Cour des comptes

ENTITÉS ET POLITIQUES PUBLIQUES

LE SOUTIEN À L'INFORMATIQUE QUANTIQUE : PREMIER BILAN ET PERSPECTIVES

Rapport public thématique

Juillet 2026

Sommaire

PROCÉDURES ET MÉTHODES **5**

SYNTHÈSE **9**

RECOMMANDATIONS **13**

CHIFFRES ET ÉLÉMENTS CLÉS **15**

INTRODUCTION **17**

CHAPITRE I UNE EXCELLENCE ACADÉMIQUE ANCIENNE CONJUGUÉE À L'ESPOIR D'UNE TECHNOLOGIE DE RUPTURE À MOYEN TERME **19**

I - L'HÉRITAGE D'UNE RECHERCHE ACADÉMIQUE À LA POINTE EN PHYSIQUE FONDAMENTALE BÉNÉFICIE AU QUANTIQUE **19**

A - Des prémisses du quantique à la diversification des applications 19
B - Des technologies de rupture avec trois grands domaines, l'informatique quantique étant la principale 20
C - La promesse et l'essor des travaux sur l'ordinateur quantique 21
D - Un secteur en pleine expansion 24
E - Un impact énergétique encore incertain 25

II - UN EFFORT DE COORDINATION ET DE GESTION DES CRÉDITS POUR PALLIER LEUR DISPERSION **29**

A - La stratégie nationale quantique (SNQ) : un pilotage pluriel impliquant des efforts de coordination 29
B - Les projets couvrent toute la chaîne de valeur et fédèrent l'ensemble des acteurs concernés 34

CHAPITRE II UN FINANCEMENT QUI REPOSE PRINCIPALEMENT SUR DES INVESTISSEMENTS NON PÉRENNES **39**

I - LES CRÉDITS DE FRANCE 2030, UNE PROCÉDURE BUDGÉTAIRE DÉROGATOIRE ET UN SUIVI CENTRALISÉ PAR LE SGPI **40**

A - Les financements non pérennes de France 2030, principale source de financement de l'informatique quantique 40
B - L'équilibre subtil entre subventions et avances remboursables 45

II - LES FINANCEMENTS COMPLÉMENTAIRES EN DEHORS DU BUDGET GÉNÉRAL **46**

A - Les aides fiscales aux entreprises (CIR/JEI/CII) 46
B - Un soutien régional marginal, compensé par des financements nationaux fléchés vers les régions 47
C - Les fonds européens, source complémentaire de financements pour l'ensemble de l'écosystème quantique français 48

CHAPITRE III UN SOUTIEN PUBLIC IMPORTANT SUR L'ENSEMBLE DE LA CHAÎNE DE VALEUR QUI NE PEUT COMPENSER LA FAIBLESSE DE L'INVESTISSEMENT PRIVÉ **55**

I - DES FORMATIONS VARIÉES QUI RÉPONDENT AUX BESOINS **56**

A - Les effets visibles des financements publics pour la formation initiale et continue 56
B - L'incertitude sur une partie des financements dès la rentrée 2028 obère les ajustements durables de l'offre de formation 59
C - Le secteur privé contribue au financement de la formation avec les thèses Cifre 61

II - UNE RECHERCHE PUBLIQUE AU MEILLEUR NIVEAU QUI ESSAIME DANS DES TECHNOLOGIES DIVERSIFIÉES 63
A - La recherche fondamentale, clé de voûte de l'écosystème 63
B - L'équilibre entre recherche dirigée et recherche exploratoire, un levier pour orienter les recherches tout en favorisant l'innovation 65
C - Un écosystème dynamique en dépit des limites des indicateurs 65

III - DE L'ÉCOSYSTÈME DU QUANTIQUE ÉMERGE UN TISSU INDUSTRIEL FRAGILE ET DÉPENDANT DES FONDS PUBLICS TANT QUE LE MARCHÉ N'EXISTE PAS ENCORE 69
A - Les fabricants de machines intégrées ne peuvent atteindre le stade industriel sans acheteurs 70
B - Les logiciels et applications de l'informatique quantique se développent en soutien des fabricants de matériel, mais restent dépendants de l'accès à une machine fonctionnelle 74
C - Les technologies habilitantes : un marché déjà lucratif et nécessaire pour la souveraineté 75

CHAPITRE IV L'INVESTISSEMENT LIMITÉ DE LA FRANCE PAR RAPPORT À SES PRINCIPAUX CONCURRENTS, À L'APPROCHE DE LA PHASE DE CONCENTRATION DES ACTEURS 77

I - LE POSITIONNEMENT DES PRINCIPAUX CONCURRENTS 77
A - La Chine et les États-Unis : des concurrents hors catégorie 77
B - Des concurrents internationaux agressifs, qui nouent des alliances sérieuses 80

II - LE RISQUE DE CAPTATION DE LA CONNAISSANCE ET DE L'INVESTISSEMENT PUBLIC SOUS-JACENT EXISTE MALGRÉ LES DISPOSITIFS DE VEILLE 82
A - Un enjeu majeur de souveraineté 82
B - L'impact de la capacité de financement des principaux concurrents dans une logique économique qui peut être qualifiée de « guerre d'attrition » 84
C - De nombreux autres risques de prédation existent 88

III - LA VOCATION DE LA FRANCE À DEVENIR UN PILIER EUROPÉEN DU CALCUL QUANTIQUE DANS UNE EUROPE DÉSORGANISÉE 90
A - Des financements tardifs et insuffisamment adaptés sur le plan économique 90
B - Des modalités de financement à renforcer 93

CONCLUSION GÉNÉRALE 97

LISTE DES ABRÉVIATIONS 101

ANNEXES 103

Procédures et méthodes

Les rapports de la Cour des comptes sont réalisés par l'une des six chambres thématiques que comprend la Cour[1] ou par une formation associant plusieurs chambres et/ou plusieurs chambres régionales ou territoriales des comptes.

Trois principes fondamentaux gouvernent l'organisation et l'activité de la Cour ainsi que des chambres régionales et territoriales des comptes, donc aussi bien l'exécution de leurs contrôles et enquêtes que l'élaboration des rapports publics : l'indépendance, la contradiction et la collégialité.

L'**indépendance** institutionnelle des juridictions financières et l'indépendance statutaire de leurs membres garantissent que les contrôles effectués et les conclusions tirées le sont en toute liberté d'appréciation.

La **contradiction** implique que toutes les constatations et appréciations faites lors d'un contrôle ou d'une enquête, de même que toutes les observations et recommandations formulées ensuite, sont systématiquement soumises aux responsables des administrations ou organismes concernés ; elles ne peuvent être rendues définitives qu'après prise en compte des réponses reçues et, s'il y a lieu, après audition des responsables concernés.

La **collégialité** intervient pour conclure les principales étapes des procédures de contrôle et de publication. Tout contrôle ou enquête est confié à un ou plusieurs rapporteurs. Le rapport d'instruction, comme les projets ultérieurs d'observations et de recommandations, provisoires et définitives, sont examinés et délibérés de façon collégiale, par une formation comprenant au moins trois magistrats. L'un des magistrats assure le rôle de contre-rapporteur et veille à la qualité des contrôles.

Sauf pour les rapports réalisés à la demande du Parlement ou du Gouvernement, la publication d'un rapport est nécessairement précédée par la communication du projet de texte, que la Cour se propose de publier, aux ministres et aux responsables des organismes concernés, ainsi qu'aux autres personnes morales ou physiques directement intéressées. Dans le rapport publié, leurs réponses sont présentées en annexe du texte de la Cour.

⁂

L'enquête dont est issue le présent rapport a résulté de la décision de la Cour des comptes de réaliser un audit coopératif avec l'institution supérieure de contrôle (ISC) allemande (*Bundesrechnungshof*). La définition du sujet s'est déroulée en plusieurs phases qui se sont étalées sur l'année précédant l'ouverture du contrôle.

Le choix de la thématique commune s'est porté sur le quantique dans un contexte marqué par l'intérêt de plusieurs institutions supérieures de contrôle pour le sujet. Le *Reckenkammer* des Pays-Bas préparait ainsi un audit sur l'administration néerlandaise face à la révolution quantique, qui a débouché sur la publication d'un rapport le 4 février 2026[2].

[1] La Cour comprend aussi la chambre du contentieux, dont les arrêts sont rendus publics.
[2] *Focus on quantum technology in central government*, *Netherlands Court of Audit*.

Les périmètres de l'enquête du BRH et de celle de la Cour des comptes ne sont pas identiques. La Cour des comptes a choisi de centrer ses travaux sur l'ordinateur quantique, selon une approche verticale visant à appréhender l'ensemble de la filière. L'enquête a ainsi porté sur la formation et le *continuum* de recherche (recherche fondamentale, recherche et développement (R&D), innovation) et sur le tissu industriel naissant de l'informatique quantique.

L'informatique quantique correspond à l'ensemble de la filière permettant la réalisation d'un ordinateur quantique (*cf.* l'annexe n° 2). Ce thème inclut donc les différentes solutions technologiques en *hardware*, la pile logicielle ainsi que les technologies habilitantes, c'est-à-dire nécessaires à la construction de la machine (par exemple les lasers et les cryostats). Les capteurs quantiques, la communication quantique ou la cryptographie post-quantique constituent d'autres technologies quantiques, qui ont été exclues du périmètre de l'enquête de la Cour. L'annexe n° 3 précise la méthodologie retenue pour identifier les projets et financements spécifiques au calcul quantique par rapport aux autres technologies quantiques.

L'ouverture de l'enquête a été notifiée aux administrations et organismes publics concernés par lettres en date du 10 septembre 2025. La date de remise du présent rapport a été fixée en cohérence avec les travaux réalisés en parallèle par le *Bundesrechnungshof* et le calendrier du dialogue franco-allemand sur les technologies quantiques. Ce dialogue est une initiative qui s'inscrit dans la continuité du conseil des ministres franco-allemand qui s'est tenu en août 2025. À échéances régulières, il réunit des représentants de l'écosystème quantique franco-allemand afin de favoriser les coopérations entre les deux pays.

Les rapporteurs ont conduit une soixantaine d'entretiens avec les représentants des principales administrations et organismes publics concernés, ainsi qu'avec un échantillon représentatif des entreprises du secteur.

La majeure partie des déplacements a été réalisée dans la région parisienne, où la concentration en acteurs de l'ordinateur quantique a permis aux rapporteurs de visiter des infrastructures et de rencontrer des acteurs aux profils variés. L'audit coopératif a également permis de réaliser des visites communes d'installations avec l'équipe d'instruction allemande. Les rapporteurs ont ainsi pu se rendre dans les régions de Bonn et de Munich pour rencontrer des acteurs allemands de l'ordinateur quantique.

Pour compléter ces contrôles sur place, des questionnaires ont été adressés aux administrations et organismes nationaux, ainsi qu'aux entreprises rencontrées en France. Une partie des réponses produites est couverte par le secret commercial et n'est pas publiée dans le rapport.

La consolidation de la totalité des financements alloués à l'informatique quantique s'est heurtée à la dispersion des dépenses réalisées par les établissements sur leurs fonds propres, en toute autonomie. Ainsi, il n'a pas été possible dans le temps imparti de collecter et d'expertiser les données de l'ensemble des formations de l'enseignement supérieur, ni des dépenses de recherche réalisées par toutes les écoles, universités et organismes nationaux de recherche (ONR). La Cour a donc procédé à une estimation de ces financements fondée sur les retours des principaux acteurs du secteur. Le choix a été fait d'affiner au mieux des ordres de grandeur réalistes consolidés par les organismes nationaux de recherche ou par quelques formations de l'enseignement supérieur, sans exploiter finement les informations précises au sein des différentes unités mixtes de recherche (UMR). Par ailleurs, certaines données fournies par des opérateurs de « guichet » concernant des projets réalisés au sein d'autres opérateurs offraient un niveau de détail insuffisant pour le degré de consolidation souhaité. Ces points sont signalés dans le rapport en éclairage des agrégats réalisés.

Les informations sur le secteur privé sont également fondées sur la méthode de l'échantillonnage, conduite en ciblant les principaux acteurs du secteur. Il n'a pas été possible de proposer une consolidation, ni même une estimation globale des financements privés, qui relève au demeurant souvent du secret des affaires, mais les travaux conduits permettent d'éclairer le lecteur sur les orientations structurantes.

Le projet de rapport a été préparé, puis délibéré le 20 mai 2026, par la troisième chambre, présidée par M. Meddah, président de chambre, et composée de MM. Mousson, Vallernaud, Montarnal, conseillers maîtres, Mme Anne Duclos-Grisier, conseillère maître, M. Jourdan, conseiller maître, de Mesdames Cauvet et Parravano, conseillères référendaires en service extraordinaire, et Mme Douay, vérificatrice, en tant que rapporteures et, en tant que contre-rapporteur, de M. Bouillon, conseiller maître en service extraordinaire.

Il a été examiné et approuvé, le 2 juin 2026, par le comité du rapport public et des programmes de la Cour des comptes, composé de Mme de Montchalin, Première présidente, M. Hayez, rapporteur général, Mme Camby, M. Meddah, Mme Mercereau, Mme Thibault, M. Lejeune, M. Cazé et M. Glimet, présidentes et présidents de chambre de la Cour, MM. Albertini, Vught, Roux, Mmes Daussin-Charpantier, Renet et Daam, présidentes et présidents de chambre régionale des comptes et Mme Hamayon, Procureure générale, entendue en ses avis.

⁂

Les rapports publics de la Cour des comptes sont accessibles en ligne sur le site internet de la Cour et des chambres régionales et territoriales des comptes : www.ccomptes.fr.

Synthèse

Les promesses de l'ordinateur quantique, enjeu majeur de souveraineté

Les technologies quantiques actuelles, issues de premières découvertes réalisées au début du XXème siècle, relèvent de plusieurs domaines très différents. Elles reposent toutes sur le comportement de la matière à l'échelle atomique. À cette échelle, en effet, les objets étudiés présentent des propriétés qui n'existent pas au niveau macroscopique, notamment la superposition d'états.

L'ordinateur quantique est l'une de ces technologies. Sa mise au point ouvre la perspective d'une avancée majeure dans le traitement de l'information en exploitant les principes de la mécanique quantique pour accomplir des tâches allant bien au-delà des capacités des ordinateurs classiques. Contrairement aux bits traditionnels, les qubits peuvent exister dans un état de superposition, ce qui leur permet de représenter simultanément 0 et 1. Cette propriété unique ouvre la voie à un calcul parallèle, dans le cadre duquel plusieurs solutions peuvent être explorées simultanément. De nombreux domaines requérant des calculs longs et complexes (simulations, chimie et mécanique, modélisation climatique, intelligence artificielle, transports, cryptographie, etc.) tireront profit de cette très importante amélioration des capacités de calcul. Les implications en matière de souveraineté sont majeures.

La recherche en informatique quantique recouvre aujourd'hui deux grands domaines (*cf.* l'annexe n° 2) :

- le *hardware*, ou plateforme : ces constructions matérielles doivent permettre la réalisation d'un processeur viable, capable de réaliser des tâches complexes rapidement et de façon fiable. Il existe aujourd'hui six grandes technologies concurrentes d'ordinateurs quantiques (parfois regroupées en cinq catégories), dont quatre sont explorées par des entreprises fondées en France. Les verrous technologiques qui subsistent ne permettent pas de déterminer aujourd'hui celle qui s'imposera[3] ;
- le *software*, ou pile logicielle : ce second domaine recouvre les travaux portant sur la création d'algorithmes ainsi que les *clouds*. Les recherches correspondantes sont conduites parallèlement à la réalisation des plateformes techniques.

Le périmètre de l'enquête de la Cour inclut les technologies nécessaires à la réalisation d'un ordinateur quantique, comme les cryostats ou les lasers. Celles de ces technologies qui sont indispensables au fonctionnement d'un tel équipement sont qualifiées d'habilitantes (l'annexe n° 3 précise la méthodologie retenue pour identifier les projets et les financements spécifiques au calcul quantique par rapport aux autres technologies quantiques).

Bien qu'en pleine expansion, la R&D en informatique quantique rencontre encore des obstacles nécessitant des interactions significatives avec des recherches plus fondamentales.

[3] Un glossaire figurant en annexe du rapport offre des précisions sur les principaux termes techniques du domaine.

Par de nombreux aspects, la marche vers l'ordinateur quantique s'apparente ainsi à la conquête spatiale ou à la maîtrise de l'atome. Les défis posés sont à la hauteur des bouleversements attendus.

Premier bilan : des succès fragiles

L'ordinateur quantique est d'ores et déjà une réalité : certains modèles sont commercialisés et les jalons des feuilles de route des principales entreprises sont tenus. Il est donc raisonnable de penser qu'un ordinateur de puissance suffisante émergera entre 2030 et 2035 alors même que subsistent encore aujourd'hui des verrous scientifiques et technologiques.

Le marché très étroit des ordinateurs quantiques implique cependant une rationalisation à l'échelle européenne des nombreuses *startups* du calcul quantique. En effet, ces dernières ne seront pas rentables et viables à l'échelle du seul marché français. Leur survie constitue néanmoins pour notre pays un enjeu de souveraineté, alors que la phase de concentration et parfois de prédation de ces entreprises a commencé.

La France a plusieurs atouts pour s'imposer dans le calcul quantique :

- elle bénéficie d'une recherche variée et performante, de formations de haut niveau, d'entreprises solides et compétitives dans trois technologies différentes, de quelques *startups* prometteuses dans deux autres technologies et dans les logiciels ainsi que d'une entreprise intégratrice dont une partie du capital est détenu par l'État. Les dispositifs de soutien public ont ainsi fait émerger un tissu de *startups* dynamique. Trois d'entre elles ont atteint un niveau de maturité technologique qui les place au seuil de la commercialisation et bénéficient d'une implantation internationale tant en termes de marché que de production. Le rapport Forteza[4] a toutefois souligné le paradoxe que constitue la coexistence de cette excellence académique et d'un investissement insuffisant dans la recherche fondamentale comme dans la recherche et développement (R&D) et l'innovation ;
- l'enquête a mis en évidence la qualité de la gestion des fonds alloués au quantique, grâce à une gouvernance centralisée et à une stratégie équilibrée, même si le rapport préconise un ajustement sur le volet logiciel et architecture. La stratégie nationale quantique (SNQ), suivie par le SGPI, structure l'effort national sur l'ensemble de la chaîne de valeur, de la recherche fondamentale jusqu'aux applications industrielles, avec un accent particulier sur l'informatique quantique. Sur la période de 2020 à 2025, elle a été dotée de 1,8 Md€ d'investissements, dont 1,5 Md€ de fonds publics, parmi lesquels 1 Md€ a été consacré à l'informatique quantique ;
- enfin la filière bénéficie du coût modéré de l'électricité en France par rapport à la moyenne des pays de la zone euro, ainsi que des choix technologiques relativement frugaux qui ont été faits en matière de consommation énergétique.

[4] *Quantique, le virage technologique que la France ne ratera pas*, rapport produit par Mme Paula Forteza, députée des Français de l'étranger, M. Jean-Paul Herteman, ancien PDG de Safran et M. Iordanis Kerenidis, directeur de recherche au CNRS, dans le cadre d'une mission parlementaire confiée à Mme Forteza par le Premier ministre, novembre 2019.

Cependant elle fait face à plusieurs vulnérabilités :

- la difficulté pour les entreprises à se capitaliser leur fait prendre du retard et pourrait en faire des proies pour les acteurs d'autres pays disposant de liquidités importantes. Plusieurs études ont souligné la difficulté de la France et de l'Europe à financer le « passage à l'échelle ». La fragmentation des marchés européens contribue à cette situation ;
- la filière française souffre également d'un déficit d'investissement privé, les acteurs privés européens ayant une aversion au risque plus importante que leurs homologues nord-américains. Si les soutiens publics étaient indispensables pour amorcer la phase d'impulsion, les montants nécessaires pour passer à la phase industrielle excèdent désormais les capacités financières de l'État. La mobilisation d'importants financements privés devient donc un enjeu crucial. Or il n'existe qu'un seul fonds privé français de capital-risque spécialisé dans le financement des technologies quantiques ;
- le succès de la filière repose également sur la coopération très forte entre recherche publique et recherche privée, recherche fondamentale et recherche appliquée. Cet équilibre vertueux est fragile et la question de la mise en place d'infrastructures performantes et partagées requiert également dès à présent une réflexion collective.

Perspectives : des arbitrages budgétaires et des choix stratégiques nécessaires

Au niveau européen, l'orientation des investissements sur la *midtech* plutôt que sur la *deeptech*[5] entretient un déficit durable d'investissement dans les technologies de rupture, qui sont pourtant celles dont l'impact économique est le plus fort sur le long terme. En effet, selon la loi des rendements décroissants, les technologies de rupture offrent des rendements nettement plus importants que les améliorations apportées à des technologies déjà maîtrisées. L'avantage comparatif de bénéficier d'un monopole sur une technologie de rupture, même pendant une durée assez brève, justifie donc de s'engager dans une véritable « course » à la réalisation de ce type d'innovation.

De fait, la compétition dans les technologies quantiques, et en particulier pour la production d'un ordinateur quantique qui soit rentable, est aiguë entre les grandes puissances industrielles. Tous les pays qui en ont les moyens financent des projets et ont formalisé une stratégie nationale quantique au cours des cinq dernières années. Les investissements publics et privés connaissent une accélération significative dans l'ensemble des pays développés, en parallèle de la courbe ascendante des dépôts de brevets.

Le Congrès américain a voté le 21 mai 2026 un soutien de 2 Md$ à l'informatique quantique en ciblant neuf entreprises. Le lendemain, à l'occasion d'un discours prononcé au Très grand centre de calcul (TGCC) sur le site du CEA à Bruyères-le-Châtel, le Président de la République a annoncé une nouvelle enveloppe de 1 Md€ pour investir dans l'ensemble des technologies quantiques *via* les fonds du plan *France 2030*, dont proviennent déjà la majorité des ressources allouées. Les modalités de mise en œuvre et la déclinaison opérationnelle de ce nouvel effort en faveur des technologies quantiques n'avaient pas encore été précisées à la date de finalisation du présent rapport.

[5] Fuest C., Gros D., Mengel PL., Presidente G., Tirole J. (2024), *EU Innovation Policy: How to Escape the Middle Technology Trap*, *EconPol. Policy Reports*. La *midtech*, ou technologie intermédiaire, désigne les équipements nécessitant un niveau de technologie bien maîtrisée, comme l'automobile. La *deeptech*, ou technologie de rupture, correspond à des innovations souvent issues de la recherche fondamentale, comme l'IA.

Pour l'heure, contrairement à d'autres pays, la France a fait le choix de l'autonomie stratégique en soutenant l'ensemble de la filière. Cependant, alors que ses ressources sont limitées, ce qui rend indispensable la mobilisation de capitaux privés, elle va devoir choisir entre trois voies budgétaires :

- maintenir les financements à leur niveau actuel et les sécuriser au-delà de 2025, voire 2030, au risque que le décalage avec des besoins grandissants n'aboutisse à la captation de la valeur créée par des entreprises étrangères ;
- augmenter les moyens alloués afin de soutenir la guerre d'attrition qui s'est engagée et éviter la prise de contrôle des entreprises ou l'exploitation des résultats publiés en recherche fondamentale par des pays concurrents. Cela suppose des choix difficiles, à réaliser au détriment d'autres politiques publiques, et reste conditionné au maintien de dispositifs ciblés pour éviter le saupoudrage ;
- réorienter les moyens alloués vers d'autres priorités en *deeptech* et donc assumer le risque d'une perte de souveraineté sur l'ordinateur quantique.

Ce choix devra être fait alors que l'ampleur des financements nécessaires n'est pas et ne sera pas compensée par l'intervention de l'Union européenne, malgré les annonces attendues dans le cadre du *Quantum European Act*, un projet de loi qui s'inscrit dans la continuité de la stratégie quantique européenne adoptée en 2025 par la Commission européenne.

Il serait pertinent de combiner les deuxième et troisième scénarios en nouant des partenariats avec des pays choisis. Cela suppose toutefois de soigneusement identifier les partenaires potentiels car nombreux sont ceux qui assument une intégration très forte avec les États-Unis ou dont le modèle repose sur des conceptions de la souveraineté différentes de celle de la France. Ainsi, la souveraineté peut être comprise prioritairement comme la création d'emplois sur le sol national ou avant tout comme une autonomie de décision.

On estime qu'environ 80 % des composants utilisés par les producteurs français d'ordinateurs quantiques sont issus du marché européen. Seuls les États-Unis et la Chine ont les moyens d'une autonomie stratégique, sur le territoire national, pour l'ensemble des technologies quantiques. La France doit donc envisager un ou plusieurs partenariats incluant un partage de la valeur, en étant vigilante sur l'équilibre de ce partage.

Comme les autres puissances moyennes, la France devra par ailleurs assumer un choix stratégique pour orienter le soutien public à la filière. Sur ce plan également, plusieurs options s'offrent à elle :

- celle de la spécialisation sur un segment particulier des technologies quantiques, voire du calcul quantique, qu'ont fait plusieurs États européens comme les Pays-Bas ou la Finlande ;
- le choix, retenu par le Royaume-Uni, consistant à se positionner sur une fonction de *hub* ;
- l'option d'une dépendance technologique assumée à l'égard d'un acteur extérieur dominant, vers laquelle s'orientent plusieurs pays à l'égard des États-Unis.

D'autres stratégies, non mises en œuvre à ce stade, sont sans doute imaginables. Cependant, tout soutien devra être réalisé en poursuivant un objectif stratégique clairement identifié afin que les financements publics consacrés à l'émergence d'une filière ne soient pas captés par d'autres puissances.

Recommandations

1. Veiller à ce que l'effort supplémentaire de financement du soutien de l'État à l'informatique quantique de 1 Md€, annoncé pour les cinq prochaines années, ait bien un effet de levier à travers le secteur privé et en renforçant la contribution du ministère des armées (*SGPI, ministère des armées et des anciens combattants, 2026*).
2. Dans le soutien apporté au secteur privé, augmenter le poids des avances remboursables par rapport aux subventions et recourir davantage à la commande publique au travers du programme *PROQCIMA* afin de faciliter la consolidation des entreprises (*SGPI, ministère des armées et des anciens combattants, 2026*).
3. Renforcer le suivi consolidé de tous les financements, transversaux par nature, tant dans leur destination que dans leur origine (*SGPI, 2026*).
4. Dès la rentrée 2027, renforcer l'offre de formation sur les volets « architecture », « correction d'erreurs » et pile logicielle, ainsi que sur l'articulation entre informatique classique et calcul quantique (*SGPI, ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'espace*).
5. Assurer un suivi exhaustif et à jour des entreprises du secteur stratégique du quantique en coordination avec le SGPI (*ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle, énergétique et numérique, 2026*).
6. Construire d'ici 2028 des partenariats industriels ciblés à l'échelle européenne, le cas échéant avec une spécialisation par pays, par exemple sur des technologies complémentaires (*SGPI, 2028*).

Chiffres et éléments clés

Stratégie nationale quantique 2021-2025

Gouvernance : pilotage par le SGPI

Investissement prévu : 1,8 Md€, dont 1,5 Md€ de fonds publics ; 86 % des fonds sont fléchés sur l'informatique quantique ; montant engagé au 31 décembre 2025 : 597 M€

Objectifs (*cf.* note interministérielle) :

- Développer les technologies et usages du calcul quantique ;
- Maîtriser les technologies de capteurs quantiques ;
- Développer et diffuser la cryptographie post quantique ;
- Développer les technologies de communications quantiques ;
- Maîtriser les technologies habilitantes du quantique.
- Nombre de projets : 40

Types de technologies et acteurs industriels

CEA, CNRS et INRIA

5 *startups* :

- Pasqal : développement de qubits à base d'atomes froids
- Quandela : développement de qubits à base de photons
- Alice & Bob : développement de qubits supraconducteurs résistant aux bruits (dits qubits de chat)
- Quobly : développement de qubits de spin sur silicium
- C12 : développement de qubits de spin dans des nanotubes de carbone

Formation

Programme *QuanTEduFrance* de la SNQ : subvention de 56,7 M€

37 programmes de master dont 13 consacrés aux technologies quantiques ; 1 061 étudiants au niveau Master en 2024-2025

23 universités partenaires

Post-doctorants financés par *France 2030* dans le cadre de projets relatifs à l'informatique quantique entre 2021 et 2025 sur le périmètre de l'Agence nationale de la recherche (ANR) : 124 (source : ANR, juin 2026) (68 à la fin de l'année 2024)

Thèses financées par *France 2030* dans le cadre de projets relatifs à l'informatique quantique entre 2021 et 2025 sur le périmètre de l'ANR (*a minima* à 50 %) : 255 (source : ANR, juin 2026) (183 à la fin de l'année 2024)

Autres investissements

ANR : 159 M€ sur les technologies quantiques dont 37,8 M€ sur l'informatique quantique ; 415 projets

DGA : 1,9 M€

Commande publique :

Programme *PROQCIMA* de la SNQ

5 *startups* engagées, contrat-cadre dont le montant maximum a été fixé initialement à 500 M€

Objectif initial : un ordinateur quantique tolérant aux fautes de 128 qubits logiques en 2032 étendu à 2048 qubits logiques en 2035

Objectif revu en mai 2026 : 1024 qubits logiques dès 2032

Introduction

L'excellence académique française en physique quantique est ancienne et a été récompensée par plusieurs prix Nobel, dont un en 2025, proclamée par l'ONU « année internationale de la science et de la technologie quantiques » (AIQ).

