit encore renforcer ses financements privés, sa production industrielle et sa force commerciale.
- ▶ **Pour les entreprises, les débouchés immédiats se situent surtout dans la fourniture d'équipements et de services** : machines, accès au cloud, capteurs ou intégration. Les gains liés à l'usage du calcul quantique restent à démontrer pour la plupart d'entre elles. Contrairement à l'IA, déjà utilisée pour améliorer la productivité, le quantique relève encore surtout de la recherche et de la préparation stratégique.

Introduction

- ▶ Les technologies quantiques s'appuient sur les découvertes de la physique quantique, développée au début du XX^e siècle par des scientifiques comme Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr et Louis de Broglie. Cette première révolution a rendu possibles des technologies aujourd'hui courantes, comme les transistors, les semi-conducteurs, les GPS et les lasers.
- ▶ Une deuxième révolution est en cours. Elle consiste à préparer, contrôler et mesurer des systèmes quantiques individuels, comme des atomes ou des photons. Elle ouvre des perspectives dans trois grandes familles de technologies : **le calcul quantique, les capteurs quantiques et les communications quantiques**.
- ▶ **Leur développement représente un enjeu industriel et de souveraineté**. Il concerne les entreprises qui conçoivent les systèmes quantiques, mais aussi celles qui leur fournissent les composants et équipements indispensables : dispositifs de cryogénie, composants optiques ou électronique de contrôle. **La maîtrise de ces technologies habilitantes conditionne la capacité à concevoir, produire et faire évoluer les systèmes quantiques**.
- ▶ **Les retombées économiques ne concerneront pas toutes les entreprises de la même manière**. Les premières utilisations pourraient bénéficier à des acteurs ayant des besoins de calcul ou de mesure très spécifiques, notamment dans la recherche, la pharmacie, l'énergie ou la défense. À la différence de l'IA, déjà mobilisable dans de nombreuses activités, le quantique devrait d'abord répondre à des besoins ciblés.
- ▶ **Le quantique soulève également un enjeu de cybersécurité**. Un ordinateur quantique suffisamment puissant pourrait fragiliser certains systèmes de chiffrement à clé publique et de signature numérique, mais pas tous les algorithmes de chiffrement. Les entreprises doivent donc

recenser les systèmes concernés et préparer, selon leur niveau de risque et la durée de confidentialité de leurs données, leur migration vers la cryptographie post-quantique (PQC).

- Enfin, les applications civiles et militaires des technologies quantiques leur confèrent un caractère dual. **Leur maîtrise engage ainsi la compétitivité économique, l'autonomie technologique et la sécurité nationale.**

Quelques repères technologiques

- La physique quantique décrit le comportement de la matière et de la lumière à très petite échelle: atomes, électrons et photons, les particules de lumière. Les technologies actuelles cherchent à contrôler ces objets individuellement pour exploiter leurs propriétés.
- Le qubit est l'unité élémentaire de l'information quantique. Un bit classique prend la valeur 0 ou 1 ; un qubit peut être préparé dans une superposition de deux états de référence. Lorsqu'on le mesure dans cette base, on obtient 0 ou 1, avec des probabilités dépendant de son état. La mesure est donc possible, mais son résultat est probabiliste : on ne lit pas toutes les réponses simultanément. Les qubits peuvent être réalisés à partir d'atomes, d'ions, de photons, de spins électroniques ou de circuits supraconducteurs. Le tableau ci-dessous présente cinq grandes approches.

Trois familles technologiques et un chantier transversal de cybersécurité

Domaine	Fonction	Situation et portée
Calcul et simulation	Traiter certains problèmes ou reproduire la dynamique d'un système quantique	Machines disponibles pour la recherche et l'expérimentation ; avantage utile à examiner problème par problème
Capteurs et métrologie	Mesurer le temps, la gravité, les champs magnétiques ou l'accélération	Des produits existent ; maturité variable selon la précision et les conditions d'utilisation
Communications	Distribuer des clés ou, à terme, relier des systèmes quantiques	Distribution quantique de clés (QKD) sur certaines liaisons ; réseaux quantiques généralistes encore en recherche.
Chantier transversal : cryptographie post-quantique (PQC)	Protéger les échanges et les signatures contre des attaques quantiques connues	Algorithmes exécutés sur des ordinateurs classiques ; standards disponibles et migration à organiser

Plusieurs voies pour construire un ordinateur quantique

- Les équipes de recherche utilisent différents supports pour fabriquer des qubits. Aucune approche ne s'est imposée pour l'ensemble des usages. La France explore plusieurs voies, ce qui lui permet de ne pas dépendre d'un seul pari technologique.