À la suite de la parution, le 13 janvier 2020, d'un rapport intitulé *Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas*[6], le Gouvernement a établi une stratégie nationale quantique (SNQ) pour la période 2021-2025. Cette priorité nationale a été dotée d'1,8 Md€ d'investissements, dont 1,5 Md€ de fonds publics, parmi lesquels 1 Md€ est consacré à l'informatique quantique. Pour gérer sa conception et son pilotage, un poste de coordinateur national a été créé au sein du secrétariat général pour l'investissement (SGPI). Ce positionnement est cohérent avec l'origine des financements, très majoritairement issus du plan d'investissement France 2030, dont les programmes budgétaires sont pilotés par le SGPI.

La SNQ s'appuie sur plusieurs outils complémentaires :

- une gouvernance interministérielle assure un suivi consolidé du déploiement des différents programmes et garantit la coordination des acteurs impliqués ;
- un programme et équipement de recherche (PEPR) consacré au quantique est doté de 142 M€ ; il est piloté par des organismes nationaux de recherche (le CNRS, le CEA et l'INRIA) ;
- des opérateurs spécialisés dans le soutien à la recherche publique (Agence nationale de la recherche) et au secteur privé (Bpifrance) mobilisent une palette d'aides (subventions, avances remboursables, prises de participation, etc.) à travers des appels à projet ;
- la commande publique, avec le programme PROQCIMA, doté de 500 M€, dont l'originalité réside dans l'organisation d'une compétition entre cinq entreprises sélectionnées pour leur capacité à produire un ordinateur quantique tolérant aux fautes de 1 000 qubits d'ici 2030.

Des financements complémentaires existent, provenant tant des régions (sous la forme de subventions) que de l'Union européenne (dans le cadre d'appels à projets). Toutefois leurs montants sont très réduits par rapport à ceux de la SNQ. De même, l'ANR et Bpifrance financent des projets sur des fonds distincts de ceux de France 2030, mais dans une proportion très limitée. Les établissements d'enseignement supérieur et les organismes nationaux de recherche contribuent aussi au soutien de la filière à travers les formations proposées et des laboratoires (il est complexe de retracer les financements correspondants, qui se situent en dehors de France 2030). Enfin, les entreprises bénéficient aussi de différents dispositifs qui constituent des dépenses fiscales pour l'État.

[6] Rapport produit par Mme Paula Forteza, députée des français de l'étranger, M. Jean-Paul Herteman, ancien PDG de Safran et M. Iordanis Kerenidis, directeur de recherche au CNRS, dans le cadre d'une mission parlementaire confiée à Mme Forteza par le Premier ministre, novembre 2019.

Dans le cadre de l'enquête, ciblée sur les usages civils de l'informatique quantique[7], dont est issu le présent rapport, la Cour s'est tout d'abord attachée à dresser un panorama des financements publics au bénéfice de l'informatique quantique, à la fois par contributeurs, par destinataires et par type de technologie. S'il est difficile d'établir l'équilibre optimal entre investissements publics et privés pour l'informatique quantique, le contexte de forte contrainte pesant sur les finances publiques impose de prêter une attention particulière à la répartition de ces financements (première partie).

La ventilation des financements, tant dans leurs instruments que dans la nature de leurs contributeurs, représente un possible levier d'ajustements. L'inadéquation entre l'horizon des financements sécurisés et les besoins constitue par ailleurs un sujet de préoccupation au regard des enjeux de souveraineté (deuxième partie).

Les résultats scientifiques et l'impact économique constituent un élément de performance pour évaluer ces investissements. Il s'agit d'apprécier rétroactivement l'effet d'entraînement du soutien public sur la filière et d'anticiper de possibles trajectoires (troisième partie).

Enfin, la Cour a examiné la question centrale de l'articulation de la stratégie nationale avec les actions de soutien déployées en Europe et dans les principaux pays développés (quatrième partie).

À la lumière de cet ensemble de constatations et analyses, le rapport envisage en conclusion plusieurs scénarios pour l'avenir[8].

[7] Les financements militaires n'ont été pris en compte que dans la perspective de ces usages civils.
[8] Un glossaire annexé au rapport offre des précisions sur les principaux termes techniques utilisés.

Chapitre I

Une excellence académique ancienne conjuguée à l'espoir d'une technologie de rupture à moyen terme

La perception des caractéristiques de la matière, à l'échelle atomique, distinctes de celles que nous expérimentons dans notre vie courante, repose sur des avancées scientifiques s'étalant sur une période d'un siècle. La France y a joué un rôle important et participe désormais au défi de l'ordinateur quantique. Les promesses du calcul quantique sont immenses : la maîtrise de cette technologie permettra d'optimiser les processus dans de nombreux domaines d'activité (les transports, la finance, la défense, etc.), mais également de simuler des systèmes complexes, ouvrant la voie à l'élaboration de nouveaux produits (matériaux, engrais, batteries, médicaments, etc.). Elle va aussi bouleverser la cryptographie, et donc la majorité des échanges protégés entre systèmes d'information. La mise au point de l'ordinateur quantique présente également de nombreux défis, notamment celui de la maîtrise de sa consommation énergétique.

I - L'héritage d'une recherche académique à la pointe en physique fondamentale bénéficie au quantique

A - Des prémisses du quantique à la diversification des applications

Née au début du XXe siècle, la physique quantique repose sur l'étude des objets à l'échelle atomique. À cette échelle, les objets présentent des propriétés qui n'existent pas au niveau macroscopique, comme la superposition d'états, l'intrication et une énergie quantifiée. Le terme quantique indique que certaines quantités physiques (comme l'énergie) ne peuvent prendre que des valeurs discrètes, c'est-à-dire limitées[9]. Le terme « mécanique quantique » est apparu après la notion de quanta, pour désigner la branche de la physique qui étudie ces

[9] Par exemple, le nombre de personnes dans une pièce est une valeur discrète, car limitée aux nombres entiers (entre 0 et la capacité maximale de la pièce). En revanche, la température de la pièce peut varier de manière continue entre 20°C et 30°C et il existe une infinité de valeurs possibles dans cet intervalle : c'est une valeur continue.

phénomènes à l'échelle atomique. Parmi les propriétés qui existent à l'échelle atomique, figure la superposition d'états : une particule peut représenter en même temps un 0 et un 1. L'intrication désigne le phénomène physique par lequel deux particules indépendantes deviennent liées si étroitement qu'on ne peut plus les décrire séparément. Elles changent d'état simultanément indépendamment de la distance qui les sépare[10].

Après les premières preuves expérimentales de la première moitié du siècle, les premières applications sont apparues telles que les lasers, les transistors dans les circuits intégrés, les GPS ou l'IRM. Elles ont permis l'essor des nouvelles technologies transformant déjà notre société lors de la première révolution quantique, manifestant une compréhension de la théorie sans en exploiter ses aspects les plus contre-intuitifs.

La recherche fondamentale française a joué un rôle avant-gardiste dans la seconde révolution quantique, comme l'ont montré l'attribution du prix Nobel de physique successivement à Claude Cohen-Tannoudji (1997), Serge Haroche (2012), Alain Aspect (2022) et enfin Michel Devoret (2025)[11]. En effet, à la fin du XXe siècle, la précision des expériences a permis aux chercheurs d'étudier et de contrôler la matière à un niveau encore plus élevé. Ils ont mis en évidence expérimentalement les aspects les plus contre-intuitifs de la physique quantique, comme l'intrication et la superposition d'états. Ces expériences reposent sur l'isolation et le contrôle des systèmes quantiques (atomes, photons, circuits supraconducteurs, spins d'électrons, etc.), rendus possibles grâce à des outils issus de la première révolution quantique, tels que les lasers et les cryostats[12]. En effet, les systèmes quantiques, de par leur sensibilité, restent difficiles à manipuler ; les contrôler nécessite de maîtriser un certain nombre de technologies annexes, dites habilitantes.

Cette recherche ouvre la voie à une seconde vague de technologies quantiques, utilisant ces nouvelles preuves expérimentales afin de concevoir des objets techniques aux applications variées reposant sur les propriétés de la matière. La transition de la recherche à l'innovation, qui s'accélère aujourd'hui, est en réalité l'aboutissement de plus de 40 ans de recherche de haut niveau. Ce transfert s'opère grâce aux promesses de ces nouvelles technologies, qui pourraient atteindre des performances bien supérieures à celles des technologies existantes, offrant un avantage stratégique non négligeable sur la scène internationale aux pays qui les maîtriseront.

B - Des technologies de rupture avec trois grands domaines, l'informatique quantique étant la principale

Derrière l'appellation générique « technologies quantiques » sont regroupées plusieurs technologies différentes. Une catégorisation en trois grands champs principaux émerge de la majorité des typologies utilisées, qui se fondent non pas sur les objets mais sur les usages.

[10] La corrélation instantanée se manifeste lors de la mesure d'une particule intriquée qui détermine immédiatement l'état de sa ou de ses partenaires sans délai apparent, même à des années lumières de distance. Le phénomène de non-localité semble défier les limites de la vitesse de la lumière, mais il ne permet pas de transmettre de l'information plus vite. Les expériences d'Alain Aspect dans les années 1980 ont démontré cette propriété.

[11] Bien que français, Michel Devoret, a obtenu son prix Nobel pour des travaux réalisés principalement aux États-Unis, où il a effectué la majorité de sa carrière, même s'il a aussi créé un groupe de recherche au CEA Saclay (groupe Quantronique) sur les circuits supraconducteurs.

[12] Les cryostats sont des appareils qui permettent de maintenir des températures très basses avec une grande stabilité.

La communication quantique vise, entre autres, le développement de réseaux sécurisés par cryptographie quantique et de télécommunications utilisant l'intrication quantique. Ceci inclut leurs sous-systèmes, dont les mémoires quantiques permettant une interconnexion entre systèmes quantiques, leurs architectures et les applications qui en découlent ainsi que l'ensemble des usages liés à la distribution d'information.

Le calcul quantique vise le développement de dispositifs physiques (*hardware*) ainsi que les algorithmes quantiques, les modèles de calcul, les applications et cas d'usage, les outils de certification et de vérification, les codes de correction d'erreurs, ainsi que l'hybridation entre les supercalculateurs et les processeurs quantiques (partie *software*). Est également incluse dans cette définition la simulation quantique, qui consiste à concevoir des systèmes quantiques afin de simuler les propriétés d'autres systèmes. Ces systèmes modèles s'appliquent donc à la simulation de nouveaux matériaux, de composés physico-chimiques ou de phénomènes physiques.

Les qubits – ou bits quantiques – sont les unités de base de l'information en informatique quantique. Contrairement à un bit classique, qui ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1), un qubit peut se trouver simultanément dans un état superposé de 0 et 1, grâce aux principes de la mécanique quantique. Cela permet d'effectuer des calculs plus complexes et parallèles.

Les capteurs et la métrologie quantiques visent le développement de systèmes quantiques offrant une précision accrue et un caractère réplicable augmenté. Cela inclut toutes les plateformes servant le domaine, tels que les systèmes d'imagerie innovants et non-invasifs (notamment pour la biologie et le médical), les senseurs inertiels pour le géo-positionnement et les géosciences, les systèmes photoniques permettant la métrologie des matériaux, les horloges atomiques, les capteurs de champs électromagnétiques, les systèmes optomécaniques, etc.

C - La promesse et l'essor des travaux sur l'ordinateur quantique

Le calcul quantique est la technologie qui permettrait le plus grand nombre d'avancées. Cependant elle est aussi à ce jour la moins mûre techniquement.

L'expression « calcul quantique » est davantage utilisée aujourd'hui que « informatique quantique ». Dans les deux cas, sont bien inclus les éléments matériels de l'ordinateur (*hardware*) mais aussi la pile logicielle (*software*) pour faire fonctionner la machine.

L'idée d'utiliser des ordinateurs quantiques afin de simuler des systèmes quantiques a été formulée pour la première fois par le physicien Richard Feynman en 1981. La promesse principale de cette machine est la démultiplication de la vitesse de calcul. Les ordinateurs quantiques utilisent des qubits qui, contrairement aux bits traditionnels, peuvent exister dans un état de superposition de 0 et 1 simultanément, et permettent ainsi une mise en parallèle et une accélération des calculs. Si l'augmentation de performance des bits classiques est linéaire, celle des qubits est exponentielle. On peut donc atteindre les mêmes performances qu'un ordinateur classique dans un temps beaucoup plus restreint, avec un nombre inférieur de qubits et rendre calculable un problème qui ne l'est pas avec un ordinateur classique. Il faut toutefois atteindre un seuil minimal pour concurrencer l'informatique classique. Ce seuil est fixé à une centaine de qubits, et les objectifs d'exploitation se situent davantage autour de 2 000 qubits. On parle

alors d'avantage[13] ou de suprématie quantique. L'objectif est à terme de réaliser des tâches qui nécessiteraient des centaines voire des milliers d'années pour les meilleurs supercalculateurs actuels.

Ces qubits peuvent être créés grâce à différents objets physiques - atomes, photons, circuits supraconducteurs, ions ou électrons, etc. - ouvrant la voie à plusieurs technologies de qubits, présentant chacune des avantages et inconvénients.

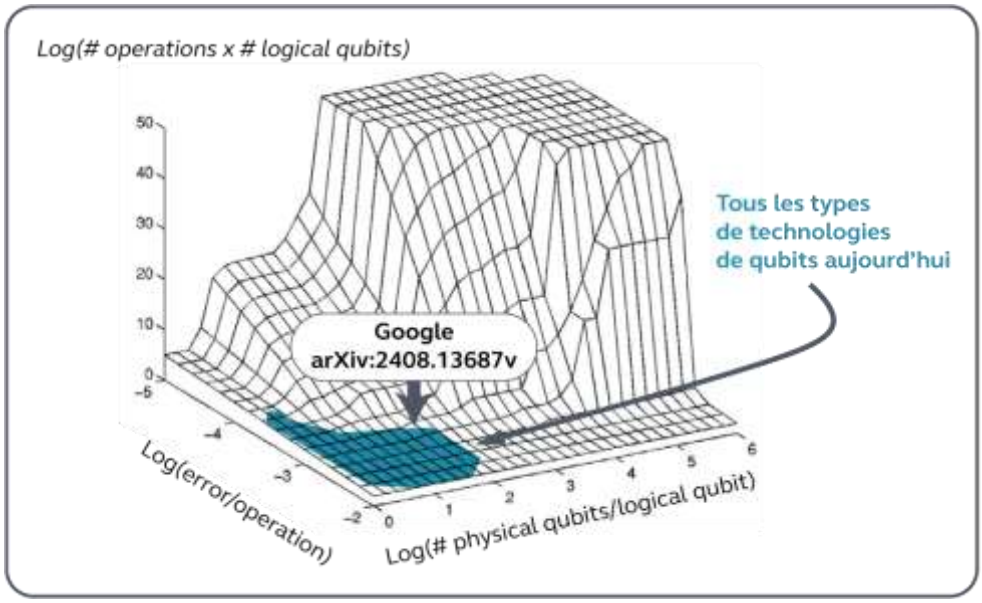
Les contraintes expérimentales existantes sont en effet particulièrement nombreuses : contrôler chaque qubit individuellement et maîtriser les interactions entre qubits, protéger les systèmes du bruit[14] extérieur tout en pouvant interagir avec eux, corriger les erreurs sans détruire les états quantiques, etc. Ces contraintes sont d'autant plus importantes que le nombre de qubits augmente, rendant d'autant plus difficile la conception de systèmes à grand nombre de qubits.

Le schéma ci-dessous permet de visualiser la difficulté des verrous à lever pour chaque étape des principales voies technologiques. Trois critères sont utilisés : sur l'axe des abscisses, il s'agit du nombre de qubits logiques atteint. Sur l'axe des ordonnées, figure la fiabilité des opérations réalisées à travers le taux d'erreurs. Enfin, l'axe des cotes indique la puissance de calcul. La cible, matérialisée par le plateau, est d'avoir un seuil minimal de qubits logiques avec un taux d'erreur minime, d'autant que les opérations sont répétées de nombreuses fois. Le degré de difficultés à lever est le même pour toutes les technologies, mais selon des escaliers aux marches plus ou moins raides. L'atteinte de l'objectif est encore lointaine pour toutes.

[13] L'avantage quantique représente la résolution d'un problème par un ordinateur quantique de manière plus rapide, plus efficace ou nécessitant moins de ressources (énergétiques par exemple) qu'un superordinateur. La suprématie quantique sera atteinte lorsque ces ordinateurs quantiques pourront effectuer des calculs hors d'atteintes de n'importes quels supercalculateurs.

[14] Il peut s'agir d'ondes électromagnétiques, de vibrations ou de perturbations thermiques liées à la température, et de toutes formes d'interférences qui conduisent, par leur énergie, à la décohérence des qubits.

Schéma n° 1 : performance des ordinateurs quantiques



Source : CEA 22.11.2024, adapté de A. M. Steane, Phys. Rev. A 68, 042322 (2003). Sont pris en compte la puissance de calcul, les erreurs et le nombre de qubits.

Contrairement à l'intelligence artificielle (IA), l'informatique quantique n'offrira pas ou peu d'applications à ce stade dans la vie quotidienne. En effet, les consommateurs n'auront pas directement accès à la capacité de calcul quantique. En revanche l'essor de l'informatique quantique aura un impact certain et extrêmement puissant pour les acteurs industriels et les organismes de recherche, auxquels l'utilisation de calculateurs à haute performance permettra de développer des cas d'usages précis, avec des applications dont bénéficiera la population dans sa vie quotidienne : nouveaux médicaments et matériaux, optimisation de chaînes logistiques ou de réseaux, par exemple.

Après sa formalisation théorique et la découverte des premiers algorithmes quantiques qui permettraient de réaliser des calculs inaccessibles à l'ordinateur classique dans les années 1990, les acteurs de la recherche se sont lancés dans la conception des premières briques d'un ordinateur avec la création des premiers qubits, sans aucune prétention de fabriquer un ordinateur quantique.

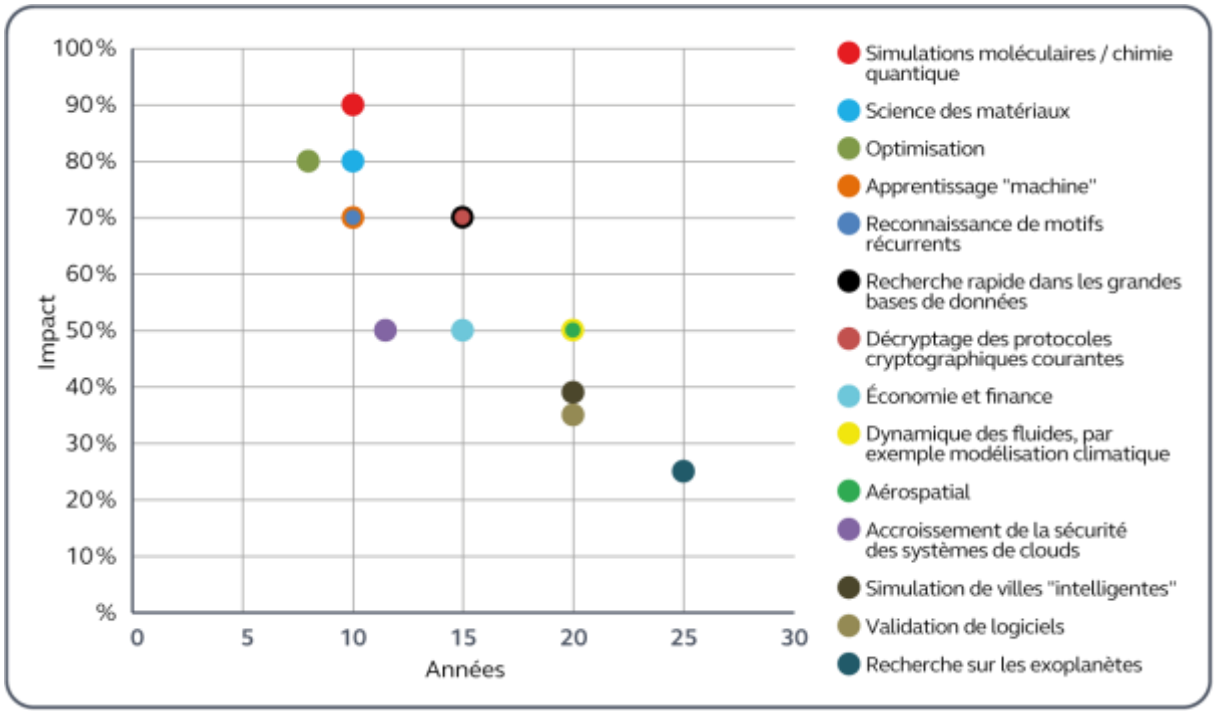
Parmi les algorithmes quantiques fondateurs, créés bien avant le projet même d'un ordinateur, on peut citer les algorithmes de Grover, Deutsch-Josza et le plus connu, l'algorithme de Shor, qui permettrait de casser le cryptage RSA, utilisé notamment par l'ensemble du système bancaire mondial actuel[15].

Les algorithmes d'optimisation seraient aussi particulièrement améliorés, trouvant des applications dans le domaine des transports, de la finance, de la défense, etc.

[15] Le cryptage RSA est utilisé par les entreprises, les fournisseurs de services Internet, les fabricants de matériel, les développeurs d'applications sécurisées et les utilisateurs finaux pour protéger les échanges de données sur Internet (sites web sécurisés de type https, communications électroniques, signatures numériques, systèmes d'authentification).

La simulation de systèmes complexes permettrait de modéliser de nouveaux matériaux et de nouvelles molécules, ce qui permettrait d'améliorer notamment la performance des batteries, de découvrir de nouveaux engrais et médicaments ou encore d'améliorer notre conception de la physique des particules et des problèmes à plusieurs corps.

Graphique n° 1 : estimation en 2018 de la maturité des applications de l'ordinateur quantique



Source : The Impact of Quantum Technologies on the EU's Future Policies. Part 3 Perspectives for Quantum Computing, Joint Research Centre (JRC), 2018. Lecture : sur l'axe des ordonnées l'importance des applications du calcul quantique, et en abscisse l'échelle de temps estimée pour leur déploiement, en sachant que T0 correspond à 2018 et que si l'analyse n'a pas été mise à jour, ces délais semblent toujours réalistes, comme en témoignent les brevets en chimie et en pharmacie sur les trois dernières années.

À l'aube des années 2010, l'espoir de pouvoir contrôler suffisamment précisément les qubits pour effectuer des calculs est passé d'une vision lointaine à une possibilité à moyen terme, poussant des acteurs académiques puis industriels à lancer la course à l'ordinateur quantique.

D - Un secteur en pleine expansion

La crédibilité de jalons technologiques, partagée par les acteurs économiques, est une condition essentielle de l'accélération des investissements. Un certain nombre de jeunes pousses ainsi que les grandes entreprises du numérique cherchent, depuis les années 2010, à atteindre les premiers cette rupture technologique qui leur procurerait un avantage stratégique. Les démonstrations expérimentales majeures, notamment à travers les annonces volontaristes d'IBM et de Google, ont contribué à accélérer les investissements ces dernières années, avec des feuilles de route visant à obtenir un avantage quantique dans moins de dix ans.

L'augmentation récente des investissements dans le calcul quantique, de 180 % à l'échelle mondiale entre le premier semestre 2024 et le premier semestre 2025, s'est traduite

dans de nombreux pays par la mise en place d'une stratégie nationale quantique[16]. Le livre blanc 2025 *Quantique et cybersécurité* a estimé le marché de l'informatique quantique à environ 1,1 Md€ début 2025 et entre 8,7 et 13 Md€ d'ici 2035. Cela témoigne d'un point d'inflexion dans la course aux technologies quantiques. Face à ses compétiteurs, la souveraineté de la France repose sur la sécurité de ses approvisionnements et sur la solidité d'une filière industrielle dont le marché est estimé à près de 100 Md€ à l'horizon 2035[17]. L'engagement du soutien public dans ce but est donc stratégique.

Le Royaume-Uni a procédé à des estimations pour sa propre économie à l'occasion de l'actualisation de son plan quantique, annoncée le 17 mars 2026. Il prévoit ainsi une augmentation de sa productivité de 7 % au cours des vingt prochaines années. Il espère la création de 100 000 emplois, et un impact économique de 212 Md£, soit l'équivalent du PIB du Pays de Galles et de l'Irlande du Nord.

Les feuilles de route initiales ayant été respectées, la frontière entre ambition et réalisme pour les prochaines étapes, particulièrement ambitieuses, est ténue. Les premières réalisations ont rassuré les investisseurs sur la crédibilité des entreprises et légitimé leurs demandes de financement. Toutefois, certaines *startups* estiment que les jalons fixés sont inatteignables à aussi court terme. La méconnaissance des capacités scientifiques par la majorité des investisseurs est exploitée par toutes les entreprises du secteur, qui formulent les mêmes promesses calendaires pour obtenir des financements. En effet, les financements sont synonymes de gain de temps pour prendre de vitesse les concurrents.

E - Un impact énergétique encore incertain

L'une des promesses de l'ordinateur quantique, la frugalité énergétique, est particulièrement sujette à caution. Alors que l'essor des *Large language models* (LLM)[18] et des centres de données soulève la question de la soutenabilité environnementale, la consommation énergétique des ordinateurs quantiques doit aussi être une préoccupation, d'autant que le calcul quantique ne se substituera pas mais s'ajoutera aux technologies classiques particulièrement consommatrices d'énergie, qu'ils conforteront. En effet, les super-ordinateurs fonctionneront toujours, tandis que les ordinateurs quantiques seront affectés à des tâches spécifiques, pour lesquelles ils apportent un avantage. Les deux technologies seront donc complémentaires. Un domaine de l'informatique quantique explore d'ailleurs cette hybridation.

Évaluer la consommation de cette technologie est complexe. En effet, la technologie n'est pas encore mûre et des améliorations assez importantes restent à prévoir, notamment en termes de consommation énergétique. L'ensemble des technologies habilitantes fait dès à présent l'objet de nombreuses recherches. Ainsi, l'électronique de contrôle des processeurs IBM nécessite environ 100 W par qubit mais pourrait passer sous le seuil du Watt dans les années à venir. Des améliorations similaires sont à prévoir pour les lasers ou les cryostats.

[16] *Q1 2025 Quantum Technology investment*, The Quantum Insider, 2025.
[17] *The Year of Quantum: From concept to reality in 2025*, McKinsey, 2025.
[18] Il s'agit des modèles d'entraînement des intelligences artificielles. Plus le modèle est large, plus l'entraînement est coûteux, mais les performances attendues sont aussi plus importantes.