Technologie	Conditions et points de vigilance	Exemples internationaux	Exemples français
Qubits supraconducteurs	Réfrigération proche du zéro absolu ; contrôle du bruit et correction d'erreurs.	IBM, Google, Fujitsu	Alice & Bob

Technologie	Conditions et points de vigilance	Exemples internationaux	Exemples français
Ions piégés	Ions confinés sous vide ; contrôle des interactions et des erreurs.	Quantinuum	Non cité dans cette note
Atomes neutres	Piégeage et contrôle optiques ; infrastructure laser et passage à l'échelle.	Atom Computing	Pasqal
Photonique	Sources, circuits et détection de photons ; limitation des pertes optiques.	Xanadu	Quandela
Spins électroniques (propriété interne des particules)	Dans le silicium : recherche d'une fabrication compatible avec les semi-conducteurs. Les nanotubes de carbone constituent une approche distincte. Sensibilité au bruit et contrôle des qubits.	Intel	Quobly (silicium) ; C12 (nanotubes de carbone)

- ▶ La France est présente sur plusieurs approches du calcul quantique, dans une compétition internationale encore ouverte. Les composants, les logiciels et l'accès aux infrastructures constituent également des positions industrielles décisives ; la compétition ne se résume pas au nombre de qubits.

Stratégie française et positionnement dans la compétition internationale

- ▶ Dans le calcul, Pasqal et Quandela ont déployé les machines Ruby et Lucy au Très Grand Centre de calcul du CEA, pour les associer à un supercalculateur classique. Ces installations donnent accès à de véritables équipements d'expérimentation ; elles ne prouvent pas encore un gain économique généralisé.
- ▶ Dans les capteurs, Exail commercialise des gravimètres quantiques pour mesurer la pesanteur. Dans les communications, le projet FranceQCI construit des infrastructures de distribution quantique de clés. Les niveaux de maturité diffèrent donc sensiblement d'un domaine à l'autre.
- ▶ L'État soutient cette filière depuis 2021. En mai 2026, il a annoncé 1 milliard d'euros supplémentaire pour 2026-2030. Le programme PROQCIMA soutient cinq entreprises françaises et vise des prototypes de calculateurs capables de corriger leurs erreurs à horizon 2032. Il s'agit d'un objectif de développement, pas d'une capacité déjà disponible.

LA FRANCE FACE A SES PRINCIPAUX CONCURRENTS

- ▶ La compétition oppose des modèles différents. Les États-Unis disposent de grands groupes capables de financer le matériel, les logiciels et les plateformes d'accès. La Chine investit dans des programmes de recherche à grande échelle et a réalisé des démonstrations marquantes dans les communications satellitaires. La France a choisi un portefeuille diversifié de jeunes entreprises, appuyé par des commandes publiques et des infrastructures de recherche. Cette stratégie lui donne une place visible dans plusieurs technologies, mais l'écart de capital privé, de production industrielle et de puissance commerciale reste un défi.

Pays ou ensemble	Points forts et réalisations	Lecture pour la France
États-Unis	IBM et Google associent processeurs, logiciels et recherche sur la correction d'erreurs. IBM a annoncé en juin 2026 un engagement de plus de 10 Md\$ sur cinq ans.	Des concurrents dotés de puissants moyens industriels. Les entreprises françaises doivent aussi développer les logiciels et les usages autour de leurs machines.
Chine	L'USTC, une université de recherche, a démontré des performances de calcul sur des tâches spécifiques et des échanges de clés par satellite jusqu'en Afrique du Sud.	Une concurrence scientifique majeure et des réalisations fortes dans les communications. Ces résultats ne prouvent pas une supériorité sur tous les usages.
Autres pays européens	IQM, en Finlande et en Allemagne, commercialise des calculateurs supraconducteurs. Quantinuum dispose d'une implantation britannique et américaine dans les ions piégés.	Des concurrents, mais aussi des partenaires pour développer des infrastructures, des composants et des marchés européens.
Canada et Japon	Xanadu développe le calcul photonique au Canada. Fujitsu et RIKEN développent des processeurs supraconducteurs au Japon.	La compétition dépasse le duel sino-américain et concerne plusieurs voies technologiques.

- La France bénéficie d'une solide base scientifique et d'un écosystème industriel diversifié, qui lui permettent d'occuper une place de premier plan, avec de premières machines et solutions déjà commercialisées. L'enjeu est désormais de financer la croissance des entreprises, de fiabiliser la production des équipements et de développer les débouchés. La Commission européenne souligne elle aussi la difficulté à transformer les résultats de la recherche en succès commerciaux.