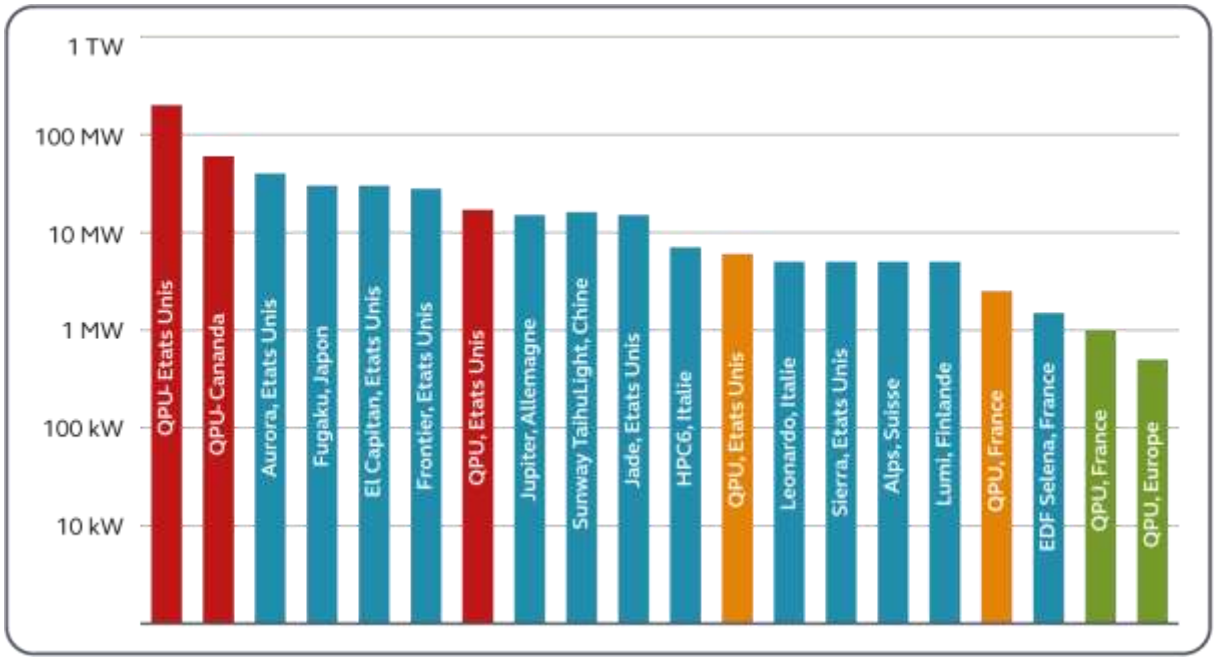
Par ailleurs, il existe différentes technologies, avec des niveaux de consommation énergétique variables et une répartition différente des coûts de consommation énergétique. À titre d'exemple, les processeurs actuels d'IBM nécessitent une puissance de 25 kW alors que le système à l'échelle excèdera certainement le mégawatt. À titre de comparaison, la *startup* française Alice & Bob prévoit pour son système à l'échelle une puissance de 116 kW, soit dix fois moins. Toujours selon la feuille de route d'IBM, ses dispositifs à l'échelle devraient dépenser en énergie 20 % pour le refroidissement et 80 % pour l'électronique de contrôle. La technologie des qubits utilisée par Alice & Bob est en revanche économe en électronique de contrôle.

Les centres de calcul à haute performance, qui utilisent des super-ordinateurs, offrent le premier axe de comparaison afin d'extrapoler l'impact énergétique de l'ordinateur quantique. En effet, c'est la technologie actuelle sur laquelle l'impact de l'ordinateur quantique sera le plus notable et c'est autour d'elle que s'articuleront ces nouvelles machines :

- les meilleurs super-ordinateurs classiques requièrent aujourd'hui une puissance électrique comprise entre 20 et 40 MW pour fonctionner, soit l'équivalent de la consommation de 40 000 foyers sur un an ;
- le processeur quantique actuel de Pasqal, qui a démontré sa capacité à fonctionner avec une centaine de qubits, nécessite une puissance d'environ 2,6 kW, contre 7 kW pour son concurrent américain QuEra. La moitié de cette consommation provient des lasers, le reste étant réparti entre l'électronique et le contrôle de l'environnement ;
- pour la technologie des ions piégés, aucun chiffre n'a été annoncé mais la puissance des processeurs actuellement utilisés atteindrait une dizaine de kW ;
- les processeurs actuels de Quandela (photonique) ont une puissance d'environ 3 kW et l'entreprise assure que celle de l'ordinateur à l'échelle ne dépassera pas à terme un mégawatt ;
- la technologie des qubits de spins n'est pas encore suffisamment avancée pour que des chiffres fiables et concrets puissent être fournis.

Il est donc difficile de se prononcer actuellement sur la technologie offrant la plus grande sobriété énergétique, chaque technologie étant trop différente et les systèmes n'étant pas encore à l'échelle.

Graphique n° 2 : consommation énergétique des différents supercalculateurs comparée aux annonces des différents fournisseurs d'ordinateurs quantiques



Source : Understanding Quantum Technologies, Olivier Ezratty, 2025. Les couleurs indiquent selon un gradient, les principaux seuils de consommation énergétique, de très élevé (rouge) à modéré (vert) pour les principaux constructeurs d'ordinateur quantique, toutes technologies confondues.

Les dépenses d'énergie nécessaires pour permettre aux machines de fonctionner vont augmenter avec le nombre de qubits, selon une échelle qui demeure incertaine. Toutefois, entre l'ordinateur à 100 qubits d'aujourd'hui et la cible d'une machine de 1 000 qubits, l'orientation à la hausse est inévitable tant pour le fonctionnement que pour la production des équipements, et ce malgré les économies d'échelle.

Par ailleurs, comme indiqué *supra*, les ordinateurs quantiques permettront de compléter les superordinateurs classiques, et non de les remplacer. Ils vont donc susciter des dépenses énergétiques additionnelles et non un renouvellement du parc. En effet certaines applications resteront hors de portée de cette nouvelle technologie. Ainsi, dans la mesure où il ne se substituera pas aux usages actuels mais permettra la résolution de nouveaux problèmes, il est peu probable que l'ordinateur quantique apporte un réel avantage énergétique, en termes de consommation, par rapport aux ordinateurs actuels. Au contraire, il peut même ouvrir de nouveaux champs de calcul pour ces ordinateurs classiques, et donc développer la consommation électrique. Seul le raccordement des futurs ordinateurs quantiques au réseau électrique peut être une source de préoccupations.

La consommation énergétique annoncée comme minime des acteurs européens peut devenir un argument de compétitivité économique lorsque, avec l'accroissement du parc d'ordinateurs quantiques, la demande sera plus importante. En effet, certains acteurs extra-européens prévoient pour leurs ordinateurs quantiques des consommations énergétiques qui ne seront ni acceptables, ni viables économiquement. Selon certaines prévisions, la consommation énergétique de ces nouveaux équipements se situera bien au-delà de celle des super-ordinateurs actuels. La question des rendements économiques se posera alors et, pour une

question de taille de marché, ces acteurs ne pourront pas subsister. Le mix énergétique de la France, centré sur le nucléaire et les énergies renouvelables, offre des perspectives stables alors que le coût des énergies fossiles, offre une trajectoire incertaine.

À défaut d'économies directes, le calcul quantique devrait emporter une réduction indirecte de la consommation énergétique qu'il est complexe de quantifier. En effet, même si la réduction de l'empreinte carbone de l'informatique classique à travers son remplacement n'est pas le propos de l'ordinateur quantique, et si aucune économie globale n'est à prévoir, le calcul quantique pourra sans doute, à condition que toutes ses promesses se concrétisent, apporter des solutions aux enjeux énergétiques, en résolvant des problèmes d'optimisation énergétique ou en faisant émerger des nouveaux matériaux.

À titre d'exemple, la simulation de semi-conducteurs permettra sûrement de réduire les dépenses énergétiques du secteur du numérique, grâce à une sobriété accrue. À l'heure actuelle, les QPU[19] n'offrent pas d'avantage en termes de consommation énergétique par rapport au calcul haute performance (HPC). Les ordinateurs quantiques doivent plutôt être envisagés comme une technologie complémentaire, dont la valeur potentielle repose principalement sur les nouvelles applications qu'ils pourraient rendre possibles, plutôt que sur une réduction directe des coûts énergétiques.

Par ailleurs, l'effet rebond, ou paradoxe de Jevons, prévoit que l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une technologie peut entraîner une augmentation plutôt qu'une diminution de la consommation globale d'énergie. En effet, les gains d'efficacité réduisent les coûts d'utilisation d'une nouvelle technologie, ce qui incite à une utilisation accrue de cette technologie. La généralisation de la machine à laver en remplacement du lavoir a conduit à une amélioration de l'hygiène plutôt qu'à des économies de temps et d'énergie pour les tâches lavandières. Le temps et l'énergie économisés ont été réalloués à d'autres tâches, augmentant la consommation totale d'énergie. De la même façon, l'ordinateur quantique améliorera la vie quotidienne de nos concitoyens, même indirectement (médicaments, matériaux, prévisions, etc.), mais au prix d'une dépense énergétique accrue, qu'il conviendra de limiter pour des raisons tant environnementales que de compétitivité économique.

Afin de répondre à ces questions, le plan France 2030 finance un projet d'optimisation de la consommation énergétique de l'informatique quantique qui a donné lieu à un accord en 2024 entre Bpifrance, EDF, les *startups* du quantique Quandela et Alice & Bob, ainsi que le CNRS. D'autres projets de la stratégie nationale quantique considèrent l'aspect durable de la technologie tels que :

- le projet *MetriQs*, qui a pour objet la construction d'étalons quantiques énergétiques compatibles avec toutes les technologies ;
- l'un des volets du projet HQI, qui prévoit d'étudier la consommation énergétique des processeurs à court terme ;
- le projet *Cryonext*, qui vise à construire de nouveaux cryostats plus efficients.

[19] *Quantum processing unit*, le QPU est l'unité de traitement quantique utilisant des qubits pour résoudre des problèmes complexes à l'aide de la mécanique quantique.

En outre, des acteurs français sont à l'origine de la *Quantum Energy Initiative*, qui vise à structurer une communauté autour des aspects énergétiques des technologies quantiques. Elle a été co-fondée en août 2022 par Alexia Auffèves (CNRS), Olivier Ezratty (consultant), Janine Splettstoesser (université Chalmers) et Robert Whitney (CNRS), à la suite d'un article d'Alexia Auffèves[20].

Au regard de l'importance des enjeux liés à cette technologie de rupture et du volume de financements publics alloués, une grande attention a été portée à la conception et au suivi d'une stratégie nationale.

II - Un effort de coordination et de gestion des crédits pour pallier leur dispersion

La politique nationale en matière de technologies quantiques s'organise principalement autour de la stratégie nationale quantique (SNQ) et du Programme et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) Quantique, deux dispositifs complémentaires inscrits dans le cadre du plan d'investissement France 2030. Dotée de moyens financiers significatifs, la SNQ structure l'effort national sur l'ensemble de la chaîne de valeur, de la recherche fondamentale jusqu'aux applications industrielles, avec un accent particulier sur l'informatique quantique. En son sein, le PEPR Quantique constitue le pilier central consacré à la recherche, en assurant la coordination des acteurs scientifiques et en contribuant à la production de connaissances et aux premières avancées technologiques, en étroite articulation avec les autres instruments de la stratégie.

A - La stratégie nationale quantique (SNQ) : un pilotage pluriel impliquant des efforts de coordination

La stratégie nationale quantique (SNQ) s'inscrit dans le cadre du plan France 2030. Lancé en janvier 2021 dans la continuité du programme d'investissement d'avenir (PIA), France 2030 est un dispositif exceptionnel piloté par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), visant à accompagner la transformation économique, technologique et sociétale de la France. Il est doté d'un budget global de 54 Md€.

La SNQ, dotée de 1,8 Md€ dont 1,5 Md€ de fonds publics, constitue l'un des volets majeurs du levier quatre de France 2030 (*Maîtriser les technologies numériques souveraines et sûres*). En son sein, l'informatique quantique représente une priorité particulièrement structurante, concentrant environ 86 % des crédits engagés.

La SNQ répond d'abord à un enjeu majeur de souveraineté technologique : les pays qui maîtriseront l'informatique quantique disposeront d'un avantage déterminant. La France a pour but de ne pas manquer la rupture de la « deuxième révolution quantique » et s'est fixé trois objectifs principaux :

[20] *Quantum Technologies need a quantum energy initiative*, Alexia Auffèves, juin 2022

- développer un ordinateur quantique pilote d'ici 2030, capable de résoudre des problèmes hors de portée des supercalculateurs actuels ;
- maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur, des qubits aux technologies habilitantes, en passant par la couche logicielle et algorithmique ;
- s'appuyer sur des champions nationaux, avec en tête de file les différents organismes nationaux de recherche (ONR) concernés par le sujet (CNRS, CEA et INRIA) ainsi que les différentes *startups* françaises qui émergent.

La stratégie vise également à structurer une véritable filière industrielle souveraine du quantique. Elle soutient donc la recherche fondamentale tout en accompagnant l'émergence d'entreprises innovantes et intègre des acteurs industriels bien établis.

Un enjeu essentiel concerne les compétences et la formation. Pour répondre aux besoins croissants en talents et former les futurs chercheurs, ingénieurs et techniciens du quantique, la SNQ comprend un volet spécifique, dénommé QuanTEdu-France, déployé dans le cadre de l'appel à projets Compétences et métiers d'avenir (CMA)[21] pour renforcer l'offre de formation et structurer une filière d'expertise durable.

Les principaux programmes de la SNQ sont :

- *AtomQtrl*, qui industrialise de nouveaux types de lasers nécessaires pour la manipulation des atomes ;
- *CryoNext*, dont l'objectif est d'industrialiser de nouveaux systèmes de refroidissement cryogénique. Cela nécessite, selon les cas, une part de recherche importante avant la maturation du produit ;
- *ASIS*, qui a pour objet de garantir un approvisionnement stratégique en matières premières critiques pour les technologies quantiques ;
- *HQI Acquisition*, qui vise à réaliser l'achat public de machines NISQ afin de les intégrer au supercalculateur hébergé par le CEA (très grand centre de calcul de Bruyères le Châtel) ;
- *HQI R&D*, qui regroupe plusieurs projets de recherche en informatique quantique pour la plateforme de calcul hybride quantique portant sur la pile logicielle, avec un souci applicatif plus marqué que pour les projets ciblés sur le *software* du PEPR ;
- *Q-Loop*, qui est un programme collaboratif de R&D pour l'ordinateur quantique à large échelle portant notamment sur l'électronique de contrôle et la cryo-électronique ;
- *PROQCIMA*, qui est un partenariat d'innovation dont les premières étapes sont encore à des niveaux de TRL[22] bas et relèvent donc de la recherche, bien que ce programme soit porté par cinq *startups* du calcul quantique ;
- *METRIQS* qui est axé sur la métrologie et le *benchmarking* du calcul quantique afin de protéger les avancées technologiques par la définition de métriques validées à l'international ;

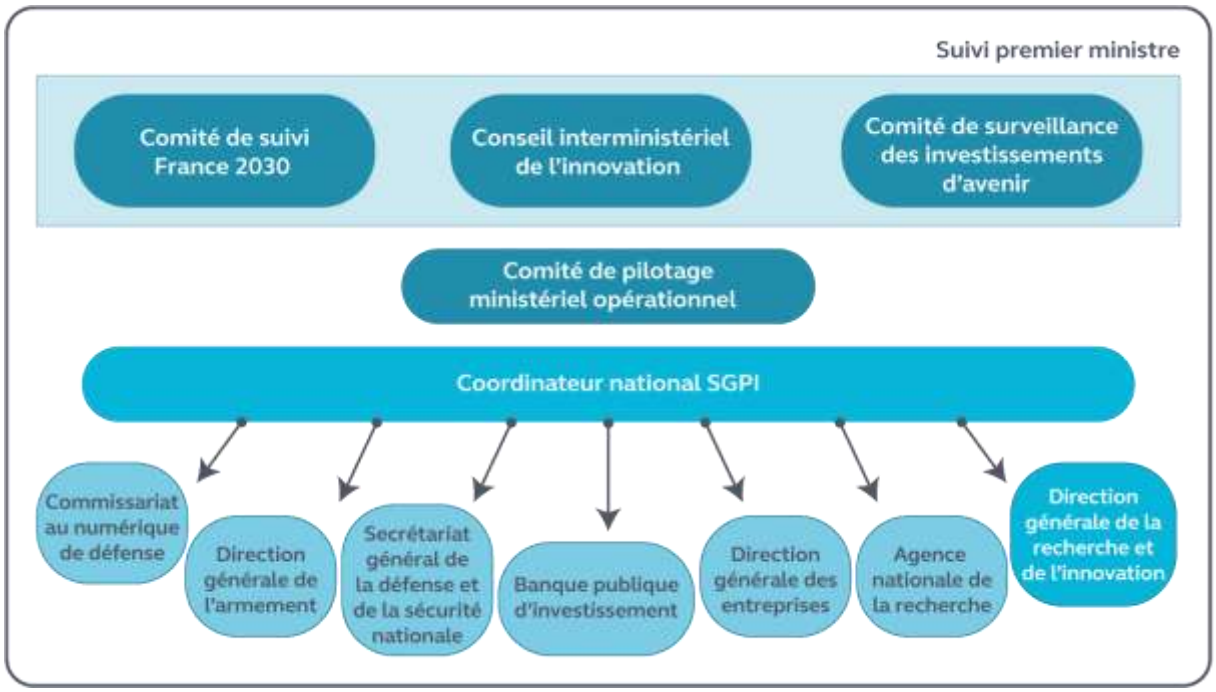
D'autres projets de type *i-Nov* ou *i-Démo* contiennent aussi une part de recherche importante.

[21] L'appel à manifestation d'intérêt *Compétences et métiers d'avenir* (AMI CMA) s'inscrit dans le cadre des objectifs et leviers de France 2030. Il vise à répondre aux besoins des entreprises et des institutions publiques en matière de formation, d'ingénierie de formation, initiale et continue, et d'attractivité des formations, pour permettre l'acquisition des compétences nécessaires aux métiers d'avenir de France 2030.

[22] TRL : L'échelle TRL (*Technology Readiness Level*), ou niveau de maturité technologique en français, est une méthode de classification qui permet d'évaluer le degré de développement d'une technologie. *Cf* l'annexe n° 5.

La gouvernance interministérielle du plan d'investissement France 2030 mobilise plusieurs ministères au sein de différentes instances : le Conseil interministériel de l'innovation (C2I) et le Comité France 2030, présidés par le Premier ministre, sont les instances d'arbitrage budgétaire et de suivi des résultats du plan. Le C2I s'appuie sur un Comité exécutif (Comex) piloté par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) pour organiser et coordonner l'exécution des stratégies nationales.

Organigramme n° 1 : gouvernance de la stratégie nationale quantique



Source : Cour des comptes

La stratégie quantique s'inscrit pleinement dans le cadre de gouvernance de France 2030. Elle dispose également de sa propre structure de pilotage, organisée autour de comités spécifiques chargés d'assurer un suivi rigoureux de ses objectifs :

- le suivi de la performance est assuré par le coordinateur de la stratégie et les membres du Comité de pilotage ministériel opérationnel (CPMO) numérique, par des tableaux de bord ;
- une revue indépendante est conduite par le Comité de surveillance des investissements d'avenir (CSIA) dans le cadre de l'examen de l'avancement des feuilles de route ;
- des enquêtes sont réalisées directement par le SGPI auprès des lauréats.

1 - La coordination des acteurs de la recherche : un pilotage interministériel en structuration

Deux agences de programmes interviennent directement dans le champ de l'informatique quantique : l'agence *Composants, systèmes et infrastructures numériques,* pilotée par le CEA et l'agence *Algorithmes, logiciels et usages*, pilotée par l'INRIA[23].

La direction générale de la recherche et de l'innovation (DGRI) du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche aurait, en principe, vocation à assurer le pilotage d'une stratégie de recherche consacrée à l'informatique quantique[24]. Toutefois, elle n'a pas été en mesure d'en assurer pleinement le pilotage et ne dispose pas, en l'état de ses attributions, des leviers nécessaires pour en exercer seule la coordination. Ainsi, ce domaine connaissant une accélération de ses applications industrielles et étant désormais pleinement intégré à France 2030, la mission de coordination confiée au SGPI redéfinit sensiblement la place du ministère dans la gouvernance. Bien que co-présidant le comité de pilotage ministériel opérationnel, la DGRI n'est ainsi pas l'acteur central chargé de la coordination de la stratégie. Elle conserve toutefois un levier d'influence au travers des contrats d'objectifs, de moyens et de performance (COMP) conclus avec les organismes nationaux de recherche (CEA, CNRS et INRIA pour le quantique), d'une part, et les établissements d'enseignement supérieur et de recherche (universités), d'autre part.

En complément, l'action de la direction générale des entreprises (DGE) répond à un autre enjeu majeur de la stratégie quantique : l'appropriation des technologies par le tissu économique. Son rôle consiste moins à financer qu'à sensibiliser, protéger des prédations, accompagner et fédérer, notamment en facilitant l'accès aux ressources de calcul et en animant des réseaux territoriaux. Toutefois, cette action souffre d'un pilotage encore peu structuré, marqué par un suivi limité des actions engagées. En pratique, l'implication de la DGE dans les Maisons du quantique[25] apparaît limitée.

2 - Une intégration essentielle des acteurs chargés de la défense et de la sécurité numérique

La direction générale de l'armement (DGA) et le secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN) sont membres des instances de pilotage de la stratégie numérique, sur le volet sécurité nationale.

La DGA du ministère des armées (Minarm) est très impliquée dans trois domaines d'application du quantique que sont les capteurs, le calcul et la cryptographie. Dans le domaine du calcul, elle joue un rôle prépondérant dans le programme *PROQCIMA* (présenté *infra* au point 3.3.1). En août 2025, le ministère des armées a créé un Commissariat au numérique de

[23] Cour des comptes, *Les agences de programmes*, communication à la commission des finances de l'Assemblée nationale, novembre 2025.
[24] Cour des comptes, *L'administration centrale de l'enseignement supérieur et de la recherche*, référé au Premier ministre du 20 novembre 2025, publié le 13 février 2026 en même temps que des observations définitives sur *La direction générale de l'enseignement supérieur et de l'insertion professionnelle et la direction générale de la recherche et de l'innovation*.
[25] Voir *infra*, dans le chapitre II, le point II.B.

défense (CND), qui a succédé à l'Agence du numérique de défense en tant que représentant du pouvoir adjudicateur de l'accord-cadre *PROQCIMA* et de ses marchés.

Le secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN) contribue également à la mise en œuvre de la stratégie nationale quantique car les impacts de cette technologie sur la cryptographie sont majeurs. En effet, le développement potentiel, à moyen terme, d'un ordinateur quantique de puissance suffisante pourrait compromettre la sécurité de la cryptographie à clé publique largement déployée pour sécuriser les infrastructures numériques. La menace d'attaques rétroactives (dites « *store now, decrypt later* »), par lesquelles les attaquants intercepteraient et enregistreraient aujourd'hui des messages en vue de les décrypter plus tard, lorsque cet ordinateur quantique sera disponible, doit être prise en compte dès à présent.

L'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI), rattachée au SGDSN, considère qu'il est d'ores et déjà nécessaire de prendre en compte cette menace quantique. La cryptographie post-quantique représente la voie la plus prometteuse pour s'en prémunir.

3 - La création d'un coordinateur au SGPI : une condition essentielle au pilotage de la stratégie

La diversité des acteurs impliqués dans la stratégie nationale quantique peut donner une impression de complexité dans la gouvernance du secteur. Cette situation n'est pas spécifique au quantique, mais s'inscrit dans la continuité du fonctionnement global de la recherche française.

Malgré cette complexité structurelle, le domaine quantique fait l'objet d'un pilotage affirmé, soutenu par des investissements publics importants et une stratégie nationale clairement définie. Un effort de clarification a été engagé avec la création, en 2021, lors du lancement de la stratégie, d'un poste de coordinateur de la stratégie nationale quantique au sein du Secrétariat général pour l'investissement (SGPI). Chargé d'en assurer le pilotage et la cohérence d'ensemble, le SGPI définit les orientations, arbitre les grandes priorités, garantit le suivi transversal des investissements (1,8 Md€) et veille à l'alignement entre la stratégie nationale, les ambitions du plan France 2030 et les engagements interministériels.

La fonction de coordinateur consiste à superviser la mise en œuvre de la stratégie, notamment la gestion des financements issus de France 2030 : suivi des appels à projets, ensuite opérés par l'Agence nationale de la recherche (ANR), coordination de la sélection des initiatives et suivi de leur exécution à travers le CPMO. Elle implique également un pilotage interministériel actif, avec des réunions d'arbitrage hebdomadaires et des rencontres sur la sécurité économique, mobilisant un cercle élargi incluant les services de renseignement, le secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale, le ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle, énergétique et numérique le ministère des armées et le ministère de l'Europe et des affaires étrangères.

Ce rôle exige à la fois une coordination fine entre ministères et acteurs et une supervision rigoureuse des projets financés. Clairement identifié et reconnu par l'ensemble des acteurs, il constitue un élément structurant pour assurer le bon déroulement de la stratégie et contribuer à fluidifier les échanges. Ainsi, tandis que le coordinateur assure le pilotage global à l'échelle

macro, l'ANR se concentre sur l'attribution et l'évaluation des programmes de recherche : leurs rôles se complètent pour garantir une articulation cohérente de l'ensemble des champs de la stratégie.

L'articulation avec le coordinateur national pour l'intelligence artificielle, positionné auprès de la direction générale des entreprises (DGE) doit toutefois être améliorée. Les interactions entre ces deux domaines appellent en effet une harmonisation accrue des pratiques et des échanges. Les sujets numériques s'interpénètrent et une gestion non intégrée serait facteur de désorganisation. C'est d'ailleurs ce constat qui a conduit le ministère des armées à faire récemment le choix de créer une structure intégrée.

B - Les projets couvrent toute la chaîne de valeur et fédèrent l'ensemble des acteurs concernés

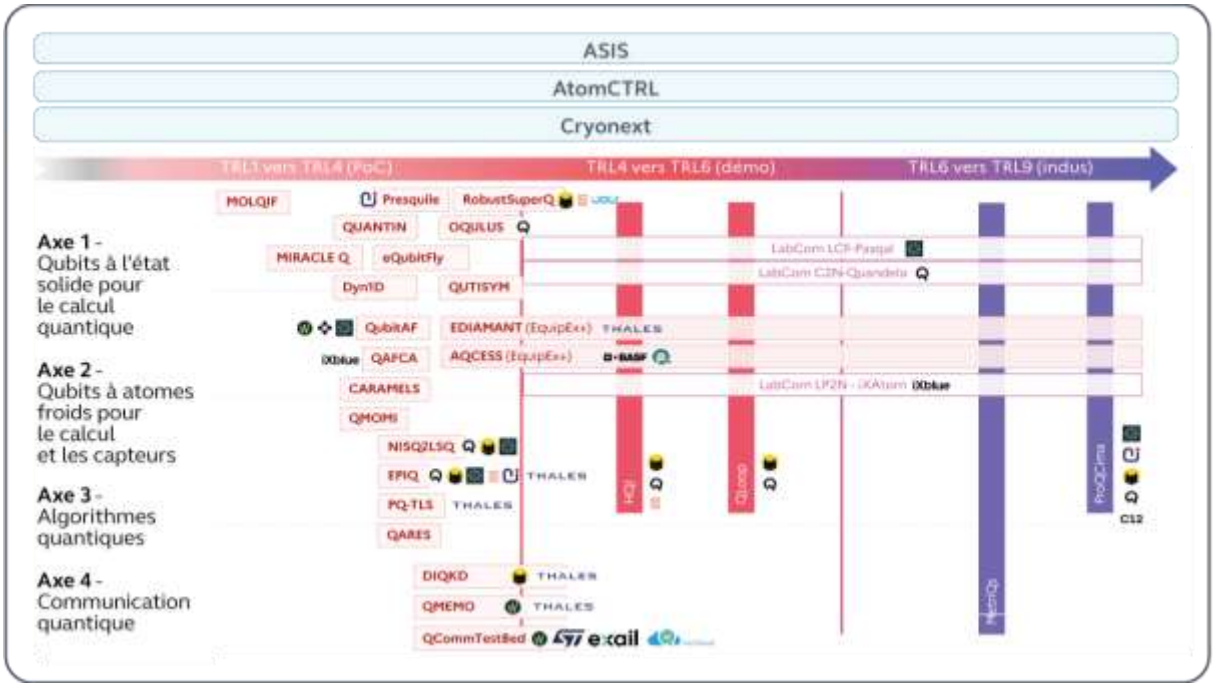
1 - Une articulation cohérente sur l'ensemble de la chaîne de valeur

La stratégie nationale quantique est conçue de manière équilibrée sur l'ensemble de la chaîne de valeur et inclut l'ensemble des acteurs, de la recherche fondamentale aux groupes industriels internationaux. Le Programme et Équipement Prioritaire de Recherche (PEPR) Quantique constitue le pilier central du volet recherche de la stratégie nationale d'accélération consacré aux technologies quantiques, annoncée en janvier 2021. Il s'inscrit toutefois dans un ensemble plus large de dispositifs conçus pour couvrir l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis la production de connaissances fondamentales jusqu'aux premières démonstrations technologiques, en articulation étroite avec les autres instruments de la stratégie. Il est copiloté de manière fluide et efficace par le CNRS, le CEA et l'INRIA, qui en ont aussi coécrit la feuille de route.

Doté de 142 M€, il représente l'élément principal du soutien public à la recherche publique dans le domaine, en couvrant la chaîne allant de la recherche fondamentale (TRL 1) à la preuve de concept (TRL 4)[26]. Il fait ainsi la jonction entre la recherche fondamentale, qui vise avant tout à produire de nouvelles connaissances sans objectif applicatif immédiat, et la recherche dirigée, qui est orientée vers un objectif précis visant à répondre à un enjeu dans un délai défini. Cette position intermédiaire est essentielle pour structurer des communautés scientifiques autour de priorités partagées, tout en préparant les ruptures nécessaires aux développements ultérieurs.

[26] L'échelle TRL (*Technology Readiness Level*), ou niveau de maturité technologique en français, est une méthode de classification qui permet d'évaluer le degré de développement d'une technologie *(cf.* l'annexe n° 5). Le rapport du comité de surveillance des investissements d'avenir (CSIA) publié en avril 2026 signale toutefois (p. 251) que, *« dans le numérique, l'échelle des TRL est peu adaptée pour ciseler les dispositifs car le délai de maturation des technologies peut être court. Les dossiers sont souvent construits sur le comment plus que sur le quoi, alors que les technologies évoluent vite : se focaliser sur l'objectif final, en limitant les contraintes sur les moyens de l'atteindre »*.

Schéma n° 2 : positionnement technologique des principaux programmes industriels du PEPR quantique



Source : CNRS. Ce schéma s'appuie sur le « Technology Readiness Level »

L'articulation entre la SNQ et le PEPR a été pensée de manière complémentaire : le PEPR permet de consolider les briques scientifiques et technologiques critiques, tandis que les dispositifs en aval visent à en accélérer la valorisation et l'industrialisation. Ainsi, les projets annexes au PEPR prennent le relais aux niveaux de maturité plus élevés (TRL 4 à 7), notamment à travers des projets collaboratifs associant laboratoires et industriels.

Cette approche graduée, dont la pertinence est soulignée par les acteurs de la recherche rencontrés dans le cadre de l'enquête de la Cour, vise à assurer la continuité entre excellence scientifique, maturation technologique et impact industriel, condition indispensable pour la compétitivité française dans un domaine en évolution rapide. L'aboutissement de la stratégie, au-delà de la convergence matérielle/logicielle et des verrous technologiques existants, reposera sur des chaînes industrielles maîtrisées, dont l'intégration verticale inclut la formation avec le programme QuanTEdu.

Le PEPR a ainsi vocation à alimenter certains programmes de la SNQ ou qui relèvent de technologies habilitantes.

Certaines interactions sont des boucles d'anticipation (de type « *feed-forward* ») :

- le programme *HQI* (*Hybrid Quantum Initiative*) pour le calcul quantique hybride, qui bénéficie des recherches menées sur la partie amont dans les différents projets du PEPR. On peut par exemple citer les projets *RobustSuperQ* ou *OQULUS* sur la partie *hardware* ou *EpiQ* pour l'algorithmie.
- le programme *Qloop*, portant sur l'intégration de l'ensemble des composantes nécessaires à un calculateur quantique, vise à développer l'électronique de contrôle pour les qubits

solides[27] et la correction d'erreur. Ces travaux pourront bénéficier des résultats issus de deux autres projets du PEPR (*Presquile* et *RobustSuperQ*).

Pour les technologies habilitantes, les liens entre « briques » ou programmes du PEPR constituent des retours d'expérience précieux, de type *feed-back* (rétroaction) *:*

- le programme *ASIS*, pour l'approvisionnement stratégique en isotopes stables, devrait à terme garantir l'approvisionnement de la communauté française, en particulier pour les projets du PEPR nécessitant ces isotopes.
- le programme *AtomQTRL*, qui développe des lasers consacrés au refroidissement et à la manipulation d'atomes, devrait à terme fournir les lasers nécessaires aux consortia (académiques, industriels, et hybrides) qui mettent en œuvre des atomes froids, comme c'est le cas des projets QubitAF et QAFCA.
- le programme *Cryonext* vise quant à lui la sécurisation de l'approvisionnement en systèmes de cryogéni par une R&D partenariale. Il devrait, à terme, satisfaire les besoins des projets *Presquile*, *RobustSuperQ*, *Oqulus*, *Qmemo*, et *QcommTestBed*, allant des cryostats « recherche » aux systèmes à grande échelle de type « ferme ».

Toutefois, des contraintes opérationnelles freinent la réactivité de la SNQ, et par effet rebond, du PEPR.

La mise en place opérationnelle du PEPR se heurte à une exécution lourde, notamment du fait de la convention entre l'ANR et l'État qui encadre la création et le fonctionnement des Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche. Cette lourdeur résulte d'un ensemble de processus interministériels complexes. Contrairement à certaines pratiques issues du monde industriel, qui consistent à fixer une date de sortie et à adapter l'organisation pour la respecter, le pilotage des PEPR repose davantage sur des procédures et des circuits de validation que sur les objectifs à atteindre. Ce mode de pilotage, commun à l'ensemble des dispositifs du plan France 2030, conduit à une mise en œuvre insuffisamment rapide des décisions.

Cette lenteur peut générer des incompréhensions dans la communauté scientifique et mettre sous tension les équipes porteuses. Dans certains cas, les programmes ont même fonctionné pendant près de deux ans sans convention de gouvernance, ce qui a retardé leur structuration. De manière générale, il s'écoule souvent plus d'un an entre l'émergence d'une idée et sa traduction en actions effectives, créant un décalage problématique dans un domaine où les avancées technologiques évoluent très rapidement.

Plusieurs exemples illustrent ces difficultés. Le projet Qloop, pourtant identifié dès le lancement de la stratégie nationale quantique, n'a effectivement débuté qu'au bout de trois ans. Le même constat vaut pour HQI, où l'allongement des délais nuit à la cohérence et à l'efficacité du suivi. Ces situations mettent en évidence la nécessité d'un calendrier d'exécution plus cadencé, ainsi que d'un pilotage continu adapté au rythme d'évolution du secteur quantique.

Malgré ces limites, le dispositif présente aussi des avantages notables : il a favorisé un travail collectif inédit et un équilibre précieux entre exploration scientifique et approfondissement coordonné. Ces bénéfices sont significatifs et tendent à compenser les inconvénients. Toutefois,

[27] Qubits de spins et qubits supraconducteurs.

pour maintenir la compétitivité française dans un domaine en évolution rapide, une accélération des décisions et une simplification des processus apparaissent indispensables.

2 - Des projets soutenus par une large palette de financements qui s'adaptent aux besoins des différents acteurs

La stratégie nationale quantique (SNQ) est construite sur les collaborations étroites entre divers acteurs, publics et privés. Les financements du PEPR et des différents projets de la SNQ sont coordonnés par le SGPI. Ce dernier délègue à l'ANR et à Bpifrance l'organisation des appels à projets.

L'ANR intervient dans le financement de la recherche quantique selon deux modalités distinctes. D'une part, par délégation du SGPI, elle gère les appels à projets inscrits dans le cadre de la stratégie nationale quantique, notamment à travers les PEPR destinés au financement de la recherche fondamentale et collaborative au sein des établissements de recherche. Cette modalité d'intervention s'inscrit dans un pilotage structuré et cohérent, placé sous l'autorité du coordinateur national de la stratégie nationale quantique, et permet un suivi consolidé des actions et des financements.

D'autre part, l'ANR intervient en propre, à travers son appel à projets générique, dont le quantique constitue l'un des six domaines prioritaires. À ce titre, un appel à projets récurrent consacré aux technologies quantiques, finance chaque année une cinquantaine de projets sur les technologies quantiques. À cela s'ajoutent des appels à projets ponctuels sur des thématiques spécifiques, tels que les capteurs quantiques. Au total, sur la période 2020-2025, près de 415 projets ont été financés à hauteur de 159 M€, dont 37,8 M€ dans le domaine de l'informatique quantique.

La Banque publique d'investissement (Bpifrance) joue un rôle structurant vis-à-vis des entreprises en assumant une prise de risque adaptée à des technologies encore émergentes. En mobilisant un large éventail de dispositifs de financements, elle est en mesure d'accompagner les projets à différents niveaux de maturité.

Au niveau régional, Bpifrance dispose de réseaux régionaux, qui financent aussi des appels à projets à destination des jeunes *startups*, à travers et en dehors de la stratégie nationale. Ce cycle de maturation précoce permet de couvrir les étapes nécessaires à l'émergence de *startups.*

Au niveau national, dans le cadre d'appels à projets coordonnés par la SNQ ou relevant du volet structurel de France 2030, Bpifrance finance des projets répondant aux attendus spécifiques de certains cahiers des charges thématiques (crypto post quantique, chaînes de valeur européennes), des projets de concours d'innovation (*i-Lab* ou *i-Nov*) ou des projets collaboratifs *i-Démo* et *1ère Usine*. Bpifrance finance les projets portés par des entreprises en mono-partenaires ou les projets collaboratifs associant entreprises et laboratoires partenaires. Selon les appels à projets, les aides sont apportées sous la forme de subventions ou d'avances remboursables, toutes issues de dotations du plan France 2030. Sur le périmètre de l'enquête, cela représente 114 M€ d'aides. Bpifrance porte aussi les financements et se place en opérateur de certains dispositifs pour le compte de la France dans les partenariats institutionnels européens (KDT, ou les entreprises communes Chips JU et Euro HPC) et plus récemment les lignes pilotes quantiques européennes.

BPI France intervient également en fonds propres dans des *startups* du quantique, en co-investissement avec des acteurs privés, les projets étant fortement articulés et construits avec la coordination nationale. Cette position d'« investisseur de long terme » contribue à la structuration de la filière, mais suppose une coordination étroite avec les autres instruments publics afin d'éviter les effets de dispersion ou de redondance. Sur le périmètre de l'enquête, cela représente 93,18 M€ investis en direct par les fonds *Bpifrance Innovation Digital Venture, Bpifrance Innovation Large Venture, Fonds Innovation Défense, Fonds Deeptech 2030, French Tech Seed et Future French Champions.*

Les délais d'octroi des aides sont toutefois trop longs. L'organisation de France 2030 n'est malheureusement pas exemplaire sur ce point : la structure à trois étages entre l'opérateur thématique mettant en œuvre les appels à projet, les comités de pilotage ministériels opérationnels validant la sélection des projets, et le comité exécutif (COMEX) pour les projets dont l'assiette est supérieure à 10 M€, est générateur de délais, d'autant plus que les décisions doivent être officialisées par le Premier ministre. La recherche d'une plus grande subsidiarité est un axe à poursuivre.

CONCLUSION

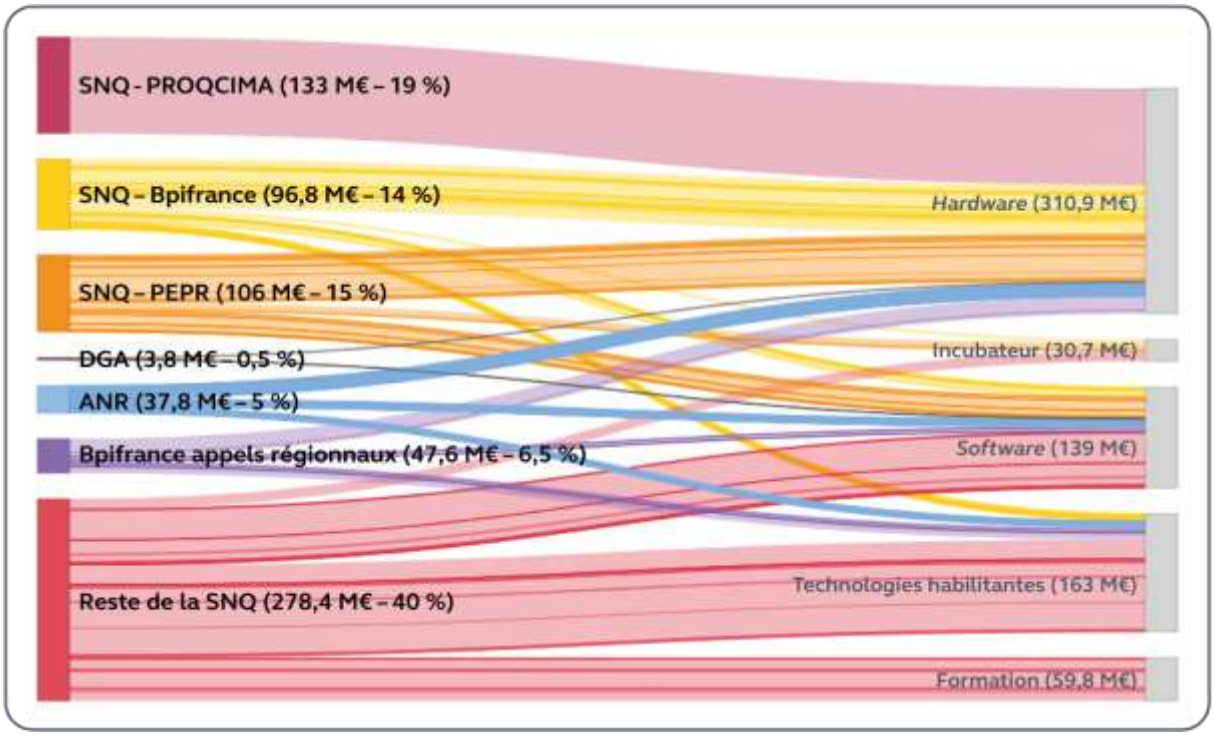
La volonté d'investissement de l'État dans les technologies quantiques, notamment dans l'informatique quantique, s'est concrétisée dans un programme ad hoc*, la stratégie nationale quantique (SNQ). La gouvernance et le pilotage centralisé de la SNQ, par un coordinateur national au SGPI, permettent de rationaliser la gestion des fonds publics qui y sont affectés. En outre, malgré quelques points d'amélioration quant à la lourdeur des processus, l'alignement des acteurs est important. L'intégration des opérateurs du PEPR est également efficiente, grâce au volontarisme des acteurs, et la conception des différents programmes offre une grande cohérence.*

Chapitre II

Un financement qui repose principalement sur des investissements non pérennes

Les fonds de France 2030 représentent l'essentiel des financements publics consacrés à l'informatique quantique. Les programmes, longs et complexes, sont tous pluriannuels. Dans le graphique n°4, seules les autorisations d'engagement (AE) consommées avant fin 2025 sont prises en compte. Cela conduit à minorer certains programmes dont la montée en puissance n'est pas encore visible. Ainsi, fin 2025, sur les 500 M€ maximum du contrat-cadre du programme PROQCIMA, les participants n'avaient bénéficié que de 57,5 M€, correspondant à la première phase du projet (2024-2026).

Graphique n° 3 : répartition des crédits par source de financement (AE 2020-2025)



Source : Cour des comptes. Ce graphique représente les flux de financement avec à gauche les sources de financement, et à droite, les domaines d'intervention. Les couleurs chaudes (rouge foncé, rouge clair, orange et jaune) correspondent toutes à des financements de France 2030. Les flux violets sont issus à 50 % de France 2030 *et à 50 % de fonds propres de l'opérateur. Les flux de couleur froide (gris, bleu) correspondent à des fonds propres.*

Avec la consommation intégrale des AE de la SNQ, plus aucun projet d'ampleur ne peut être engagé. Cela crée un vrai risque d'intermittence préjudiciable à la continuité des recherches (*cf.* le graphique n° 5). Les décaissements étalés des crédits de paiement conduisent les opérateurs à mobiliser fortement leurs ressources propres en priorisant ces projets. Si l'INRIA a assumé ce choix dès 2018, cette orientation n'était pas aussi évidente pour le CNRS et le CEA, dont les activités sont plus diversifiées.

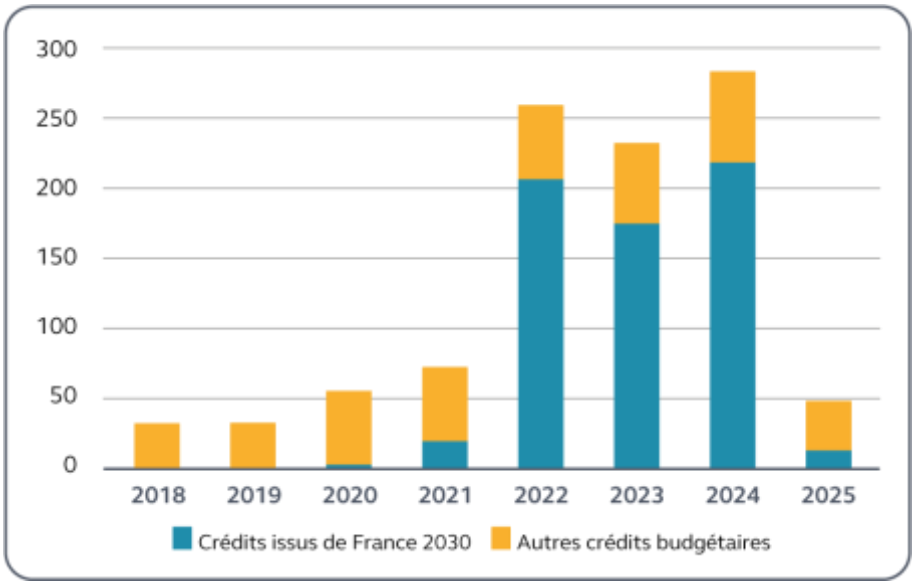
I - Les crédits de France 2030, une procédure budgétaire dérogatoire et un suivi centralisé par le SGPI

A - Les financements non pérennes de France 2030, principale source de financement de l'informatique quantique

Budgétairement, les crédits qui financent les projets quantiques sont issus soit des grands emprunts d'avenir (PIA 3, PIA 4 et France 2030), soit des crédits structurels des ministères, principalement le ministère chargé de la recherche. Le budget général abonde aussi le budget de l'Union européenne et celui des collectivités locales, contribuant indirectement un peu plus au soutien public à l'informatique quantique. Par ailleurs, ces fonds sont souvent des co-financements qui mobilisent à nouveau en complément des crédits inscrits au budget général et transférés à travers la mécanique de la subvention ou des appels à projets jusqu'au porteur final du projet.

Le graphique ci-dessous intègre les financements réalisés par les ONR et les universités, hors appels à projets ou soutiens de la stratégie nationale quantique, qui peuvent être qualifiés de pérennes car la subvention pour charges de service public compense notamment les coûts de masse salariale. Dans la mesure où la plupart des établissements concernés ne disposent pas d'une comptabilité analytique, l'estimation de ces financements est approximative et sans doute sous-évaluée (celle concernant les universités est fondée sur l'hypothèse qu'elles consacrent une centaine d'ETP à l'informatique quantique).

Graphique n° 4 : autorisations d'engagement (AE) dans le calcul quantique et les technologies habilitantes (en M€)



Source : Cour des comptes

Les crédits des programmes 172 *Recherches scientifiques et technologiques pluridisciplinaires* ou 191 *Recherche duale* portés par les ministères chargés de la recherche et de la défense ont un caractère structurel, ce qui n'est pas le cas des programmes 424 et 425, qui correspondent aux crédits France 2030. Comme l'ensemble des dépenses du budget général, ils sont votés chaque année par les parlementaires dans le cadre de la procédure budgétaire. Ils sont accompagnés de la documentation budgétaire justifiant les dépenses.

Le ministère des armées contribue ainsi au financement de l'informatique quantique, avec toutefois un écart entre les ambitions affichées[28] et les moyens déployés. La loi de programmation militaire (LPM) identifie le quantique comme l'un des *« quatre sauts technologiques »* que doivent franchir les armées, aux côtés de l'IA, de la robotique et des drones. Pourtant, le ministère n'a inscrit que 50 M€ dans la LPM pour, sur la période 2019-2025, développer les technologies quantiques. L'essentiel est d'ailleurs alloué aux capteurs et à la communication quantique, et non au calcul quantique. Dans ce dernier domaine, le ministère se concentre principalement sur la maîtrise d'ouvrage de programmes financés en dehors de son périmètre. Ainsi, en 2025, il consacre uniquement un ETP et demi, au sein de l'Agence de l'innovation de défense (AID), pour coordonner le programme PROQCIMA et seul un programme (ALIQUANTE) est financé sur les fonds propres du ministère.

Le ministère assume aujourd'hui que le financement de l'informatique quantique soit porté par le secteur civil. Cette stratégie, qui était tout à fait adaptée il y a quelques années, est désormais déconnectée des risques liés à la souveraineté sur une technologie de rupture. Une implication accrue de programmes militaires sur l'émergence de l'ordinateur quantique apparaît

[28] Discours de la ministre des Armées lors de l'inauguration de la plateforme nationale de calcul quantique au CEA ou déclarations du précédent délégué général pour l'armement.

donc indispensable, au-delà des autres technologies quantiques soutenues par le ministère. Ce portage doit être explicité à l'occasion de la clause de revoyure de la LPM.

D'un point de vue strictement financier, il n'y a pas d'emprunt spécifique pour les investissements d'avenir (PIA, France 2030). L'agence France Trésor (AFT) émet sur les marchés financiers des produits avec des maturités et des rendements différents, pour combler le besoin de financement de l'État non couvert par les recettes. L'AFT a une stratégie globale orientée sur la demande des investisseurs pour minimiser les taux et le coût de ces emprunts. L'expression « grand emprunt d'avenir » traduit ainsi :

- le vote d'un budget global en déséquilibre ;
- la mise en œuvre d'une procédure budgétaire dérogatoire pour les crédits affectés à *France 2030*.

Les crédits affectés à l'innovation bénéficient en effet de règles budgétaires dérogatoires, dont la Cour a déjà souligné à plusieurs reprises les inconvénients, même si l'objectif premier était la sécurisation des montants correspondants dans la durée[29]. Ces crédits sont interministériels et ne sont pas pérennes.

Les montants inscrits dans les projets de loi de finances sont issus d'une règle de calcul rigide. La dotation non consommable (DNC) correspond à des crédits déplacés d'un compte au Trésor à un autre (celui de l'ANR) mais qui ne peuvent être utilisés par l'opérateur. Un taux, fixé par arrêté et correspondant arbitrairement aux obligations assimilables du Trésor (OAT) à 10 ans lors du lancement du PIA 1, est appliqué à cette DNC. Le montant de ces intérêts sur la dotation non consommables (IDNC), qui ne correspond donc pas à un rendement financier, calibre les crédits qui sont inscrits dans les projets de loi de finances pour les innovations. Cela s'apparente à l'équivalent d'une loi de programmation sur des recettes hors budget : l'État s'engage à allouer un montant défini tous les ans pendant une certaine période. Cela garantit un montant minimum mais ne permet pas d'ajustement à la hausse, y compris pour tenir compte de l'inflation. Par ailleurs, comme il ne s'agit pas d'une loi, les parlementaires n'ont pas voté cet engagement pluriannuel. Ce dispositif a été supprimé fin 2025.

L'engagement de ces crédits est dérogatoire et contraignant depuis le PIA 3. En effet, l'ensemble des AE est budgété dès la première année. L'équilibre nécessaire avec les crédits de paiement (CP) est donc réalisé de façon pluriannuelle. Ce mécanisme écorne le principe d'annualité budgétaire. Les parlementaires ne peuvent plus se prononcer annuellement sur le montant des CP, ou à la marge. Il assure une sécurité sur des financements prioritaires, mais réduit le contrôle exercé sur les crédits et leur utilisation.

Si l'architecture budgétaire de la loi de finances, avec une mission transversale pour l'innovation pilotée par le SGPI, semble efficiente, le mode de financement des crédits affectés au soutien de l'informatique quantique, hors budget et selon des règles budgétaires dérogatoires, doivent évoluer pour les raisons suivantes :

- **la pérennisation des crédits correspondants est indispensable mais n'est pas assurée** à ce jour. La mission *Investir pour la France en 2030* repose en effet sur un engagement extra-budgétaire garanti uniquement jusqu'en 2030. Or, le financement de la priorité nationale que constitue le développement du calcul quantique requiert de la continuité. La

[29] Cour des comptes, *Analyse de l'exécution budgétaire 2025 - Mission* Investir pour la France de 2030, avril 2026.

budgétisation de financements affectés à des investissements d'avenir est pourtant possible. La loi de programmation de la recherche[30] a ainsi augmenté les crédits d'intervention de l'ANR. Ce constat vaut aussi pour la trajectoire budgétaire du programme PROQCIMA, qui a été confirmée comme une priorité gouvernementale mais dont la sécurisation du financement jusqu'en 2032 n'a pas non plus été validée à ce jour ;

- **le renchérissement des conditions de financement sur les marchés financiers et la contrainte croissante du service de la dette** ne permettent plus de faire reposer les financements d'avenir sur l'emprunt[31]. Les conditions actuelles ne sont plus favorables à un nouveau grand emprunt d'avenir au-delà de 2030. Le vote d'une loi de programmation permettrait de prévoir une trajectoire pluriannuelle à la fois ambitieuse, réaliste et respectueuse du principe d'annualité budgétaire.

Quelles qu'en soient les modalités, la pérennisation du soutien de l'État à l'informatique quantique que la Cour appelle de ses vœux devra être précédée d'une évaluation des besoins afférents au-delà de la période couverte par la SNQ.

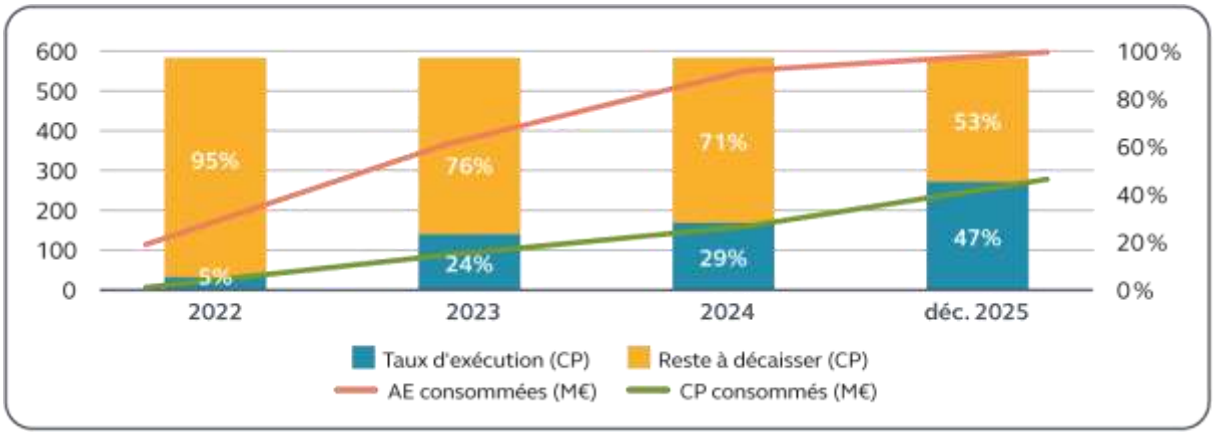
Le suivi de la stratégie nationale quantique par le SGPI a permis d'atteindre des taux d'exécution satisfaisants. Si les financements publics se maintiennent après 2025 et la fin de la SNQ, la phase d'impulsion est désormais terminée. Fin 2025, toutes les autorisations d'engagement (AE, d'un montant total de 548 M€) avaient été consommées et les projets pluriannuels étaient en cours de déploiement. En effet, une part significative des montants engagés – environ 130 M€ – fait l'objet de décaissements sur dix ans. Ainsi, à la même date, le taux d'exécution des crédits de paiement (CP, d'un montant total de 247 M€) atteignait 45 % sur le périmètre de la SNQ. Ces données montrent que l'avancement des projets est relativement satisfaisant.

Avec plus de la moitié des CP consommés fin 2025, le PEPR présente un taux d'exécution moyen plus important que l'ensemble de la SNQ. Les projets en retard sont notamment ceux liés à l'AAP *Coopérations internationales pour des chaînes de valeur résiliente*. Ces projets, dont certains n'avaient pas encore démarré fin 2025 et qui doivent être menés à bien d'ici 2030, associent de nombreux acteurs. Le programme PROQCIMA doit quant à lui s'étaler jusqu'en 2032. Sur les 500 M€ de dotation prévus dans le contrat-cadre, seuls 57,5 M€ correspondant à la première phase 2024-2026 avaient été engagés fin 2025. Le financement de la deuxième phase n'est pas encore consolidé et dépendra en partie de l'actualisation de la loi de programmation militaire ou d'un abondement par France 2030.

[30] Loi n° 2020-1674 du 24 décembre 2020 de programmation de la recherche.

[31] En retenant le taux moyen des emprunts à dix ans souscrits sur la période 2020-2025, la Cour a estimé à 6,8 M€ le coût de la part des emprunts d'avenir affectés sur cette période au financement du soutien à l'informatique quantique. À taux inchangés, elle a évalué à 13 M€ le coût sur la période 2026-2030 des emprunts à souscrire pour financer les crédits de paiement gagés sur des autorisations d'engagement correspondant à des projets validés qui devront être inscrits sur cette période au budget de l'État.