Une stratégie française volontariste

- Une première stratégie nationale quantique a été lancée en 2021. Dans son rapport publié en juillet 2026, la Cour des comptes en dresse un bilan globalement positif, tout en alertant sur la fragilité du passage à l'échelle industrielle face à la concurrence des États-Unis et de la Chine.
 - Une enveloppe initiale de 1,8 Md€, dont 1,5 Md€ de fonds publics, selon le périmètre retenu par la Cour des comptes ; ces montants annoncés ne constituent pas un bilan des décaissements.
 - L'émergence d'un écosystème crédible, associant recherche, startups et partenaires industriels.
 - Des financements significatifs, à distinguer des valorisations : Alice & Bob a annoncé une levée de 100 M€ en janvier 2025. Pour Pasqal, la valorisation retenue lors de l'annonce de son opération boursière, en mars 2026, était de 2 Md\$ avant apport de capitaux ; il ne s'agit ni du montant levé ni d'une capitalisation boursière actualisée.
- Le 22 mai 2026, la France a annoncé une enveloppe supplémentaire de 1 Md€ pour 2026–2030. Aux États-Unis, les lettres d'intention annoncées le 21 mai portent sur 2 013 millions de dollars pour neuf entreprises. Ces annonces ne sont pas directement comparables : leurs périmètres, leurs instruments et leurs calendriers diffèrent, et une intention de financement ne vaut pas décaissement.

- ▶ L'Union européenne articule recherche, infrastructures et industrialisation dans sa stratégie quantique. Les modalités et le calendrier du projet de Quantum Act restent à suivre.
- ▶ Le passage à l'échelle suppose aussi des financements privés de long terme. Dans un contexte où de grands acteurs, dont NVIDIA, développent leurs écosystèmes quantiques, les rapprochements industriels et l'accès aux marchés de capitaux peuvent accélérer la croissance des entreprises françaises, mais appellent une vigilance sur le contrôle des technologies et la localisation des activités. Pasqal est ainsi entré au Nasdaq le 28 août 2026, après son rapprochement avec un SPAC, société cotée créée pour réaliser une acquisition. Ce mode d'accès à la bourse ne dispense pas l'entreprise de ses obligations d'information financière.

Où se crée la valeur pour les entreprises ?

- ▶ L'IA et le quantique sont souvent regroupés sous l'étiquette de « technologies de rupture », mais leur logique d'adoption par les entreprises est très différente. L'IA est une technologie à diffusion horizontale : presque toutes les entreprises peuvent déjà trouver des usages, quels que soient leur taille et leur secteur. **Le calcul quantique est aujourd'hui beaucoup plus ciblé : il cherche à traiter certaines catégories de problèmes particulièrement difficiles pour les méthodes classiques.** Quelques centaines d'entreprises dans le monde travaillent déjà sur ces usages, mais on reste essentiellement dans une phase d'expérimentation, de préparation et de recherche de cas d'usage.
- ▶ **Pour ces entreprises, les débouchés immédiats se situent surtout dans la fourniture d'équipements et de services :** machines, accès aux capacités de calcul et capteurs. Les gains liés à l'usage du calcul quantique restent à démontrer pour la plupart d'entre elles. Contrairement à l'IA, déjà utilisée pour améliorer la productivité, le quantique relève encore surtout de la recherche et de la préparation stratégique.

Bénéficiaires possibles	Exemples de valeur recherchée	Maturité et prudence
Fournisseurs et intégrateurs	Matériel, logiciels, accès cloud, composants optiques, lasers, cryogénie, électronique de contrôle et accompagnement.	Marché déjà actif, porté par la recherche et les commandes publiques et privées. La rentabilité dépend encore de la croissance de la demande.
Chimie, pharmacie, matériaux	Simuler les interactions moléculaires pour mieux sélectionner des molécules, catalyseurs ou matériaux de batterie.	Piste prometteuse et expérimentation en cours. Une simulation quantique ne signifie pas encore un médicament découvert plus vite ou un matériau moins cher.
Énergie, transport et logistique	Étudier des matériaux et tester l'optimisation de certains horaires, itinéraires ou chaînes d'approvisionnement.	Les systèmes hybrides quantique-classique testent les sous-problèmes les plus difficiles. L'avantage face aux meilleurs algorithmes classiques reste à établir.
Finance, assurance, défense et télécoms	Explorer des scénarios de risque, améliorer certaines mesures ou sécuriser les échanges et les systèmes critiques.	Des essais existent. La migration vers la cryptographie post-quantique est le bénéfice de sécurité le plus immédiat ; elle n'exige pas d'ordinateur quantique.