Graphique n° 5 : consommation des crédits en montant absolu (M€) et relatif (%)



Source/note : Cour des comptes, d'après les données du SGPI. Ces données correspondent à l'ensemble des crédits suivis par la coordination de la SNQ. Ils incluent les crédits de la SNQ et quelques projets de Bpifrance hors SNQ, ce qui rehausse le taux d'exécution par rapport au périmètre strict de la SNQ. Ces crédits recouvrent des subventions et des avances remboursables.

Pour l'ensemble des projets de la SNQ, les coûts totaux excèdent les subventions. À titre d'exemple, les taux d'aide s'élèvent à 33 % pour le PEPR, le solde étant couvert par des cofinancements européens, les laboratoires et les UMR. Ainsi, sur un milliard d'euros financé par l'État pour la SNQ en effort global, le SGPI assure le suivi de 660 M€. Une partie importante du suivi de l'exécution budgétaire est donc assurée par les opérateurs nationaux du plan *France 2030*.

Le programme *Cryonext*, atypique, nécessite toutefois une vigilance particulière suite au gel d'une part importante des AE qui lui sont affectées (34 M€). Il se déroule en plusieurs phases, avec une première tranche consacrée à une étude de faisabilité. Ce volet, assez théorique, suscitait des besoins en investissement très limités. Par ailleurs, il est constitué de sept projets portés par des consortia industriels indépendants. La nature industrielle du programme, orienté vers la production de différents cryostats, et la coordination complexe des acteurs industriels, ont conduit à un retard de son lancement.

L'essentiel des financements sera débloqué à l'issue de l'étude de faisabilité pour les projets les plus prometteurs. Si le principe de sélection des projets les plus pertinents est vertueux, en permettant de concentrer les moyens sur les projets de recherche industrielle les plus aboutis, il convient d'être vigilant sur les outils de sélection, ainsi que sur le respect de la trajectoire d'exécution budgétaire. La non-consommation d'AE ou de CP en année budgétaire du fait de la pluri-annualité d'un projet est source de sous-optimisation des ressources globales.

Enfin, la répartition de la nature de la dépense varie selon les types de projets. Au sein de la SNQ, deux modèles de centres de coûts émergent : les projets centrés sur le financement d'infrastructures et ceux portant sur la masse salariale. Quelques exemples permettent d'illustrer cette dichotomie :

- 92 % du projet *CEPREQ* ont été consacrés à la mise en place d'une usine pour Pasqal ;
- près de 80 % des 36,3 M€ de subventions affectées au projet *HQI-Acquisition* ont également financé des dépenses d'équipements (la mise en place d'une plateforme de calcul) ;

- en revanche, pour le projet complémentaire *HQI R&D*, c'est la masse salariale qui représente le principal centre de coûts (plus de la moitié des dépenses) ;
- le projet *MetriQs Dev*, porté par le LNE, correspond lui aussi à des prestations intellectuelles.

Tableau n° 1 : annexe financière synthétique du projet *MetriQs Dev*

	Coût total (€)	Aide (€)	Fonds propres (€)	Taux d'aide (%)	Part de la dépense (%)
Personnel	2 411 502,5	2 078 301,5	333 201	21 %	25 %
Fonctionnement	650 658,85	156 216	494 442,85	2 %	7 %
Prestations externes	4 000 000	4 000 000	0	4 %	4 %
Facturation interne	4 865 482,5	4 865 482,5	0	50 %	50 %
Frais généraux	1 500 000	1 500 000	0	15 %	15 %
Total	**9 827 643,85**	**9 000 000**	**827 643,85**	**92 %**	**100 %**

Source : Cour des comptes

B - L'équilibre subtil entre subventions et avances remboursables

L'avance remboursable, versée au terme échu de chaque échéance prévue par les termes du contrat, est un dispositif propre à la France. Ce type de soutien n'est pas privilégié par les entreprises, pour différentes raisons. Tout d'abord, il requiert une certaine maturité budgétaire et comptable pour anticiper les décalages de trésorerie et réaliser les imputations correctes (avec un taux, comme un prêt). Par ailleurs, le durcissement des conditions de remboursement en cas d'échec commercial transfère davantage le risque sur l'entreprise et pèse moins sur la puissance publique. Dans un contexte de forte contrainte budgétaire, ce levier est un instrument de bonne gestion pour l'État.

Les près de 660 M€ d'autorisations d'engagement (AE) suivis par le SGPI, incluant la SNQ et quelques projets portés par Bpifrance hors SNQ, se répartissent entre 95 % de subventions publiques et 5 % d'avances remboursables. Si les projets du PEPR destinés à la recherche publique et bénéficiant d'une feuille de route sont financés exclusivement par subventions, l'équilibre se pose pour d'autres projets.

Bpifrance utilise plusieurs instruments financiers dont l'équilibre varie en fonction des acteurs. Ils se répartissent globalement entre 80 % de subventions et 20 % d'avances remboursables. Les financements sont étalés sur la durée du projet et débloqués à la suite d'une revue des projets, lors de laquelle les jalons de versement, prévus lors de l'appel à projets, sont expertisés.

La modulation du taux d'effort des porteurs de projet, avec un taux d'aide moyen de 65 **%** pour les appels à projets de Bpifrance et une subvention de 100 % pour les partenariats entre entreprises et laboratoires, est conforme à la nécessité de concentrer les soutiens publics sur la recherche fondamentale et de solliciter davantage le secteur privé lors des phases ultérieures du cycle d'innovation.

La modification de la répartition entre subventions et avances remboursables constitue ainsi un levier d'amélioration de l'efficacité du soutien public, sous réserve de la définition d'indicateurs précis déterminant la réussite des projets.

II - Les financements complémentaires en dehors du budget général

A - Les aides fiscales aux entreprises (CIR/JEI/CII)

Les *startups* du quantique ont la possibilité de bénéficier du statut de « Jeunes entreprises innovantes » (JEI) et de « Jeunes entreprises de croissance » (JEC). Elles peuvent bénéficier d'avantages fiscaux tels que le crédit d'impôt recherche (CIR), le crédit d'impôt innovation (CII) et les dispositifs relatifs aux jeunes entreprises innovantes.

Le statut de JEI est réservé aux entreprises ayant la qualité de petites et moyennes entreprises (PME) et qui consacrent plus de 20 %[32] de leurs charges à des dépenses de R&D. Ces entreprises bénéficient d'une exonération de cotisations sociales pour les emplois de personnels de recherche et d'appui à la recherche. Désormais, cette dépense fiscale se limite aux JEI existant avant le 31 décembre 2023. En effet, la loi de finances initiale pour 2024 a supprimé cette exonération fiscale pour les entreprises créées à partir du 1er janvier 2024 dans le cadre de la refonte du dispositif.

Cette réforme s'est accompagnée de la création de deux nouvelles catégories de JEI : les JEIC (innovation et croissance) et les JEIR (innovation et rupture). Deux nouvelles dépenses fiscales ont été instaurées à leur profit. Elles prennent la forme d'une réduction d'impôt sur le revenu au titre des souscriptions au capital de jeunes entreprises innovantes et d'une réduction d'impôt sur le revenu au titre des souscriptions au capital de jeunes entreprises innovantes qui réalisent un pourcentage de dépenses de recherche supérieur à 30 %.

Le cumul du crédit d'impôt recherche (CIR) et du statut JEI/JEC permet de bénéficier d'allègements fiscaux et de trésorerie directe pour financer les dépenses de R&D. Il est à noter que le CIR se déduit des subventions reçues, ce qui peut affecter la capacité de développement de jeunes entreprises confrontées à des difficultés de trésorerie.

La préservation du secret fiscal ne permet pas de présenter des données précises sur le montant des recettes fiscales dont ont bénéficié individuellement les *startups* du quantique. Ces données montrent que les créances correspondantes des principales *startups* de *hardware*[33] de *software*[34] et de technologies habilitantes[35] ont atteint respectivement, en moyenne, 7,33 M€, 1,87 M€ et 0,8 M€, en moyenne, en 2022 et 2023.

[32] 15 % jusqu'au 31 décembre 2024, loi de financement de la sécurité sociale pour 2025.
[33] Pour l'ensemble des sociétés Alice & Bob, Quandela, Pasqal, Quobly, C12 et Cristal Quantum Computing.
[34] Qubit Pharmaceuticals, ColibriTD, Qubitsoft, Q Perfect, Multiverse Computing et Quantfi.
[35] Toptica Photonics, EXAIL, Alphanov, Silentsys, MyCryoFirm, Cryoconcept, Welinq, Silent Saves.

B - Un soutien régional marginal, compensé par des financements nationaux fléchés vers les régions

Bien que le financement provenant des collectivités territoriales demeure modeste au regard de l'investissement public national dans le quantique, il constitue un indicateur précieux. Il témoigne en effet de l'émergence, au sein des territoires, d'une dynamique visant à permettre aux acteurs académiques et socio-économiques de s'approprier pleinement ce sujet. Certaines régions suivent ces financements, ce qui traduit leur engagement sur le sujet et leur capacité à le piloter[36].

La recherche en informatique quantique se concentre essentiellement dans la région parisienne et dans l'aire grenobloise. Ces deux pôles rassemblent à eux seuls près de 80 % des activités du domaine.

Ces deux régions ont développé des projets visant à accélérer le développement de la recherche en matière d'informatique quantique et à développer un réseau d'acteurs dans ce domaine. En Île-de-France, le *Pack quantique* constitue le financement régional le plus important, doté de 8 M€. Lancé en 2020, il a permis l'émergence de 14 projets expérimentaux entre des industriels et des *startups*. *QuanTiP Network* est un projet complémentaire, qui a permis de développer un réseau d'acteurs autour du quantique, réunissant aujourd'hui près de 1 200 chercheurs venant de 42 laboratoires. À Grenoble, un réseau similaire s'est formé autour de *QuantAlps*, une fédération d'acteurs regroupant plus de 200 chercheurs venant de 18 laboratoires.

Dans d'autres régions, des initiatives locales ont également émergé, en fonction de la maturité du tissu académique et socio-économique local. En Nouvelle-Aquitaine, le réseau *Naquidis* offre ainsi un soutien financier aux projets innovants depuis 2021, en associant les entreprises et les *startups*.

Au-delà de ces initiatives régionales spontanées, le SGPI a lancé, dans le cadre du projet HQI, un appel à projets visant à déployer des *Maisons du quantique* sur l'ensemble du territoire. L'objectif est de créer ou de renforcer des réseaux locaux autour du calcul quantique hybride, en leur apportant un cofinancement sur trois ans ainsi qu'une mise en réseau aux échelles nationale, européenne et internationale. Les consortia candidats doivent par ailleurs démontrer la viabilité de leur projet au-delà de cette période de soutien. Ces réseaux locaux bénéficient ainsi d'un accès privilégié aux plateformes HQI. Les projets sélectionnés doivent également contribuer à développer l'usage du calcul hybride, notamment en proposant des initiatives facilitant les collaborations entre acteurs industriels et académiques.

Bien que lancé en juin 2024, les fonds de l'appel à projets n'ont été versés aux régions lauréates (Occitanie, Auvergne-Rhône-Alpes, Grand Est, Nouvelle-Aquitaine et Île-de-France) qu'à l'été 2025. Les initiatives correspondantes n'ont, de ce fait, pas encore pu être engagées de manière opérationnelle, ce qui ne permet pas d'en établir un premier bilan.

Le montage complexe de cet appel à projets, assuré par l'ANR mais piloté par le Genci (grand équipement national de calcul intensif), semble avoir suscité une charge administrative importante, qui explique le versement tardif des financements, intervenu près d'un an après la date initialement prévue. Étant donné que l'appel à projets ne couvre qu'une période de trois ans, ce décalage risque d'en réduire l'impact.

[36] *Cf.* le tableau sur les financements régionaux figurant dans l'annexe n° 8.

À ce stade, les Maisons du quantique sont principalement mobilisées pour financer des actions de sensibilisation à l'informatique quantique à destination des acteurs économiques, pour soutenir le recrutement de chercheurs ainsi que pour développer des infrastructures mutualisables entre acteurs académiques et industriels. Peu d'entre elles investissent effectivement dans des locaux spécifiques : la dénomination "Maison" ne correspond donc pas, en pratique, à la création d'un guichet physique sur ce sujet.

Leur articulation avec les dispositifs préexistants est à parfaire. Dans la majorité des cas, la création des Maisons du quantique s'est appuyée sur des réseaux déjà existants et ne vise donc pas à constituer un réseau *ex nihilo*. Lorsque des initiatives locales sont déjà en place (*QuantAlps, Pack quantique, NAQIDIS*), la complémentarité des deux démarches reste à établir. De même, l'articulation avec le réseau *France Num* doit être précisée. Dans ce contexte, la création des Maisons du quantique peut apparaître redondante. En toute hypothèse elle appelle une clarification des périmètres et des rôles respectifs des dispositifs existants.

Les financements alloués aux Maisons du Quantique sont modestes. Ils sont fréquemment complétés par des contributions régionales. C'est le cas, par exemple, de la région Grand Est, qui a investi, sur trois ans, un montant équivalent à celui de l'État, soit 1,2 M€. Les financements régionaux portent également sur le soutien aux infrastructures, souvent en lien avec les fonds européens du FEDER.

C - Les fonds européens, source complémentaire de financements pour l'ensemble de l'écosystème quantique français

Les financements l'Union Européenne (UE) se concentrent sur les dispositifs classiques de soutien à la recherche. Il n'y a pas de guichet spécifique pour le quantique, mais quatre guichets consacrés à la recherche et l'innovation qui reposent sur des appels à projets :

- les bourses de *l'European Research Council* (ERC) pour la recherche fondamentale ;
- les actions Marie Skłodowska-Curie (MSCA) pour la mobilité, la formation et le développement de la carrière des chercheurs ;
- les fonds de *l'European Innovation Council* (EIC), qui financent les *startups* et le développement de technologies de rupture ;
- les fonds du *Digital Europe Program*, qui visent à conduire et à accélérer la transformation numérique.

Toutes ces actions sont regroupées sous l'égide du programme *Horizon Europe* sur la période 2021-2017, qui a succédé à *Horizon 2020* pour la période 2014 à 2020. L'un des cinq axes majeurs de ce programme concerne le numérique, l'industrie et l'espace, qui comprend les technologies quantiques et le calcul quantique. Certains programmes d'*Horizon Europe* sont directement consacrés au quantique et financés en partie par les guichets précédemment cités.

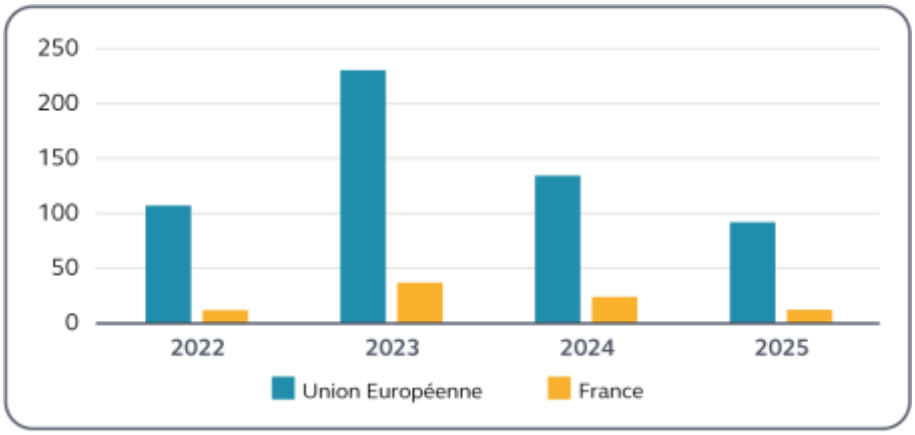
Le principal programme en termes de financement est le *European Quantum Flagship*. Lancé en 2018, c'est l'un des plus ambitieux projet de recherche et d'innovation à long terme de l'UE. Ses objectifs sont de consolider et d'étendre le leadership scientifique européen et l'excellence dans le domaine de la recherche quantique, mais aussi de donner le coup d'envoi à la constitution d'une industrie européenne compétitive dans le domaine des technologies quantiques.

Toutefois, bien que doté d'un budget d'un milliard d'euros sur dix ans, il ne possède pas de mécanisme de financements propres et additionnels aux dispositifs existants. En effet, les projets qu'il soutient et auxquels il apporte son étiquette sont financés par l'ERC ou l'EIC. Entre 2018 et 2022, la phase de montée en puissance a mobilisé 152 M€ pour 24 projets impliquant plus de 1 600 chercheurs[37]. La phase actuelle, financée par *Horizon Europe*, dispose de plus de 400 M€ pour renforcer le leadership européen et rapprocher la recherche de l'industrie, avec pour vision à long terme le développement d'un Internet quantique européen.

D'autres projets européens, structurés autour de thématiques bien définies, disposent de lignes de financements propres dans le cadre du programme *Horizon Europe* mais leurs montants ne sont pas à la hauteur des enjeux : *QuantERA*[38] (117 M€ sur les quatre appels à projets successivement organisés), *Photonics* (480 M€ pour la période 2020-2027), **Euramet** consacré à la métrologie, *Euro HPC* et *Euro QCI* (infrastructure de communication quantique sécurisée, l'un des principaux piliers de la stratégie de cybersécurité).

Ces montants sont minimalistes au regard de ceux investis par les pays membres de l'Union européenne dans le cadre de leurs différentes stratégies nationales. Ils sont également sous-dimensionnés par rapport aux besoins d'investissements requis dans les technologies quantiques, particulièrement pour le calcul. La croissance des entreprises concernées repose uniquement sur les investissements capitalistiques. Or le taux d'effort global est orienté à la baisse, après un pic en 2023.

Graphique n° 6 : financements, tous guichets confondus, attribués par l'UE à la France et à l'ensemble des pays européens sur l'informatique quantique et les technologies habilitantes (en M€)



Source : Cour des Comptes, à partir de la base de données E-cordis (2021-2025)

Les acteurs français du quantique ont su se saisir des financements européens, malgré une mauvaise coordination dans les procédures et agenda. En effet, les taux de retour montrent qu'ils mobilisent proportionnellement davantage ces fonds que dans d'autres domaines.

[37] Dont *OpenSuperQ*, qui est un projet consacré au développement d'un ordinateur quantique supraconducteur de niveau mondial, et le projet *AQTION*, centré sur la réalisation d'un ordinateur quantique basé sur des ions piégés.
[38] *QuantERA* est un réseau multinational composé de représentants de plus de 40 organisations de financement de la recherche, visant à garantir une recherche d'excellence en technologies quantiques. Le programme est coordonné par le Centre National des sciences (NCN), Pologne, et le Secrétariat de Call géré par l'Agence nationale de la recherche (ANR), France.

Concernant la recherche fondamentale dans l'ensemble des technologies quantiques, ce taux est relativement stable autour de 16 %. Par ailleurs, la France participe à une vingtaine de projets sur 27 et capte environ 15 % des financements dans le cadre du Quantum Flagship.

Dans le budget 2025 de l'UE, la part de la France dans le total des contributions nationales a atteint 18,3 %[39]. La contribution allemande s'est élevée à 22,3 %. Ce sont les deux efforts les plus importants parmi les pays de l'Union. Le taux de retour de la France sur les technologies quantiques et le calcul quantique reste supérieur à la proportion moyenne (11,4 %) des crédits alloués par la Commission européenne dans le cadre du programme *Horizon Europe* (2021-2027).

Horizon Europe 2020 : un bilan nuancé de la participation française[40]

En mars 2024, le ministère chargé de la recherche a publié un bilan d'*Horizon Europe 2020*. Le rapport a souligné le contraste entre la performance en montants absolus et les résultats attendus, ce qui traduit à la fois une performance relative insuffisante et une dynamique de tassement. Ces médiocres résultats ont trois causes principales :

Le facteur le plus déterminant est le faible volume des candidatures françaises : le taux de succès de la France a atteint 15,9 %, mais les demandes de financement émanant de chercheurs français n'ont représenté que 8,6 % des dossiers.

Le rapport a également mis en évidence une faible inclination des équipes françaises à la coordination des demandes. La France a en effet coordonné seulement 8,7 % des projets collaboratifs retenus (contre 15,9 % pour l'Espagne et un peu plus de 10 % pour l'Italie et l'Allemagne). Or, la coordination offre une plus grande visibilité et traduit un *leadership* scientifique et un statut qui favorisent l'influence sur les programmations futures. Cet investissement permet en effet d'amorcer des cycles vertueux. Dans le domaine du quantique, les acteurs ont su se coordonner à l'échelle nationale. Une entreprise française, Pasqal, a accepté de s'investir dans la coordination de l'une des six lignes pilotes annoncées pour soutenir les différentes technologies de calcul quantique. Une autre de ces lignes est coordonnée par un centre de recherche autrichien, à statut public, créé en 2018. L'un des trois ONR engagés dans le PEPR quantique pourrait également assurer une telle coordination.

La participation inférieure à la moyenne européenne des universités et des ONR témoigne de la sous-performance du secteur académique. Ce déficit de participation est en parti masqué par la forte concentration des acteurs, tant institutionnelle que géographique. Plus de la moitié des financements académiques sont en effet captés par la région parisienne. Dans le secteur quantique, la forte concentration géographique s'explique davantage par la rareté des infrastructures et des équipes, ce qui en fait, pour ce secteur, un élément de bonne gestion. Le rapport a d'ailleurs souligné que le taux de retour sur le volet infrastructures était exceptionnel, ce qui se vérifie dans le secteur du quantique.

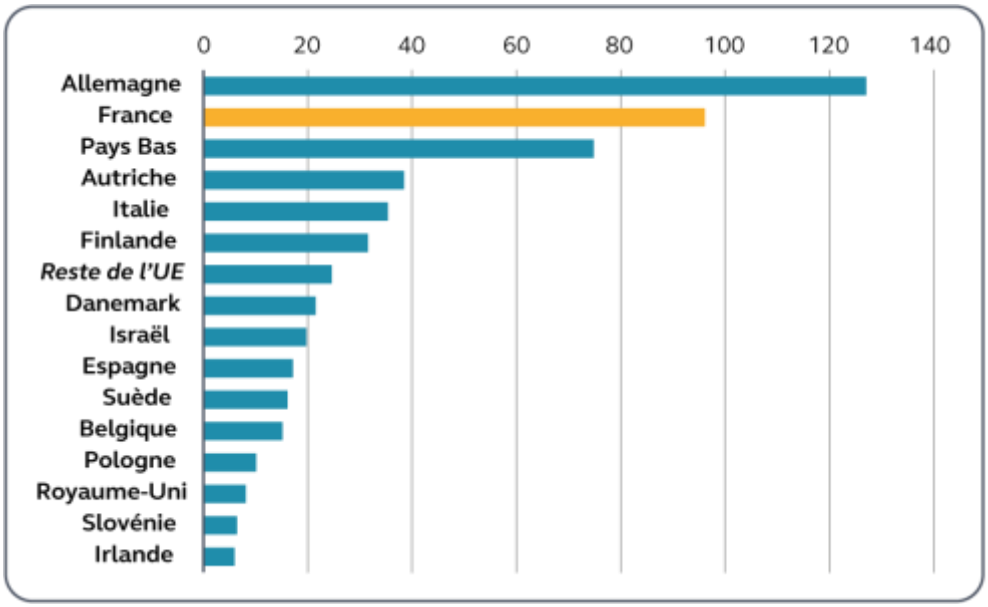
⁂

Il ressort de cet ensemble d'éléments que l'informatique quantique et les technologies habilitantes semblent moins affectées par les difficultés structurelles identifiées dans le rapport, même si les leviers qu'il propose d'activer permettraient sans doute d'améliorer les performances des acteurs y compris dans ce domaine.

[39] La contribution française au budget de l'UE était de 16,1 % en 2014 et de 15,7 % en 2020. Le choc de la crise sanitaire et l'impact du Brexit ont conduit à un effort accru en montant absolu et relatif.

[40] Cour des comptes, *La mobilisation des fonds européens en matière de recherche : les programmes Horizon 2020 et Horizon Europe – Un effort à accentuer – 2014-2024*, communication à la commission des finances de l'Assemblée nationale, janvier 2025.

Graphique n° 7 : financements reçus par les 15 pays éligibles à *Horizon Europe* ayant reçu le plus de crédits en informatique quantique sur la période 2021-2025 (en M€)

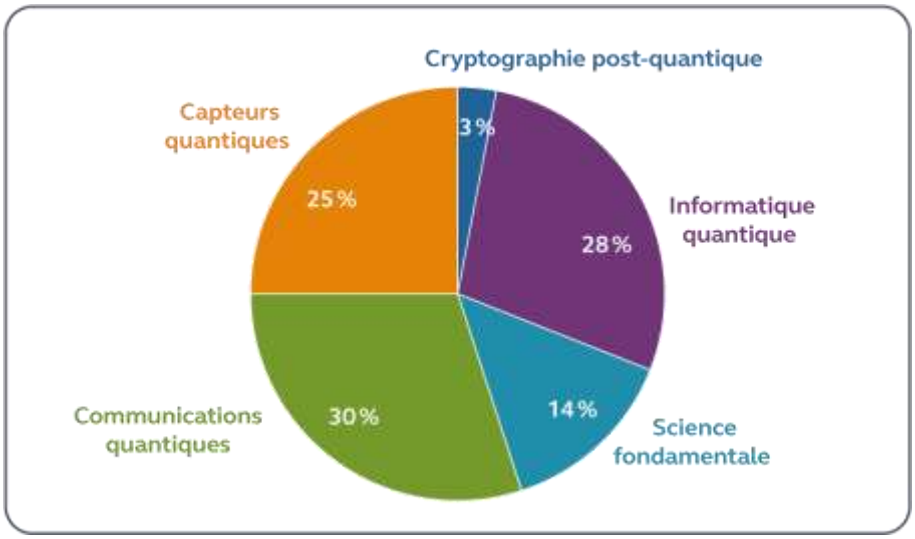


Source/note : Cour des Comptes, à partir base de données E-cordis (2021-2025). Les pays éligibles sont les 27 États membres (les pays membres qui ne figurent pas individuellement sont regroupés dans la catégorie « reste de l'UE ». Des pays non membres sont associés, y compris au-delà du continent européen (par exemple le Royaume-Uni).

Le calcul quantique capte environ un quart des financements attribués aux technologies quantiques. Les acteurs français ont obtenu près de 17 % de ces financements européens. C'est un point de plus que le taux de retour sur l'ensemble des technologies quantiques et témoigne du dynamisme de l'écosystème lié à l'ordinateur quantique.

Pour la recherche académique, le CNRS est l'entité qui obtient le plus de subventions européennes dans le calcul quantique : l'établissement public a bénéficié à ce titre de près de 24 M€ à travers le programme *Horizon Europe*.

Graphique n° 8 : répartition des fonds européens attribués dans le domaine des technologies quantiques, entre 2014 et 2024, par technologie



Source: Future directions for quantum Technology in Europe,2025, Joint Research Center, p. 46

Avec cinq des 12 *startups* (et sept des 20) les plus subventionnées, l'écosystème français est aussi le plus compétitif et le plus développé. À titre de comparaison, l'Allemagne dispose d'un tissu de *startups* plus dense mais une seule d'entre elles figure dans le top 12. Par ailleurs, la France est présente dans l'ensemble des domaines de recherche et est positionnée sur toutes les technologies de calcul quantique, à l'exception des ions piégés[41] et des qubits topologiques (ces derniers constituant la technologie la moins mûre). Elle peut donc envisager un nombre important de partenariats, contrairement à certains pays qui se sont concentrés sur un nombre restreint de technologies.

[41] La société française Crystal Quantum Computing utilise bien cette technologie mais est loin de la maturité des autres jeunes pousses nationales, alors que des concurrents internationaux sont bien installés.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le principal succès de la stratégie nationale quantique est sans doute d'avoir optimisé les budgets alloués dans un contexte de forte contrainte budgétaire. Tout le spectre de la filière est couvert et les programmes ne souffrent pas de retard notable, malgré une comitologie qui pourrait être allégée. Cet investissement a permis à la France de se positionner comme un compétiteur crédible, même si sa position reste fragile.

Est aujourd'hui posée la question de la pérennisation du soutien de l'État à l'informatique quantique au-delà de la période couverte par la SNQ. Cette pérennisation est indispensable s'agissant d'une technologie dont l'acquisition constitue un enjeu majeur de souveraineté pour notre pays. Quelles qu'en soient les modalités, elle devra être précédée d'une évaluation des besoins afférents. La rapidité des évolutions constatées imposera par ailleurs d'en revoir le calibrage à échéances régulières.

La Cour formule les recommandations suivantes :

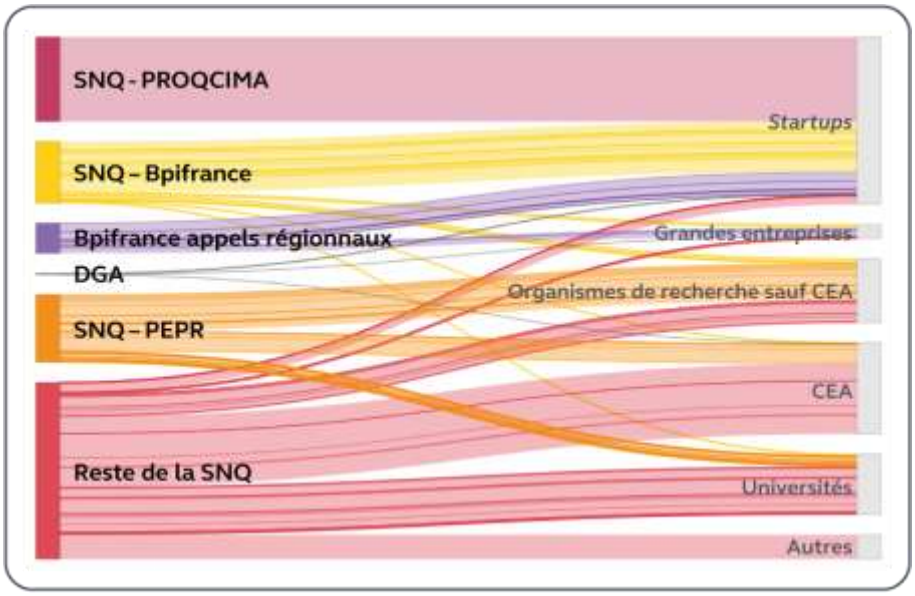
1. *veiller à ce que l'effort supplémentaire de financement du soutien de l'État à l'informatique quantique de 1 Md€, annoncé pour les cinq prochaines années, ait bien un effet de levier à travers le secteur privé, en renforçant la contribution du ministère des armées (SGPI, ministère des armées et des anciens combattants, 2026) ;*
2. *dans le soutien apporté au secteur privé, augmenter le poids des avances remboursables par rapport aux subventions et recourir davantage à la commande publique notamment au travers du programme PROQCIMA afin de faciliter la consolidation des entreprises (SGPI, ministère des armées et des anciens combattants, 2026) ;*
3. *renforcer le suivi consolidé de tous les financements, transversaux par nature tant dans leur destination que dans leur origine (SGPI, 2026).*

Chapitre III

Un soutien public important sur l'ensemble de la chaîne de valeur qui ne peut compenser la faiblesse de l'investissement privé

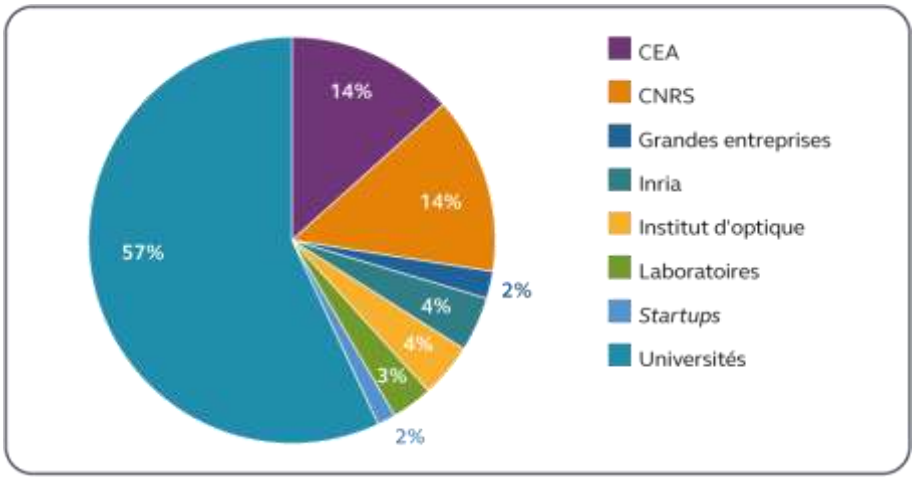
Les financements publics s'adressent à tous les acteurs (publics ou privés) quelle que soit leur taille ou leur positionnement dans la chaîne de valeur. La formation, le continuum de recherche et l'innovation disposent de différents guichets. La spécialisation des sources de financements n'est cependant pas totalement rigide.

Graphique n° 9 : bénéficiaires des financements publics à l'informatique quantique (AE 2021-2025)



Source : Cour des comptes. Ce graphique représente les flux de financement avec à gauche les sources de financement, et à droite, les bénéficiaires. Les couleurs chaudes (rouge foncé, rouge clair, orange et jaune) correspondent à différents financements de France 2030. *Les flux violets sont issus à 50 % de* France 2030 *et à 50 % de fonds propres de l'opérateur. Le flux gris correspond à des fonds propres. L'ANR n'est pas représentée car les informations fournies n'ont pas permis d'identifier les destinataires des subventions dans plus de 50 % des projets.*

Graphique n° 10 : bénéficiaires de l'ANR
(sur le portefeuille de projets où ils sont identifiés)



Source/note : Cour des comptes. Les universités sont les principales bénéficiaires de 19 M€ alloués entre 2020 et 2025 par l'ANR.

I - Des formations variées qui répondent aux besoins

Avant la mise en place de la stratégie nationale quantique, l'offre de formation de l'enseignement supérieur dans ce domaine était relativement limitée en France. Le rapport Forteza de janvier 2020 recommandait déjà de « *concevoir des parcours de formation avec une spécialisation en ingénierie et en informatique quantique et anticiper la croissance du besoin en ingénieurs et techniciens des filières industrielles* ». En effet, la montée en puissance et les enjeux des technologies quantiques nécessitent de recruter des ingénieurs et des techniciens ayant reçu des formations adéquates et disposant des compétences nécessaires dans les équipes de recherche, dans les *startups* et plus tard dans les PME.

A - Les effets visibles des financements publics pour la formation initiale et continue

Trois projets pilotes financés chacun à hauteur de 1,033 M€ ont servi de précurseurs au projet national *QuanTEdu France*. Sur quatre années universitaires à compter de la rentrée de 2021 (*cf.* l'annexe n° 10), ils ont permis d'anticiper, d'accompagner et d'accélérer les transformations des programmes de formation.

Ainsi, en 2021, la première vague de l'appel à manifestation d'intérêt *Compétences et métiers d'avenir* (AMI CMA), opérée conjointement par l'Agence nationale de la recherche et la Banque des Territoires par délégation de *France 2030*, a retenu 65 projets en technologies du quantique auxquels ont été accordés 56,7 M€ sur les 304 M€ de l'AMI.

Le budget prévisionnel total du programme *QuanTEdu* s'élève à 107 M€, dont 56,7 M€ sous forme de subvention. Début janvier 2026, le SGPI a confirmé le dégel des 20 % qui avaient été mis en réserve. La totalité des crédits pourra donc être consommée.

1 - Une offre de formation initiale et continue qui s'étoffe

La stratégie nationale quantique (SNQ) a prévu dès l'origine de renforcer l'offre de formation grâce à l'action CMA de *QuanTEdu-France* pour la période 2022-2027. Le principal objectif du programme *QuanTEdu-France* consiste à permettre aux étudiants d'accéder à ces technologies avancées et coûteuses pendant leur formation.

L'évolution de la carte des formations constitue un premier axe du programme. Une grande attention est portée l'adaptation et à la création de nouveaux enseignements, avec un soutien particulier à l'interdisciplinarité entre mathématiques, physique et informatique. Le programme a ainsi permis la création de nouveaux masters et l'adaptation d'une quinzaine de masters existants vers les technologies quantiques. Parmi les 37 programmes de master existants, 13 sont consacrés aux technologies quantiques.

Les effectifs y ont augmenté de 40 % entre 2022 et 2025, avec une cohorte de 1 100 étudiants pour l'année universitaire 2024-2025. Ils ont désormais tendance à se stabiliser. Les années à venir permettront de vérifier si les initiatives de sensibilisation menées dans les collèges, les lycées et les formations de licence, dans le cadre du programme *QuanTEdu*, auront un impact positif, alors que les effectifs en première année de licence dans les filières physique, informatique et mathématiques connaissent une légère diminution.

La formation continue, dont la couverture nationale est marquée par le tropisme francilien, est encore insuffisante au centre ouest (*cf.* la carte figurant dans l'annexe n° 10). Elle correspond à la localisation des 23 membres du consortium qui couvre tant la formation initiale que continue.

Le programme *QuanTEdu-France* consacre 65 % de son budget au financement de contrats doctoraux. Le coût moyen d'une thèse s'établit actuellement autour de 120 000 €, dépense qui comprend l'aide à la mutuelle et, selon les établissements, une aide pour les transports.

Ainsi, sur environ 550 thèses en sciences et technologies quantiques réalisées en France entre 2021 et 2025, le programme en a financé 139 (dont 120 financées à 100 % et 19 co-financées à hauteur de 50 %). Parmi les thèses financées par *QuanTEdu*, 13 % relèvent de l'informatique quantique[42], 16 % d'algorithmes et simulation quantique et 12 % sont en lien avec les technologies habilitantes. Il n'est toutefois pas possible de disposer d'indicateurs relatifs à l'insertion professionnelle des doctorants, les premières thèses financées par le programme ayant été soutenues à la rentrée 2025. Les dernières thèses qui bénéficieront de ce soutien débuteront en septembre 2027 et produiront leurs effets au-delà de 2030.

Avant 2021, l'essentiel des efforts a porté sur le niveau doctoral et l'enseignement dispensé reposait essentiellement sur la physique quantique fondamentale. *QuanTEdu* finance également des stages afin que les étudiants puissent intégrer le plus rapidement possible les laboratoires de recherche.

[42] 18 thèses autour des qubits supraconducteurs, de spins, photoniques et atomes froids pour le calcul.

2 - Les chaires de professeur junior (CPJ), un nouveau dispositif de début de carrière qui contribue à l'attractivité des talents et à la formation du futur vivier

Depuis la loi de programmation de la recherche en 2020, des postes ont été créés grâce au dispositif des chaires de professeur junior (CPJ). Cet effort s'inscrit dans les plafonds d'emplois des établissements d'enseignement supérieur et de recherche et vise à accélérer la carrière académique de jeunes talents. Cette modalité de recrutement sécurise les parcours avec la perspective d'une titularisation dans le corps des professeurs d'université ou assimilés, ou des directeurs de recherche. Le dispositif prévoit également d'allouer une somme de 200 000 € pour mener les activités de recherche[43].

Le CNRS a ainsi mobilisé ce dispositif en ouvrant plusieurs CPJ dans des domaines relevant, directement ou indirectement, du périmètre des sciences quantiques :

- les matériaux innovants en 2022 ;
- les matériaux quantiques en 2023 ;
- la spintronique en 2025 ;
- les machines quantiques bruitées de taille intermédiaire (machines NISQ), en 2025 qui se situent à l'interface entre le département de physique et celui des sciences informatiques.

Plus globalement, ce dispositif, qui porte sur environ 200 postes chaque année depuis 2021, a largement bénéficié aux domaines dits « *deeptech* », et aux postes par nature interdisciplinaires requis pour les technologies quantiques. Il est toutefois difficile de pourvoir ces postes, aux caractéristiques uniques. Ainsi, la chaire *Mesures de précision pour la physique fondamentale* publiée par le CNRS en 2024 n'avait toujours pas été pourvue au moment de l'arrêté de 2025[44]. Autre illustration de ces difficultés, l'université de Bordeaux, qui avait renoncé à la CPJ *Technologies quantiques* publiée en 2023, a pourvu le poste ultérieurement.

Tableau n° 2 : chaires de professeurs junior

	2021	2022	2023	2024	2025*	Total
Nombre de CPJ liées au quantique	4	7	8	5	7	**31**
dont calcul quantique	2	2	3	1	2	**10**
dont technologies habilitantes	2	2	1	1	4	**10**
dont technologies quantiques (capteur, communications, autres, crypto post-quantique, matériaux quantiques)	0	3	4	3	1	**11**

*Source : Cour des comptes d'après les données de la DGRI. * aucune signature de contrat pour le moment*

[43] À titre indicatif, 46 M€ ont été versés pour les CPJ en 2021 et 2022.

[44] Arrêté du 11 avril 2025 pris en application du décret n° 2021-1710 du 17 décembre 2021 relatif au contrat de CPJ prévu par l'article L. 952-6-2 du code de l'éducation et par l'article L. 422-3 du code de la recherche.

Indépendamment du programme *QuanTEdu*, le ministère de l'enseignement supérieur n'est pas en mesure de promouvoir une filière sur les technologies quantiques dans les établissements d'enseignement supérieur au travers de nominations de maîtres de conférences en raison de l'autonomie des universités.

3 - Le développement des plateformes de travaux pratiques et la formation continue

QuanTEdu a permis à tous les établissements de développer de nouveaux travaux pratiques (TP) dans le cadre desquels les étudiants peuvent expérimenter, de la troisième année de licence à la deuxième année de master, les concepts des technologies quantiques, et plus uniquement de la physique quantique, grâce à de nouvelles plateformes d'expérimentation, accessibles à la formation initiale et continue. Ces plateformes sont consacrées à trois axes majeurs : l'optique quantique, les capteurs quantiques avec les centres NV[45] du diamant, ou les qubits de la matière condensée (qubits supraconducteurs ou de spin).

Le programme *QuanTEdu* les a financées à hauteur de 30 % à 50 %.

B - L'incertitude sur une partie des financements dès la rentrée 2028 obère les ajustements durables de l'offre de formation

Le programme *QuanTEdu* prenant fin en août 2027, la question de la pérennité du financement de certaines formations se pose. L'incertitude concernant l'avenir pousse les responsables de ces formations à rechercher des synergies avec d'autres établissements afin de mutualiser les coûts et maintenir ces formations et les plateformes de TP qui auront été financées à hauteur de 4,8 M€ par *QuanTEdu*.

Comparaison entre un master historique dirigé par l'ENS Paris et un nouveau master porté par l'université PSL grâce aux financements de France 2030

Le master historique du Centre international de physique fondamentale (ICFP), peu coûteux et orienté sur la recherche fondamentale.

Créée en 2010, cette formation est issue de la fusion de quatre masters préexistants (années 1980-1990). Porté par l'école nationale supérieure de Paris (ENS Ulm), son programme est dirigé conjointement par quatre établissements partenaires (Sorbonne Université, université Paris-Cité, université Paris-Saclay et Institut Polytechnique de Paris). Il est organisé autour de quatre parcours : physique théorique, physique quantique, physique de la matière condensée et matière molle. Un cinquième parcours consacré aux questions d'énergie et de climat ouvrira à la rentrée 2026.

C'est une formation sélective et attractive (les élèves sont majoritairement issus des grandes écoles et un tiers provient de l'étranger) avec de petites cohortes (environ 130 étudiants par parcours). Cette formation d'excellence (le taux de succès en master est de 100 %) constitue un vivier pour les chercheurs, la quasi-totalité des étudiants poursuivant leurs études en thèse.

Le coût de cette formation est d'environ 50 000 € par an, correspondant majoritairement à la rémunération des chercheurs du CNRS.

[45] NV pour Nitrogen-Vacancy, soit azote-lacune.

Le récent master *Quantum Engineering* (ingénierie quantique), avec un fort taux d'encadrement pour de nombreux travaux pratiques dans les infrastructures de recherche, présente des coûts de fonctionnement importants.

Ce master d'ingénierie quantique, lancé en septembre 2022, est porté par l'université PSL. Il résulte d'une synergie entre certaines de ses écoles fondatrices : l'ENS, l'ESPCI Paris, les Mines Paris, l'École nationale supérieure de Chimie de Paris - PSL et l'Observatoire de Paris.

C'est également une formation sélective, avec des cohortes réduites : en master 1, 31 étudiants ont été admis en 2025 sur les 264 candidatures. Toutefois, seuls 16 étudiants étaient officiellement présents à la rentrée. L'attractivité pour les pays asiatiques est forte (201 candidatures sur 279 candidatures étrangères). En master 2, la formation a accueilli 19 étudiants.

Sur les 15 diplômés en 2024, 11 ont poursuivi en thèse (huit en France et trois en Europe). Sur les 15 étudiants diplômés en 2025, 11 ont poursuivi en thèse (neuf en France-IDF et deux en Europe).

Pour l'année 2024-2025, le coût global de la formation s'est élevé à près de 280 000 € dont 26 % de dépenses d'équipement et 59 % de dépenses consacrées aux ressources humaines. Ces dépenses sont principalement affectées aux bourses d'excellence (45 % du total de la formation). Une partie non négligeable (10 %) est aussi mobilisée pour réserver des chambres aux étudiants à la Cité internationale universitaire, afin de renforcer l'attractivité de la formation.

* * *

Les coûts de fonctionnement de ces deux formations varient dans un rapport de un à cinq. Cependant elles ne visent pas les mêmes débouchés. Le master historique en physique fondamentale forme le vivier des futurs chercheurs académiques, tandis que le nouveau cible davantage la recherche appliquée en entreprises. Le financement du second master sur des fonds France 2030 pose dès à présent la question de sa pérennité, alors que le vivier formé en France est insuffisant pour répondre aux besoins des entreprises installées sur le sol national, ces dernières recrutant de façon importante à l'étranger.

L'adaptation de la formation semble cependant très orientée sur la physique et moins sur le volet informatique. Or les besoins portent aussi sur les volets « architecture » et « correction d'erreur », ainsi que sur l'articulation entre informatique classique et informatique quantique.

Le développement de l'enseignement supérieur privé ne permettra pas d'absorber les cohortes d'étudiants qui sont aujourd'hui financées par des crédits publics non pérennes (France 2030, à travers *QuanTEdu*). Signe d'une attente des étudiants et des entreprises, il prospère toutefois, malgré des coûts de scolarité plus élevés que dans le secteur public.

À titre d'exemple, l'École pour l'informatique et les techniques avancées (EPITA) est une école d'ingénieurs avec une orientation sur la recherche appliquée. Le stage de fin d'études qui conclut la formation se déroule dans une entreprise ou un laboratoire, et tous les acteurs institutionnels et industriels du secteur ponctuent le parcours de formation. Par ailleurs, l'école s'implique dans l'organisation pour la France du hackathon Quantum Internet Alliance au niveau européen.

L'école a créé en 2022 une nouvelle spécialisation (parmi 18 autres) consacrée à l'informatique quantique, avec une focale sur le développement logiciel quantique. Ce cursus forme des cohortes d'une vingtaine d'étudiants. Le taux d'insertion professionnelle de la première promotion a atteint 100 %, et 90 % des étudiants ayant répondu à l'enquête de l'école

ont été recrutés par l'entreprise dans laquelle ils ont fait leur stage. L'échantillon est peu représentatif, mais on peut également noter que 17 % d'entre eux ont été recrutés à l'étranger.

L'école prépare désormais la création d'une chaire d'enseignement et recherche sur l'informatique quantique, poursuivant la logique d'internalisation des compétences de recherche. Les recrutements sont budgétés et constituent de nouveaux investissements pour assurer le renouvellement du vivier d'ingénieurs et de chercheurs dans les logiciels quantiques.

C - Le secteur privé contribue au financement de la formation avec les thèses Cifre

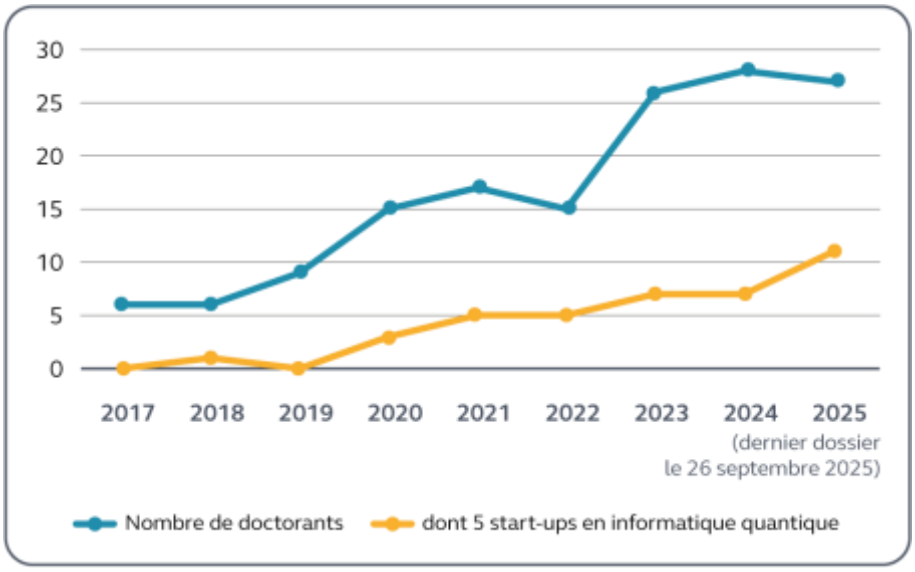
Le dispositif *Cifre* (Convention industrielle de formation par la recherche) permet de financer une thèse en partenariat entre une entreprise et un laboratoire universitaire. Son objectif est de favoriser le développement de la recherche partenariale public-privé et de favoriser l'insertion des doctorants dans le monde professionnel[46].

Le ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'espace (MESRE) a confié la mise en œuvre de ce dispositif à l'Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT). L'ANRT contracte avec l'entreprise une convention sur la base de laquelle une subvention est versée à l'entreprise. La subvention annuelle atteint 14 000 €, à laquelle peuvent s'ajouter les avantages liés au crédit d'impôt recherche (CIR) et éventuellement au statut de « Jeune entreprise innovante » (JEI).

Ce dispositif a permis de financer plusieurs dizaines de doctorats, combinant recherche académique et innovation industrielle. La DGRI indique que l'objectif d'une croissance significative du nombre de doctorants a été atteint dès 2024 avec rapport d'une fois et demi comparé à la situation antérieure à la stratégie nationale quantique.

[46] Cour des comptes, *Les partenariats entre la recherche publique et les entreprises : Mieux diriger les soutiens publics, favoriser l'engagement des chercheurs*, rapport d'évaluation de politique publique, juillet 2026.

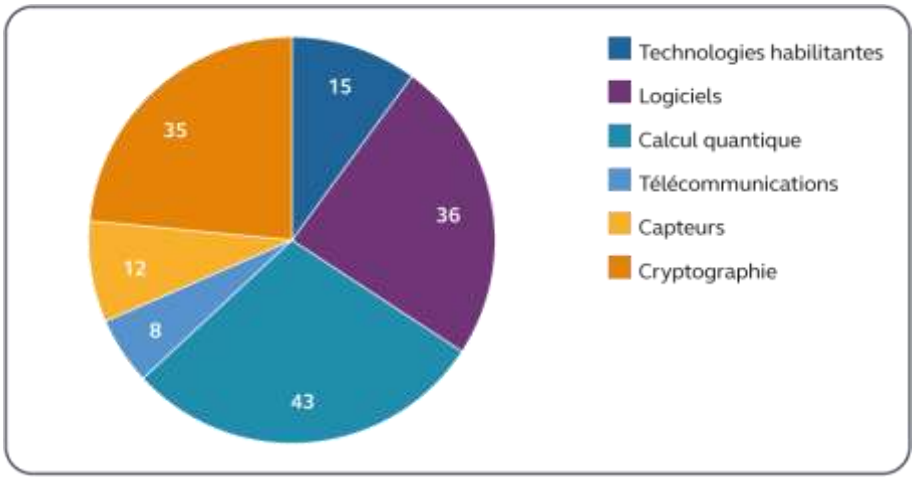
Graphique n° 11 : thèses Cifre financées dans le domaine quantique et post-quantique



Source : Cour des comptes d'après ANRT

Ce sont au total 149 doctorants qui ont été formés entre 2017 et 2025, dont 77 % de Français et 9 % d'étudiants issus de l'Union européenne, principalement sur les thématiques du calcul quantique (29 %), du *software* (24 %) et de la cryptographie (23 %). Le taux de féminisation des étudiantes est de 18 %, dont 63 % de françaises, 15 % sont issues du Maghreb et 4 % de l'Union européenne.

Graphique n° 12 : nombre de doctorants par thématique sur la période 2017-2025



Source : Cour des comptes d'après ANRT

Le dispositif *Cifre-Défense* subventionne les entreprises qui recrutent des doctorants travaillant sur des travaux d'intérêt défense. Il est financé par l'Agence de l'innovation de défense (AID) et mis en œuvre avec la collaboration de l'ANRT. Pour ce dispositif, le doctorant doit être ressortissant de l'UE, du Royaume-Uni ou de la Suisse. Trois des 67 thèses *Cifre-Défense* subventionnées pour les années 2021 à 2024 portent sur les technologies quantiques.

II - Une recherche publique au meilleur niveau qui essaime dans des technologies diversifiées

A - La recherche fondamentale, clé de voûte de l'écosystème

La particularité de l'écosystème du quantique réside dans la symbiose qui existe dans cette matière entre, d'une part, des laboratoires de recherche fondamentale et, d'autre part, des *startups deeptech* davantage orientées vers la recherche appliquée. Les infrastructures, rares et onéreuses, sont partagées par l'ensemble des acteurs (chercheurs publics et privés, pour de la recherche fondamentale ou expérimentale). La France dispose d'une plateforme spécifique sur le plateau de Saclay. Le Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N) a ainsi été conçu comme un ensemble flexible de blocs de salles blanches, utilisées en continu, simultanément ou en alternance par ces acteurs. Le modèle de l'université de Sherbrooke, développé dans le point suivant, témoigne aussi des effets d'entraînement de la recherche académique.

Les *startups* fonctionnent comme de véritables laboratoires privés, et les interconnections avec le monde de la recherche demeurent très importantes. Les interactions entre laboratoires et *startups* créent un écosystème vertueux : la recherche académique alimente les développements industriels, tandis que les entreprises renforcent l'attractivité du domaine et stimulent de nouvelles orientations scientifiques. Par ailleurs, la stratégie nationale quantique développe des technologies habilitantes indispensables au calcul, aux capteurs et aux communications quantiques : cryogénie, isotopes, électroniques de contrôle, sources laser.

La recherche fondamentale est majoritairement menée par le secteur public, incluant les organismes nationaux de recherche (ONR) dont certains sont des établissements publics à caractère industriel ou commercial (EPIC) de droit privé. L'accélération est notable dans la réorientation des ressources. Ces choix stratégiques, réalisés par les établissements eux-mêmes, sont financés en partie par la subvention pour charges de service public que le ministère chargé de la recherche leur attribue. Toutefois, les dotations des laboratoires sont majoritairement obtenues par les contrats de recherche ou les partenariats avec des acteurs privés. De ce fait, le taux d'effort des établissements est difficile à chiffrer précisément, mais il s'ajoute aux financements publics précédemment évoqués.

- Le CNRS a procédé depuis 2019 au recrutement de près de 50 chargés de recherche dans ce domaine. Un effort particulier a été opéré afin de renforcer le pilier « algorithme » avec 15 % de recrutements fléchés sur l'informatique quantique à l'Institut des sciences informatiques. Le CNRS estime à environ 20 M€/an sa masse salariale sur le périmètre restreint de l'informatique quantique à partir des effectifs et d'un salaire médian en coûts complets.
- L'INRIA a renforcé ses compétences en multipliant par cinq le nombre de ses permanents dans le quantique (aujourd'hui 32 ETP), et en passant d'une équipe-projet spécialisée uniquement en quantique à six (sur huit avec un lien dans le quantique). L'établissement estime avoir investi près de 15 M€ sur le quantique en autofinancement, en masse salariale et par la mobilisation du fonds de roulement.

En revanche, les financements d'infrastructures sont orientés à la baisse, ce qui pose des difficultés pour assurer la jouvence ou le maintien en condition opérationnelle des installations existantes[47]. Le poste de dépense des fluides a suivi une courbe inverse du fait de l'augmentation des coûts énergétiques. C'est un centre de coûts important pour les technologies quantiques.

L'aversion au risque des acteurs économiques et l'incertitude scientifique concernant l'ordinateur quantique obligent l'État à compenser la faille de marché. En effet, le projet d'aboutir un jour à un ordinateur quantique universel et tolérant aux fautes, demeure extrêmement incertain sans être désormais utopique. Il s'agira probablement de l'une des machines les plus complexes jamais créée. De par sa complexité technique mais aussi par les perspectives stratégiques et économiques qui en découlent, ce projet peut être comparé sur certains aspects aux projets nucléaires ou spatiaux du XXe siècle.

Les principales entreprises du secteur sont toutes issues du monde de la recherche académique : ce sont des *spin-offs*, c'est-à-dire des entreprises issues de ces laboratoires. Cela est en grande partie dû à l'excellence sur la durée de la recherche française en physique quantique. Ces recherches ont permis la création de *startups* dans cinq technologies différentes : les atomes froids, les circuits supraconducteurs, la photonique, ainsi que les qubits de spins dans du silicium et dans des nanotubes de carbone, soit quatre des six technologies majeures existantes.

La robustesse du modèle français a fait ses preuves dans l'émergence d'un vivier dynamique et complet couvrant l'ensemble des acteurs du calcul quantique, ce qui est exceptionnel pour une puissance moyenne. Mais la pérennité de ce tissu de recherche fondamentale est menacée à plusieurs niveaux :

- le renouvellement du vivier académique dans un contexte global de perte d'attractivité de la recherche dans les sciences dites « dures », de perte d'attractivité de la carrière de chercheur dans le secteur public et d'une concurrence accrue à la fois des carrières à l'international et des emplois dans le secteur privé ;
- la fragilité d'entreprises fondées par des scientifiques dont la formation économique est limitée ;
- une acculturation variable aux enjeux de protection du patrimoine scientifique et technologique vis-à-vis de l'espionnage scientifique ;
- le maintien des financements pour soutenir l'environnement de recherche (matériel, personnels de soutien du continuum de la recherche, etc.).

Une action combinée sur ces différents leviers est de nature à valoriser économiquement les investissements réalisés dans la recherche fondamentale, dont le rayonnement participe au *softpower* du pays. Dans le cas contraire, les résultats de ces financements risquent d'être indirectement captés par des puissances étrangères, et la valeur économique transférée à des pays offrant les atouts qui font défaut à la France. Une étude d'impact approfondie pourrait être menée par les services économiques de l'administration (DGE et DGT, en coordination avec le

[47] Concernant la maintenance des équipements, RENATECH dispose de 2 M€/an, pris en charge par le TGIR CNRS à 50 % et par les contrats de recherche des cinq laboratoires principaux associés au réseau RENATECH.

SGPI) afin de quantifier l'effet de levier (à titre d'exemple l'étude sur les *LabEx*[48]), et le montant des transferts de valeur au profit et au détriment du pays.

B - L'équilibre entre recherche dirigée et recherche exploratoire, un levier pour orienter les recherches tout en favorisant l'innovation

La stratégie nationale quantique, à ses différents échelons de conception et à travers ses modalités de financement, témoigne d'un équilibre entre recherche dirigée et recherche exploratoire. En effet, l'allocation des financements publics de la recherche repose sur plusieurs mécanismes qui combinent la nécessité d'axer la recherche sur quelques priorités nationales et celle de préserver le principe de la liberté académique :

- le financement structurel par subventions (notamment les subventions pour charges de service public) soutient fortement la recherche exploratoire, tandis que les appels à projets permettent d'orienter les financements ;
- l'attribution de ressources fléchées à des structures de coordination thématique permet d'assumer des priorités, tout en laissant une certaine flexibilité dans l'usage des fonds. C'est le cas des programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), dont l'un des 47 existants est consacré au quantique[49]. La feuille de route du PEPR quantique est par ailleurs intrinsèquement équilibrée entre recherche dirigée et exploratoire ;
- la diminution des subventions au profit des partenariats avec le secteur privé oriente aussi la recherche. En informatique quantique, l'articulation avec les *startups* est forte et les projets de recherche sont souvent menés en bijection avec leurs besoins.

L'efficience de ce modèle de financement nécessite aussi en parallèle un suivi budgétaire car les financements sont alloués dans le cadre de l'annualité budgétaire.

C - Un écosystème dynamique en dépit des limites des indicateurs

Le suivi de la stratégie nationale quantique (SNQ) s'inscrit dans le cadre plus large de l'évaluation continue de France 2030, qui repose sur trois axes : la cohérence des investissements avec la doctrine du plan, l'efficacité de la gestion des programmes et l'atteinte des résultats escomptés. Ce suivi combine des évaluations ex ante, *in itinere* et *ex post*, fondées sur des indicateurs de moyens et de résultats centralisés par le SGPI, ainsi que sur la revue annuelle des feuilles de route conduite par le Comité de surveillance, dont les conclusions sont présentées au Premier ministre.

Le dispositif se concentre sur plusieurs dimensions : l'état d'avancement scientifique des programmes, les activités d'animation et de communication, la gouvernance, le positionnement stratégique et l'agilité face aux sujets émergents, ainsi que les perspectives de développement à moyen terme. Les indicateurs se déclinent en deux niveaux complémentaires :

[48] *La recherche publique a-t-elle des retombées positives sur la R&D des entreprises ? Le cas de la politique des LabEx*, 2023, Antonin Bergeaud, Arthur Guillouzouic, Emeric Henry, Clément Malgouyres, IPP.

[49] Cour des comptes, *Les agences de programmes*, communication à la commission des finances de l'Assemblée nationale, novembre 2025. Le rapport distingue les PEPR d'accélération, en appui d'une stratégie nationale (comme le PEPR quantique) et les PEPR exploratoires.

- 24 indicateurs communs à tous les projets *France 2030*, couvrant les dimensions technologique, économique, stratégique et environnementale ;
- Des indicateurs spécifiques à la stratégie quantique, destinés à mesurer la contribution des projets à la feuille de route du comité de pilotage ministériel opérationnel (CPMO). Certains de ces indicateurs figurent parmi ceux utilisés pour le suivi des « Politiques Prioritaires du Gouvernement » (PPG) et alimentent le tableau de bord présenté au Conseil interministériel de l'innovation (C2I).

Tableau n° 3 : indicateurs d'impact du PEPR quantique (2021-2024)

	Publications (preprint exclus)	Dont publications dans les revues à fort impact	Lancement de startups	Brevets/ licences	Thèses Cifre
Axe 1	45	22	1	8	14
Axe 2	55	26	0	2	5
Axe 3	186	43	0	22	22
Axe 4	23	8	2	2	4
EquipEx+	14	6	2	4	4
Total PEPR	**323**	**105**	**5**	**38**	**49**

*Source : Cour des comptes, d'après les éléments transmis pour la revue du PEPR à deux ans. L'axe 1 est consacré aux qubits robustes à l'état solide (pour le calcul quantique), l'axe 2 aux qubits atomes froids (pour la simulation), l'axe 3 aux algorithmes, et l'axe 4 à la communication quantique. L'*EquipEx+*, un appel à projets créé par le PIA3 qui finance des équipements, contribue à l'axe 2 et à la technologie centrée sur les diamants. France 2030 porte 15* EquipEx+ *différents qui soutiennent l'acquisition de matériels rares (pour* l'EquipEx+ E-diamant *sera le seul exemplaire de microscope magnétique installé en France.*

Les indicateurs affichés par la SNQ (objectifs en termes de création de *startups*) ne sont pas suivis assidûment. En revanche, le suivi des projets financés est effectué par le SGPI, qui tient à jour un registre des taux d'exécution de chaque projet. Le suivi des publications, des brevets ou des doctorants, ainsi que des jalons des différents projets, est assuré régulièrement par l'ANR qui contribue à leur suivi et à leur évaluation dans les conditions prévues dans les conventions conclues avec les lauréats des appels à projets.

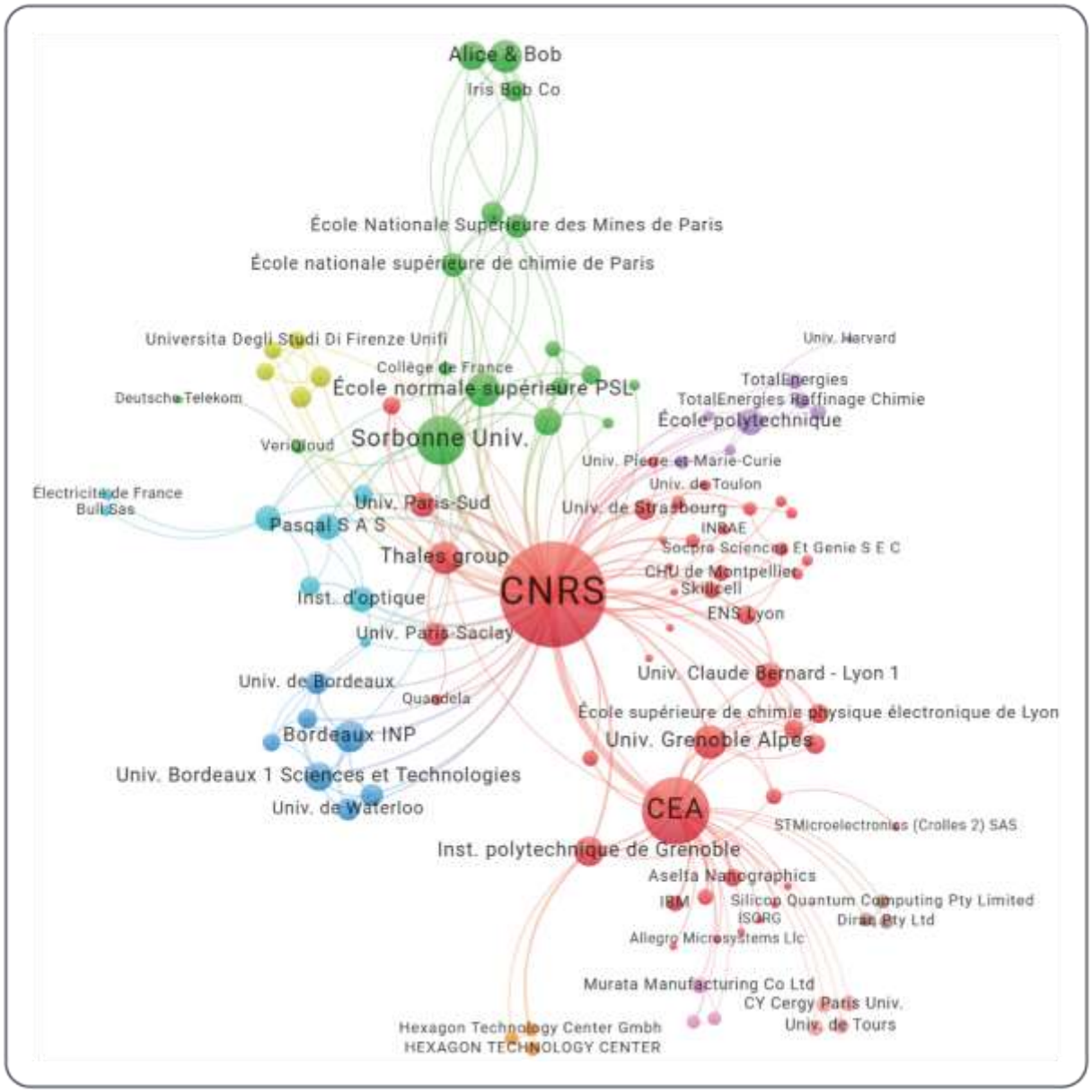
Toutefois, le suivi des indicateurs quantitatifs de performance s'avère difficile à mettre en place et peu pertinent. En outre, il faut prendre en compte un effet d'inertie : les publications obtiennent un pic environ trois ans après l'attribution des AE. Les crédits ayant été consommés à partir de 2022, les résultats de 2025 sont encore peu significatifs, d'autant que leur consolidation n'est fiable qu'avec un décalage temporel d'environ un an.

Le CNRS et le CEA sont les principaux déposants en France, secteurs public et privé confondus, même si les entreprises ont été davantage présentes sur la période récente. Cela peut aussi s'expliquer en partie par une stratégie de secret industriel développée par les industriels français. Il n'est toutefois pas encore possible de voir l'effet de la stratégie nationale quantique du fait d'un décalage de plusieurs années entre les fonds attribués à un projet et l'aboutissement d'un brevet.

Si les entreprises investissent aujourd'hui dans l'innovation et déposent une part importante des brevets, ce succès est à la fois le reflet d'une course pour attirer les talents

(objectif réputationnel) et réaliser des avancées technologiques avant les concurrents, mais aussi le résultat de l'appui apporté par la recherche fondamentale. En effet, les *startups* sont non seulement issues des laboratoires académiques, mais elles travaillent en symbiose avec eux. Le développement des machines permet la découverte de nœuds technologiques qui alimentent les recherches du secteur public. C'est le principe de la fertilisation croisée avec des boucles de rétroaction positives.

Schéma n° 3 : brevets en informatique quantique par établissement en France (2010-2023)



Source/note : outil ScanR, requête « quantum AND computing ». La taille des nœuds est proportionnelle au nombre de collaborations.

L'exemple de l'université de Sherbrooke (UdeS)

Au Canada, l'université de Sherbrooke (UdeS) offre un modèle aux résultats prometteurs dans la durée, proche de celui des districts industriels italiens[50].

L'université a certes bénéficié de circonstances favorables. Elle a ainsi obtenu des financements importants de l'État et d'acteurs locaux, dans le cadre d'une politique de dynamisation des villes moyennes[51]. Mais elle a fait plusieurs choix stratégiques judicieux :

Assumer une spécialisation dans un nombre limité de domaines, dont le quantique, afin de concentrer les investissements ;

Choisir une innovation de rupture très en amont de son émergence : la spécialisation dans le quantique date des premiers développements en recherche fondamentale, alors que les risques étaient bien plus importants qu'aujourd'hui. Cela a permis à l'université d'être aujourd'hui à la pointe ;

Financer la construction d'infrastructures de recherche de classe mondiale, prêtées gratuitement aux entreprises si ces dernières réalisent de la R&D, louées au prix du marché pour toute production industrielle. Les taux d'occupation sont ainsi optimisés, et les coûts de maintenance contenus car les entreprises utilisatrices mobilisent leur main-d'œuvre pour les faire fonctionner. Les entreprises conservent la propriété intellectuelle des recherches effectuées dans ce cadre. L'attractivité de ces conditions pour les entreprises, alors que ces plateformes sont rares dans le monde et leur accès coûteux, contribuent à leur concentration dans l'environnement de l'université, où elles réalisent des investissements pour s'installer. Elles y trouvent également le vivier de compétences nécessaire à leur développement ;

Partager les coûts de recherche et de formation entre le public et le privé : la stratégie de recherche est influencée par le premier cycle. Les chercheurs sont aussi incités à travailler pour les entreprises dans le cadre de contrats, et la plupart des cursus universitaires prévoient des stages pour les étudiants. La demande en stagiaires est telle que l'université doit aujourd'hui prévoir chaque année trois périodes de stage de quatre mois pour éviter la saturation du tissu de PME et assurer un vivier continu de main d'œuvre. La formation est donc largement internalisée par les entreprises, ce qui réduit son coût pour l'université. Cela permet également de garantir aux étudiants un fort niveau d'employabilité et d'ajuster l'adéquation entre besoins des entreprises et constitution d'un vivier adapté (compétences, volume des cohortes).

* * *

Les effets d'entraînement sont aujourd'hui visibles. L'excellence académique est reconnue, tant au niveau national que sur le plan international. La performance est remarquable au regard de la taille de l'écosystème : une agglomération de 150 000 habitants qui accueille tous les leaders mondiaux du quantique (y compris les entreprises françaises les plus matures). Cette attractivité est doublée d'un taux d'insertion professionnelle particulièrement élevé pour les formations consacrées au quantique, mais aussi dans les sciences sociales, avec un salaire médian bien plus élevé que le salaire médian local ou national.

[50] Il s'agit de concentrations géographiques d'entreprises, souvent de petite et moyenne taille, spécialisées dans un secteur d'activité particulier et innovant. Les entreprises sont interconnectées et bénéficient d'une coopération étroite entre les acteurs locaux, ainsi que d'une culture de collaboration. Ce modèle repose sur des réseaux informels de sous-traitance, de partage de connaissances et de ressources, ainsi que sur des institutions publiques et privées qui soutiennent leur développement. Il a été décrit pour la première fois en 1979 par Giovanni Becattini.

[51] Subventions : 33,5 MCAD en 2015 ayant permis la création de l'Institut quantique (IQ) ; 2018 : 17 MCAD pour la construction d'un bâtiment consacré à l'IQ ; 18 MCAD en 2023 pour soutenir la formation de personnels dans le quantique et soutenir les travaux dirigés d'un professeur.

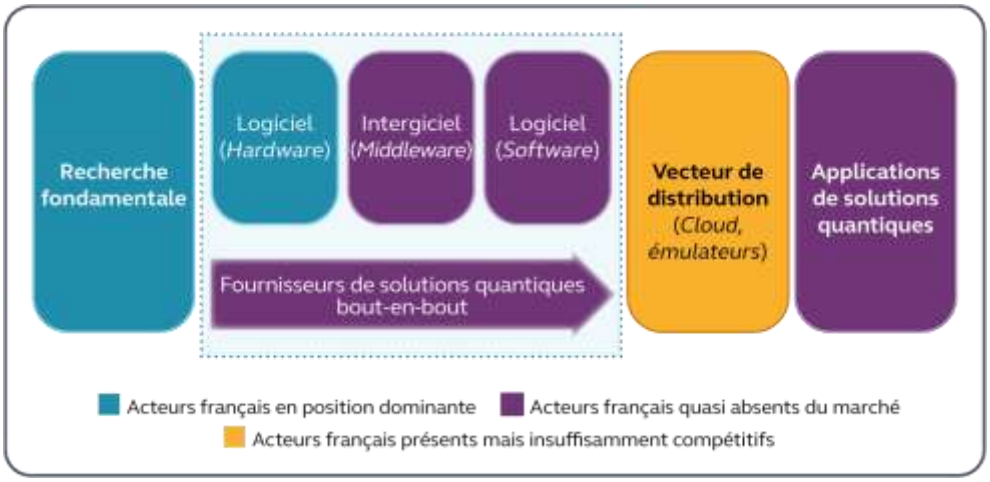
III - De l'écosystème du quantique émerge un tissu industriel fragile et dépendant des fonds publics tant que le marché n'existe pas encore

L'asymétrie de financement public/privé correspond à une phase d'amorçage pour une technologie de rupture. Ces technologies sont confrontées à l'impulsion d'un cycle avec un problème de causalité circulaire. Sans commandes, les entreprises productrices n'ont pas de viabilité. D'un autre côté, les entreprises clientes attendent des cas d'usage adaptés à des machines concrètes avant d'investir, dans une logique de retour sur investissement. Elles ne sont pas non plus aculturées à ces nouveaux produits dont l'utilisation nécessitera des transformations dans leurs propres modes de production. Les gains de productivité doivent inclure ces coûts de transition pour les futurs clients. De ce fait, le marché est aujourd'hui segmenté et se développe de manière non unifiée.

Selon les estimations disponibles ; le marché mondial des technologies quantiques pourrait croître de 30 % par an en moyenne et atteindre 65 Md$ en 2030. Ses principales applications vont se déployer dans des secteurs stratégiques extrêmement lucratifs, notamment la finance et les assurances, l'énergie, la santé, la chimie, la physique des matériaux, les transports (domaine dans lequel le calcul quantique va permettre de résoudre des problèmes d'optimisation divers). Les applications duales sont aussi non négligeables, avec des applications possibles dans le cassage de clefs cryptographiques, la simulation ou la logistique.

Les acteurs du calcul quantique - fournisseurs d'ordinateurs quantiques, de couches logicielles et d'applications de la technologie et fournisseurs de technologies habilitantes - sont exposée à des réalités de marché et à des enjeux bien différents, ce qui complique la mise en place d'une filière robuste.

Schéma n° 4 : le positionnement des acteurs français sur la chaîne de valeur quantique

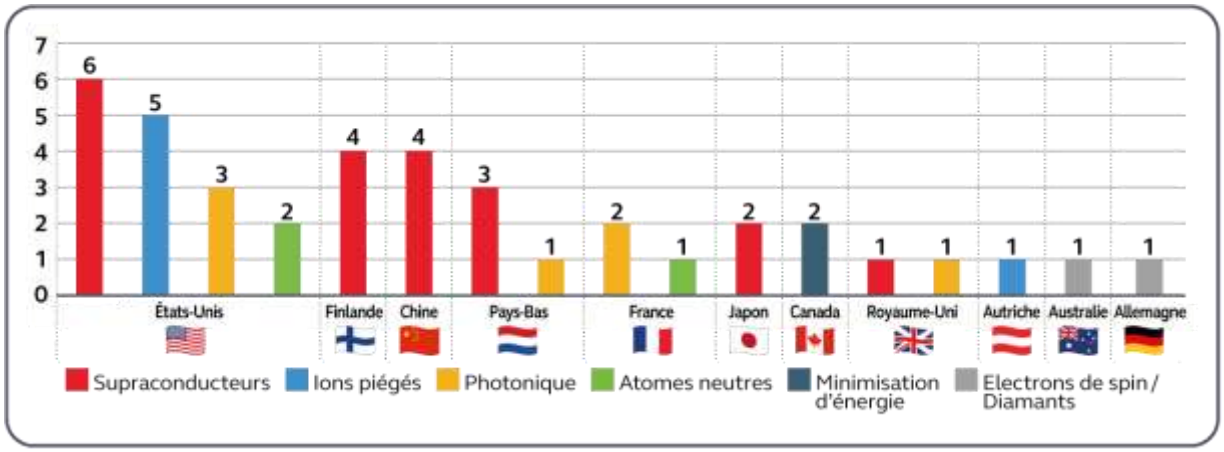


Source : Quantique, vers une logique de marché, Institut Montaigne, oct. 2024

A - Les fabricants de machines intégrées ne peuvent atteindre le stade industriel sans acheteurs

Les entreprises spécialisées dans le développement et la mise sur le marché d'ordinateurs quantiques sont les plus valorisées sur le marché - certaines entreprises américaines atteignant ainsi une capitalisation de plusieurs milliards de dollars - mais elles présentent également de grands risques en termes d'investissements, publics comme privés. Il est en effet certain que toutes ces entreprises n'atteindront pas la phase de rentabilité. À terme, seuls subsisteront les acteurs les plus performants et probablement aussi les premiers à mettre au point une machine dotée d'un véritable avantage quantique. Ainsi le domaine du calcul quantique est aujourd'hui lancé dans une course mondiale dans laquelle les acteurs français sont bien positionnés, mais risquent de disparaître en cas d'absence de nouveaux investisseurs.

Graphique n° 13 : nombre de processeurs quantiques (QPU) commercialement disponibles par pays



Source : rapport du MIT : QIR Quantum Index Report 2025, page 103

L'écosystème industriel français comporte aujourd'hui cinq acteurs majeurs cherchant à fabriquer un ordinateur quantique tolérant aux fautes, tous engagés dans le programme *PROQCIMA*. Il s'agit de Alice & Bob, C12, Quobly, Pasqal et Quandela[52]. Dans l'ensemble, ces *startups* ont réalisé des levées de fonds en série B d'une centaine de millions d'euros. Chacune exploite une piste technologique différente et se situe à l'état de l'art au niveau mondial dans sa technologie. Il est aujourd'hui impossible de savoir quelle technologie aboutira, du fait des spécificités et approches radicalement différentes, et miser sur une technologie aujourd'hui parait extrêmement risqué.

Le programme *PROQCIMA*, qui fait partie intégrante de la stratégie nationale et qui vise l'émergence d'un ordinateur quantique français, servira également à sélectionner les technologies les plus prometteuses. Il **se distingue par sa sophistication dans l'optimisation du soutien à la R&D privée.** Il vise initialement à ce que la France dispose d'ici 2032 d'au

[52] Quandela était à l'origine une entreprise commercialisant des sources de photons et fait donc exception dans le paysage, avec déjà un produit commercialisé et des sources de revenus.

moins deux prototypes d'ordinateurs quantiques universels d'au moins 128 qubits logiques[53], et 2 048 en 2035[54]. Le président de la République, dans son annonce de mai 2026, a relevé cet objectif technologique à 1 024 qubits logiques dès 2032. À long terme, l'objectif est de favoriser l'émergence d'un acteur européen préservant les enjeux de souveraineté nationale.

Structuré sous la forme d'un partenariat d'innovation, ce marché public[55] met en compétition les différentes entreprises françaises (Alice & Bob, Quandela, Pasqal, Quobly et C12) qui cherchent à concevoir un ordinateur quantique, avec une sélection progressive des plus performantes, en plusieurs étapes. À horizon de quatre ans, seuls les trois projets les plus performants continueront de bénéficier du soutien du programme pour développer les meilleurs qubits logiques capables de passer à l'échelle. À horizon de huit ans, la compétition se limitera aux deux technologies les plus performantes qui continueront d'être soutenues dans le cadre du programme pour passer de prototypes de premiers calculateurs à des produits industriels utilisables par leurs premiers clients.

La DGA s'est positionnée en opérateur thématique pour soutenir la stratégie nationale quantique dans une logique d'innovation résolument duale. À travers l'Agence de l'innovation de défense (AID), elle a conclu avec l'ANR en juillet 2025 un protocole. Il prévoit un accompagnement jusqu'en 2033 pour conseiller scientifiquement l'équipe de programme de la DGA pour l'évaluation des performances des cinq *startups* partenaires pour les phases en cours, et définir des critères d'évaluation et la comparaison des solutions techniques pour les phases suivantes. Cette expertise est facturée 500 000 € par l'ANR, somme à rapprocher du montant de l'aide apportée à chacune des cinq entreprises candidates (11,5 M€).

Si le financement de la première phase a bien été exécuté, celui des étapes ultérieures reste encore à définir, et pourrait disparaître selon les acteurs les plus pessimistes. L'hypothèse actuelle est celle d'un financement réparti entre des crédits ministériels d'une part (principalement défense et recherche) et des crédits issus d'un éventuel plan d'investissement successeur à France 2030 d'autre part. Pour la suite du programme, la perspective de l'attribution d'un complément de 200 M€ consacré aux technologies quantiques est examinée dans le cadre de l'actualisation de la loi de programmation militaire (2026-2030).

Ce programme constituant l'aboutissement final de la stratégie nationale quantique et représentant un tiers des fonds publics qui y ont été alloués et la moitié des financements prévus par l'État, son abandon marquerait un échec de la SNQ. En tout état de cause, la continuité d'investissement de l'État sera essentielle pour assurer la mise en œuvre de la stratégie de long terme sous-tendue par *PROQCIMA*.

Par ailleurs, la commande publique permet aux entreprises de se projeter et à l'État d'orienter la R&D. C'est un équivalent de l'équilibre entre recherche dirigée et exploratoire du PEPR conçu pour les organismes nationaux de recherche. En effet, les entreprises sont libres de choisir leurs solutions pour atteindre l'objectif, et la conception des marchés permet à l'administration d'allouer les moyens en fonction de ses priorités.

Bien que marginale dans les capitaux levés par les *startups*, la commande publique se révèle le levier le plus puissant pour stimuler l'écosystème industriel français. L'annonce du

[53] Initialement 100 qubits logiques.
[54] Notifié le 5 mars 2024 pour une durée prévisionnelle de 15 ans.
[55] Procédure négociée avec mise en concurrence et sans publicité préalable.

marché *PROQCIMA* a ainsi été bien perçue par les entreprises et les fonds d'investissements pour les raisons suivantes :

- il offre la perspective de débouchés avec la conception d'un produit dont le marché futur n'est pas limité à l'État ;
- il prend la forme d'un marché public et non celle d'une subvention, se traduisant donc par du chiffre d'affaires pour les entreprises avec une visibilité de moyen terme ;
- il suscite un effet « label » : la sélectivité du dispositif et le mécanisme d'évaluation des résultats prévus sont perçus comme des gages de sérieux ;
- il respecte les principes de libre concurrence : les entreprises participantes doivent atteindre des jalons définis dans un cahier des charges commun, selon un calendrier uniforme ;
- il limite la dispersion des crédits dans un contexte d'incertitude sur la technologie à soutenir : à chaque étape, le nombre de prestataires bénéficiant du soutien financier de l'État diminue, assurant ainsi une sélection progressive des acteurs les plus performants.

Le programme semble faire consensus dans sa construction et son déroulement auprès de l'ensemble des acteurs (publics et privés). Les montants engagés étaient tout à fait appropriés au moment de sa conception. Cependant l'augmentation des financements consacrés au calcul quantique par les autres grands pays développés et la forte compétition internationale obligent à constater que ces financements sont désormais insuffisants. Le choix de les abonder ou non, ou d'en relever leur niveau, reflète l'arbitrage entre le coût de la souveraineté et celui de la dépendance. Dans l'hypothèse, privilégiée par la Cour, où le programme *PROQCIMA* serait confirmé et bénéficierait de moyens renforcés, sa poursuite devrait s'accompagner d'une évaluation rigoureuse des performances des entreprises compétitrices, compte tenu de la diversité des technologies qu'elles mobilisent.

Les entreprises sont sensibilisées au risque d'espionnage industriel ou de prédation par l'application de normes extraterritoriales par un État étranger. Elles doivent toutefois être aidées à y faire face (niveau de sécurité des brevets, mesures de contingentement pour éviter toute utilisation d'un bien ou service étranger qui justifierait une immixtion de la part de l'État d'origine, protection des locaux, cybersécurité etc.). Ainsi, la commande publique en informatique quantique devrait intégrer systématiquement des normes de protection du patrimoine scientifique et technique (PPST) strictes, élaborées en lien avec le SGDSN, voire s'inspirer des mécanismes mis en place par d'autres pays, notamment les États-Unis et la Chine.

Le programme *ProQure*

Le programme *Développer l'informatique quantique au Royaume-Uni*, lancé fin mars 2026, prévoit la réalisation de prototypes d'ordinateurs quantiques construits obligatoirement au Royaume-Uni. Il s'agit d'un marché public dont les contours ressemblent à celui de *PROQCIMA*. En effet, les prototypes des soumissionnaires retenus seront évalués et un partenariat de recherche sera établi avec les entreprises développant les modèles les plus performants.

Le gouvernement britannique prévoit d'y consacrer sur quatre ans la moitié des fonds alloués au plan de soutien au quantique qu'il annoncé le 17 mars (2 Md£). Son objectif est d'être le premier pays au monde à déployer cette technologie à une large échelle.

Les premiers effets d'entraînement sont visibles. Les cinq acteurs engagés dans le programme *PROQCIMA* ont levé des fonds en série B d'une dizaine, voire une centaine de millions d'euros. Alice & Bob en a bénéficié après l'annonce du lancement du programme *PROQCIMA*. La commande publique a un effet label plus important que les succès aux différents appels à projets car elle est plus sélective et orientée vers un produit dont le marché excède la commande publique. Pourtant, aucune *startup* du calcul quantique, aussi bien en France que dans le monde, ne disposait fin 2025 d'un produit rentable à commercialiser. Les premières commandes sont réalisées à façon et relèvent davantage de la preuve de concept.

Ces entreprises sont presque toutes des *startups* qui ont connu une croissance rapide, mais elles ont des stratégies différentes, indépendamment de leurs choix technologiques. Les créations d'emplois qualifiés sont réelles.

Toutefois, deux cas se distinguent par leur maturité.

- Quandela a été fondée en 2017 et a désormais un fonctionnement mature. Cette entreprise est la seule à avoir stabilisé sa croissance grâce à la commercialisation de technologies habilitantes (sources de photons), avant de viser la conception de QPU (unité de traitement quantique).
- Pasqal est aujourd'hui l'entreprise la plus importante en termes d'effectifs, et la seule des cinq candidats du programme P*ROQCIMA* à être devenue un établissement de taille intermédiaire (ETI) en décembre 2025[56]. La taille critique atteinte par l'entreprise lui permet d'assumer une stratégie d'influence dans les instances de standardisation et auprès des institutions européennes avec un poste spécialisé depuis 2024, mais aussi d'envisager une introduction en bourse. L'entreprise pourrait devenir en 2026 la première licorne[57] française du quantique.

Ces deux entreprises ont déjà livré et mis en service plusieurs machines dans des sites hôtes, notamment au Très grand centre de calcul (TGCC) du CEA et à son équivalent allemand au JFZ près d'Aix-la-Chapelle.

L'étape de la transition industrielle repose sur la perception d'un besoin par des utilisateurs et la montée en compétence sur de nouveaux savoir-faire. Les entreprises les plus avancées développent des stratégies d'acculturation, avec le soutien – non financier – de la direction générale des entreprises. Toutefois, la DGE ne semble pas connaître précisément l'écosystème contrairement à l'Allemagne, où une cartographie en ligne est même disponible, ou au Royaume-Uni[58]. L'absence de cartographie consolidée et à jour des entreprises du secteur quantique et une lisibilité incomplète des dispositifs mobilisés sont préjudiciables à un soutien optimisé de la filière.

Le SGPI estime qu'il serait pertinent que le ministère chargé de la recherche s'engage également à acheter un ordinateur en plus des deux modèles déjà prévus par le programme *PROQCIMA*. Cette acquisition permettrait de renforcer les infrastructures de

[56] Selon le règlement européen, les établissements de taille intermédiaire (ETI) sont les entreprises de plus de 250 employés pendant deux années fiscales consécutives. Fin 2025, Pasqal compte 316 salariés.
[57] Entreprises non cotées en bourse dont la valorisation dépasse le milliard de dollars. Au printemps 2026, celle de Pasqal devrait se situer autour de 2 Md$.
[58] https://quantencomputing-deutschland.de/ pour l'Allemagne, et pour le Royaume-Uni : « *Decrypting the UK's high-growth quantum technology companies* », Barclays, juillet 2023.

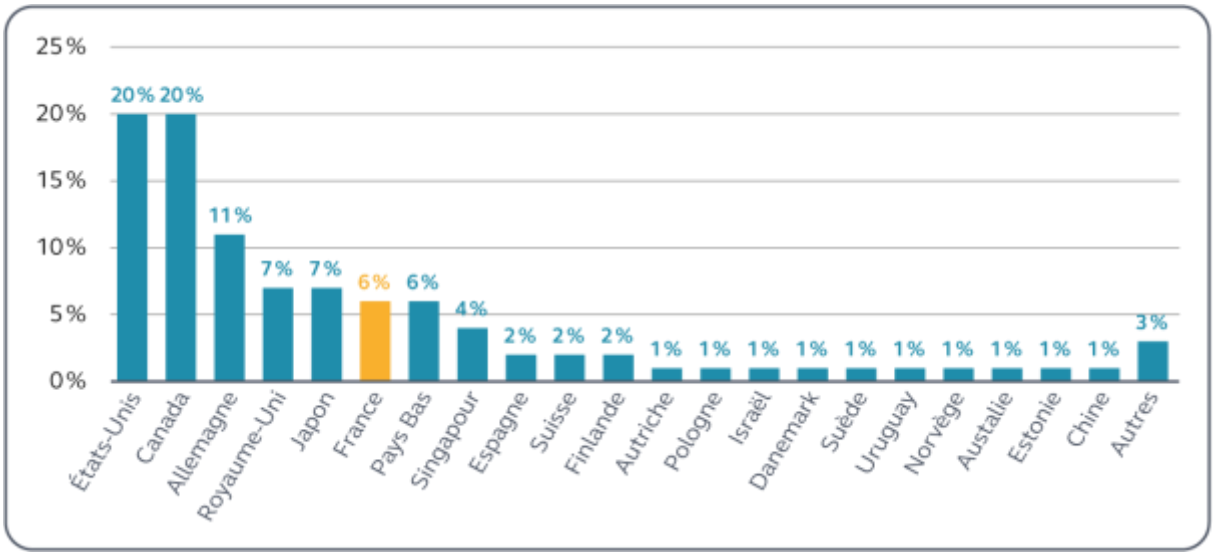
recherche publique déjà gérées par le Grand équipement national de calcul intensif (Genci). Ce dernier exploite trois supercalculateurs, dont le TGCC à Bruyères-le-Châtel, dont les heures de calcul sont attribuées gratuitement après étude des projets.

B - Les logiciels et applications de l'informatique quantique se développent en soutien des fabricants de matériel, mais restent dépendants de l'accès à une machine fonctionnelle

L'écosystème des *startups* qui développent des exemples d'utilisation de l'informatique quantique est différent et moins compétitif que l'écosystème matériel, car il n'est pas ou peu dépendant d'une technologie en particulier. Les entreprises développent des algorithmes qui n'attendent plus que la machine qui leur permettra de fonctionner, et collaborent ensuite avec les différents fournisseurs afin de les optimiser pour chaque technologie. Dès lors qu'il existe aujourd'hui un quasi consensus sur l'avènement futur de telles machines, leurs perspectives économiques semblent également moins incertaines à long terme. Pour les investisseurs qui ont une forte aversion au risque, elles représentent une alternative intéressante. Cet aspect a été négligé par la stratégie nationale quantique (SNQ).

Cependant, la France accuse un léger retard dans ce domaine, et l'objectif de la SNQ (dix *startups* logicielles) semble peu réaliste. Début 2026, seulement cinq *startups* existent. En outre, elles ne représentent qu'environ 1 % des levées de fonds mondiales – dans le domaine du logiciel quantique – pour environ 6 % des parts de marchés, alors que la part de marché des entreprises françaises sur le *hardware* s'élève à 20 %. L'accent mis par l'INRIA dans sa stratégie interne sur ce volet apparaît indispensable. Bien que l'INRIA fasse également partie des organismes qui portent le PEPR, les projets consacrés au *software* et cas d'usages sont restés en France au stade de preuves d'usage et n'ont pas permis l'émergence de nouveaux acteurs économiques.

Graphique n° 14 : répartition géographique des *startups* commercialisant des logiciels quantiques en août 2024



Source/note : Cour des comptes, d'après le rapport « Quantique, vers une logique de marché », Institut Montaigne, oct. 2024. Sur 85 startups de logiciel quantique créées dans le monde, cinq sont françaises, et la France représente moins de 1 % des 1,6 Md$ levés dans le monde sur des solutions de logiciel quantique.

Les *startups* matérielles sont aussi pour la plupart engagées dans des partenariats afin de démontrer des cas d'usage de leurs technologies. Ce volet de leur activité vise principalement à promouvoir l'informatique quantique et obtenir de nouveaux financements. De plus, l'accessibilité des machines quantiques se fera probablement à travers un *cloud*. C'est dans cette perspective qu'avait été développé l'appel à manifestation d'intérêts AQUILA, qui vise la structuration d'offres de *cloud* écoresponsables permettant d'accéder à des ordinateurs quantiques variés, hébergés et exploités en France, à travers des *clouds* souverains, afin d'en faciliter l'accès aux futurs utilisateurs du calcul quantique.

Cette situation est d'autant plus regrettable que la demande de logiciels quantiques correspond à du *business to business* (B2B) et non à du *business to consumer* (B2C), soit précisément le domaine où l'Europe possède de nombreux atouts pour faire émerger des acteurs compétitifs au niveau mondial. Il semblerait toutefois que les utilisateurs potentiels du calcul quantique (utilisateurs de calcul haute performance aujourd'hui) commencent à se renseigner sur cette technologie, sans y investir réellement.

Or, développer des partenariats industriels avec des acteurs offrant un accompagnement logiciel amorcerait un cercle vertueux, un nouvel élan économique qui permettrait à ces acteurs de capter de nouvelles sources de financements et de faire émerger un marché. Les clients (industriels et banques dans un premier temps) pourraient en effet se préparer à l'avènement d'une technologie qui semble aujourd'hui se dessiner à moyen terme. La coopération entre Bull et Siemens sur la simulation quantique constitue un exemple intéressant d'une telle coopération.

C - Les technologies habilitantes : un marché déjà lucratif et nécessaire pour la souveraineté

Les technologies habilitantes, tels que les cryostats, englobent l'ensemble des composants et outils nécessaires à la fabrication, au contrôle et à l'utilisation des technologies quantiques. L'écosystème de ces technologies est dès à présent d'une importance cruciale, notamment en termes de souveraineté car le marché existe déjà. Le rapport de la Cour sur l'IA[59] offre un aperçu de la dépendance vis-à-vis de technologies irremplaçables. Le rapport Draghi a signalé que, dans le domaine du calcul quantique, l'Europe présentait six dépendances critiques à des technologies disponibles uniquement hors de l'UE. Pour les fournisseurs français d'ordinateurs quantiques, on estime qu'environ 80 % des composants sont issus du marché européen, les 20 % restants étant équitablement répartis entre Asie et Amérique du Nord.

De plus, les entreprises qui fournissent des technologies habilitantes de pointe dégagent déjà des bénéfices car elles commercialisent des produits à l'état de l'art et peu démocratisés qui sont essentiels aux entreprises de calcul quantique ainsi qu'à la recherche fondamentale. Aucun laboratoire et aucune entreprise ne peut se priver de composants de dernière génération dans ce domaine compétitif afin de rester dans la course.

[59] Cour des comptes, *La stratégie nationale pour l'intelligence artificielle*, rapport public thématique, novembre 2025.

Développer ces technologies est donc un vecteur économique et technique de premier choix dans le développement de l'écosystème, avec des investissements moins risqués et rentables plus vite. Au niveau européen, l'exemple de l'entreprise finlandaise Bluefors est notable : fondée en 2008, elle commercialise des cryostats indispensables pour refroidir certains types de qubits, et a dégagé depuis près de 200 M€ de chiffre d'affaires.

La trappe de la *midtech*, définie dans un rapport de 2024[60], désigne la tendance de l'industrie de l'Union européenne à se spécialiser et à rester bloquée dans des secteurs de technologie intermédiaire, au détriment des secteurs de haute technologie à forte croissance. Les investissements se spécialisent et se concentrent dans les technologies déjà dominantes ayant fait la preuve de leur rentabilité. Pourtant, les rendements sont décroissants, et les profits s'accroissent bien plus dans la *deeptech*, les technologies de rupture, que dans la *midtech*.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les formations, largement soutenues par la stratégie nationale quantique, s'adaptent afin d'accroître le volume des cohortes d'étudiants et les cursus. En parallèle, le programme et équipement de recherche (PEPR) consacré au quantique a su trouver un équilibre entre recherche dirigée et recherche exploratoire, et permettre une étroite coopération entre tous les acteurs concernés (recherche fondamentale et appliquée, secteur public et privé). Les trois opérateurs nationaux de recherche concernés (CNRS, CEA et INRIA) constituent les branches solides pour permettre aux entreprises privées d'éclore et de s'épanouir. Enfin, la moitié des financements consacrés à la stratégie nationale quantique est absorbée par le programme PROQCIMA sous la forme d'un marché public relativement incitatif.

Cependant, en l'absence de trajectoire budgétaire ambitieuse et sécurisée, le risque de déclassement à moyen ou à long terme est réel. La souveraineté en informatique quantique n'est pas acquise, et elle est encore accessible sur certains segments. Alors que les résultats obtenus sont menacés par les intérêts de pays concurrents, l'absence de visibilité au-delà de 2030 du soutien à la filière quantique constitue une fragilité majeure.

La Cour formule les recommandations suivantes :

4. *dès la rentrée 2027, renforcer l'offre de formation sur les volets « architecture », « correction d'erreurs » et pile logicielle, ainsi que sur l'articulation entre informatique classique et calcul quantique (SGPI, ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'espace) ;*
5. *assurer plus précisément le suivi des entreprises du secteur stratégique du quantique en coordination avec le SGPI (ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle, énergétique et numérique, 2026).*

[60] *How to escape the middle technoloy trap*, C. Fuest, D. Gros, P.-L. Mengel, G. Presidente et J. Tirole.

Chapitre IV

L'investissement limité de la France par rapport à ses principaux concurrents, à l'approche de la phase de concentration des acteurs

Si les principaux concurrents sont la Chine et les États-Unis, la compétition entre les puissances industrielles est exacerbée. Chacun utilise les moyens à sa disposition pour devancer ses concurrents (pour les pays les plus riches) ou rattraper son retard (pour les pays émergents). L'arbitrage est difficile pour toutes les puissances moyennes concernant la profondeur de la collaboration avec les États-Unis, d'autant que de nombreux pays ont une tradition d'ouverture avec ce partenaire. La France devra aussi choisir des partenaires privilégiés, dans un cadre bilatéral ou multilatéral complémentaire de celui de l'Union européenne. En effet, le calendrier d'action et les priorités de l'UE risquent d'être mal calibrés par rapport aux besoins du secteur.

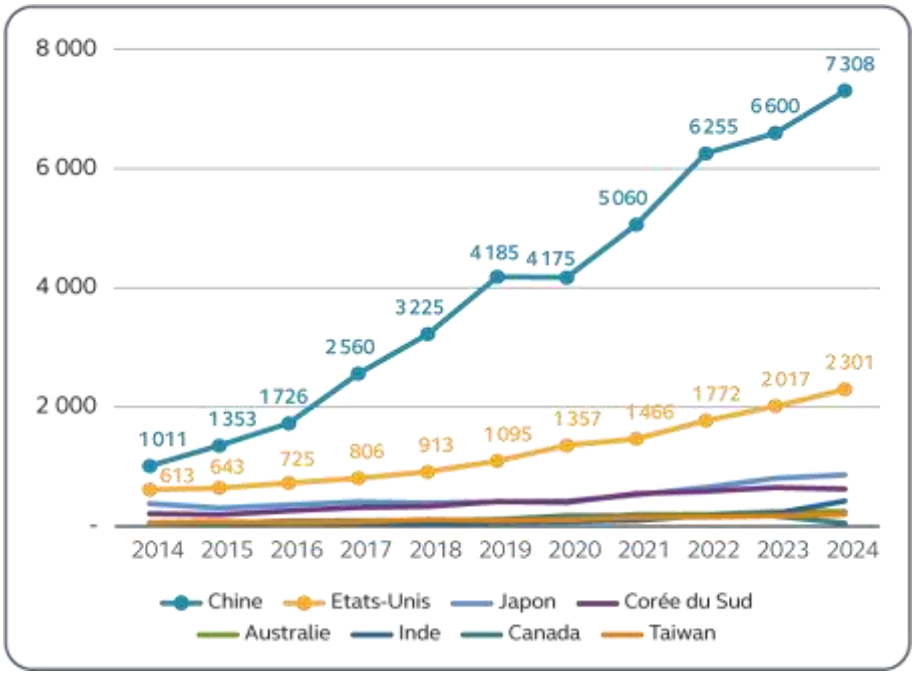
I - Le positionnement des principaux concurrents

A - La Chine et les États-Unis : des concurrents hors catégorie

La Chine et les États-Unis exploitent pleinement le « bonus démographique » au bénéfice de l'innovation. L'effet masse des cohortes formées donne un avantage comparatif aux pays les plus peuplés dont la population a accès à la formation. Ainsi, bien que la Chine communique assez peu sur son avance technologique dans le domaine quantique[61], contrairement aux États-Unis, les brevets non secrets traduisent une capacité d'innovation inégalée par rapport au reste du monde.

[61] La dernière grande annonce sur un processeur quantique a été réalisée en 2021 par une publication de l'Université des sciences et technologies de Chine. L'article comparait les performances de la plateforme photonique *Jiuzhang 2* avec *Sycamore* de Google. Une précédente étude de décembre 2020, parue dans la revue *Science* avait présenté *Zuchongzhi 3.0*, un ordinateur supraconducteur de 105 qubits développé par une équipe de la même université.

Graphique n° 15 : brevets dans les technologies quantiques



Source : Cour des comptes d'après The Quantum IndexReport 2025, MIT

Cet avantage quantitatif explique que la Chine détienne, en 2024, 60 % des brevets dans les technologies quantiques, même avec un ratio de brevets par rapport à la population qui reste moyen et sans préjudice de l'impact des brevets déposés. En effet, le nombre de brevets déposés ne permet pas d'apprécier leur portée relative. De plus, deux tiers des dépôts chinois sont nationaux, ce qui reflète une stratégie avant tout domestique.

Tableau n° 4 : nombre de brevets déposés en 2024 dans les technologies quantiques par million d'habitants

Chine	États-Unis	Japon	Corée du Sud	Australie	Inde	Canada	Taiwan
5,2	**6,7**	**6,9**	**12**	**9,1**	**0,3**	**1,2**	**8,7**

Source : Cour des comptes d'après The Quantum Index Report 2025(MIT) et les services statistiques nationaux

La dimension qualitative des brevets peut être évaluée à travers les publications à fort impact. Parmi les 10 % d'articles les plus cités en informatique quantique, les États-Unis détiennent la plus grande proportion avec 34 % des publications. La Chine suit avec la deuxième proportion la plus élevée, soit 16 %. Selon une étude du MIT publiée mi-2025, l'Union européenne (UE) représente environ 17 % du total mondial. D'après une étude de l'office européen des brevets (OEB) publiée en décembre 2025, sur le champ plus large des technologies quantiques, l'UE arrive deuxième (et la France derrière l'Allemagne), tandis que la part de la Chine n'atteint que 11 %. Ces données témoignent de l'intérêt particulièrement fort que, comme la France, la Chine accorde à l'informatique quantique au sein des autres technologies quantiques.

Dans ce contexte de quête de souveraineté et de forte concurrence internationale, **la définition de normes et de standards est aussi un levier majeur de compétitivité, sur le long terme. Or, les États-Unis et la Chine sont particulièrement impliqués à tous les niveaux dans la définition de standards qui leur seraient favorables.**

Les parangonnages permettent aux États et aux investisseurs de comparer objectivement les technologies, au-delà des effets d'annonces commerciaux. Dans le domaine quantique, ce sont le type de QPU (*Quantum Processing Unit*[62]) et la réponse apportée qui permettent de faire des comparaisons. C'est dans cette perspective que le projet BACQ[63] a été conçu et que l'entreprise française Atos, dont est issue Bull en 2026, a publié de premiers comparatifs applicatifs. L'État, au travers notamment du laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), est un tiers de confiance indispensable pour garantir des standards de référence pertinents, quelle que soit la technologie utilisée, alors que plusieurs solutions sont en concurrence.

Tant qu'aucune machine n'aura été commercialisée et intégrée durablement dans un environnement, les standards ne seront pas véritablement établis. Il existe des standards réglementaires et des standards d'usage. Définir des standards permet de diriger l'ensemble des acteurs vers une zone d'interopérabilité commune. L'acteur qui imposera ses standards obligera les autres à s'adapter et à rediriger ses recherches et son outil de production pour s'y conformer. Ce seront son architecture et ses interfaces qui deviendront dominants, permettant de réduire ses coûts de production et lui donnant un avantage en termes de parts de marché.

Or, les fabricants de machine proposent déjà leurs propres indicateurs, favorables à leurs technologies et utilisés à des fins commerciales. Le cadre qui semble émerger aujourd'hui est celui proposé par les entreprises américaines. Les vecteurs de cette influence sont les publications régulières de leurs offres de comparatifs, adaptés aux performances de leurs machines. En complément, sur le volet logiciel, des entreprises américaines mettent à disposition une bibliothèque d'outils en libre accès, que chacun peut utiliser et contribuer à développer. Ainsi, la communauté s'habitue au référentiel de l'entreprise, et le commun créé pourrait à terme ne plus être alimenté en source ouverte par l'entreprise, ce qui lui permettra d'exploiter une rente.

Les États-Unis et la Chine agissent de manière offensive pour peser sur la définition des standards réglementaires au sein des instances européennes de normalisation. Un comité consacré aux technologies quantiques, le JTC22[64], réunissant les représentants de 34 États européens, a été créé en 2022. Il comprend quatre groupes de travail, dont l'un porte sur le calcul et les simulations quantiques. L'objectif de ce groupe est de produire des normes traduisant une position européenne cohérente afin de faciliter leur adoption par un autre groupe

[62] Les QPU constituent un type d'unité de traitement informatique particulier. Ces unités de traitement quantique sont des matériels composés d'une puce quantique, de l'électronique de commande et du matériel de calcul classique nécessaire pour l'entrée et la sortie des données. La puce est placée à l'intérieur du matériel de refroidissement et d'autres composants sont positionnés dans des racks placés à côté, à température ambiante.
[63] Au sein du programme *MetriQs* coordonné par le LNE, ce programme est lui-même coordonné par Thales et implique trois instituts du CEA. Il a donc une portée fortement opérationnelle.
[64] *CEN-CENELEC Joint Technical Comitee 22* (CEN-CL-JTC22).

de concertation de niveau mondial, créé en 2024, le JTC3[65]. Les deux niveaux de comités techniques sont subdivisés en groupe de travail, et il existe deux groupes « miroirs » pour le calcul quantique et la simulation.

Les représentants de grandes entreprises internationales, notamment américaines et chinoises, participent aux assemblées du JTC22 et ont accès aux travaux réalisés par le groupe, alors même que qu'il se veut exclusivement européen. La participation, autorisée, d'entreprises étrangères implantées dans l'un des pays membres est discutable et transforme le cadre des échanges. La Chine est très présente dans tous les comités, groupes et sous-groupes de travail sur les sujets quantiques, au sein desquels elle déploie des délégations nombreuses qui formulent des propositions extrêmement agressives et handicapantes pour les concurrents de la Chine. Ces pays ont par ailleurs des stratégies d'alliance très efficaces, y compris dans les instances mondiales. Ainsi, la proposition chinoise sur le *software* a été présentée au sein du JTC3 avec le soutien du Canada. Ce groupe de travail, dont le secrétariat est assuré par le Royaume-Uni, compte 83 experts européens, 77 experts chinois et 13 américains. Ce sujet de la mobilisation des experts, dont le vivier est étroit, constitue l'un des talons d'Achille du rayonnement français et européen.

B - Des concurrents internationaux agressifs, qui nouent des alliances sérieuses

La complexité du processus de concertation dans les instances internationales d'harmonisation des standards a poussé les acteurs européens à s'y investir modestement. Ils préfèrent allouer leurs ressources humaines à la R&D. Ce sous-investissement institutionnel, ajouté aux coûts de fonctionnement de ces instances, aboutit inévitablement à des résultats limités : depuis 2022, une unique recommandation a été émise par le groupe européen (JTC22), et ce n'est pas une norme mais un rapport technique.

Le manque de coordination des pays européens et l'absence de politique commune rend illisible un discours assumé dans les instances normatives à l'échelle internationale. De plus en plus de travaux portant sur l'informatique quantique sont conduits par le groupe de travail au niveau mondial (JTC3), par d'autres puissances moyennes. Sur les huit travaux en cours, un seul est piloté par un acteur européen (le Danemark). Par ailleurs, les autres participants de ce groupe sont asiatiques (Japon, Corée du Sud et Chine), en dehors des États-Unis et du Royaume-Uni dont la position est arrimée à celles des États-Unis et désalignée par rapport aux intérêts de l'UE.

L'affaiblissement de la position française est accentué par les moyens limités du LNE, qui ne permettent pas de déployer une stratégie d'influence efficace. Par ailleurs, l'articulation entre l'AFNOR, qui assure le secrétariat du groupe de travail sur le calcul quantique au sein du JTC22, et le LNE pourrait être renforcée. Dans le domaine de l'informatique quantique, la France a obtenu l'approbation du JTC3 pour la mise en place d'un sous-comité consacré au calcul quantique (le JSC3A), dont elle assurera le secrétariat permanent. Ce résultat est encourageant, même si seuls huit pays européens se sont engagés à participer activement.

[65] IEC-ISO Joint Technical Comitee (IEC-ISO JTC3), comité technique consacré aux technologies quantiques. Il est subdivisé en sept groupes de travail. Le 5ème est consacré au calcul quantique et à la simulation.

Pour les Européens, le contraste est saisissant entre la vitalité des publications scientifiques, le dynamisme du tissu industriel de la filière et l'effacement dans les instances stratégiques de pilotage. L'action de la Commission européenne n'a pas jusqu'à présent permis de rompre cet isolement, qui accroît le risque d'un décrochage technologique de l'Europe.

La question de la standardisation a été prise en compte dans la stratégie, à travers le programme MetriQs. Cependant ce programme ne semble pas adapté aux enjeux de normalisation. En effet, si l'expertise du LNE sur les problèmes de mesure n'est pas remise en cause, la capacité d'influence de la France sur les sujets de normes internationales reste perfectible. De plus, une seule *startup* de PROQCIMA participe régulièrement aux assemblées et consacre une part d'ETP à ce sujet. Selon les informations disponibles, les autres n'y participeraient que ponctuellement, voire pas du tout. De cette absence résulte une perte d'influence des acteurs français dans l'écosystème, qui pourrait ensuite se transformer en un désavantage compétitif important.

L'Europe a pourtant des atouts. Parmi les pays engagés dans la course aux technologies quantiques, autres que les États-Unis et la Chine, se dégagent trois profils types.

- L'Europe constitue un bloc scientifique et collaboratif. Le volume de publications agrégées des pays de l'Union est souvent équivalent, voire supérieur à celui des États-Unis. Cela reflète une puissance scientifique de premier plan, même si ces chiffres masquent la fragmentation de cet ensemble. Par ailleurs, l'Europe est en phase de spécialisation sur le domaine des technologies quantiques, ce qui témoigne d'une dynamique de rattrapage stratégique et montre que l'UE a fait du quantique une priorité croissante de son agenda d'innovation.
- Certains pays ont choisi la voie d'une forte spécialisation. Le Canada présente ainsi le ratio d'avantage technologique révélé (RTA)[66] dans le quantique le plus élevé au monde (2,8 sur la période 2015-2019, et 2,9 entre 2020 et 2024). Le Royaume-Uni et la Finlande ont également choisi de concentrer une part importante de leurs ressources d'innovation dans les technologies quantiques. Le Royaume-Uni affirme ainsi son statut de hub quantique majeur. En revanche, la Finlande, comme la Suisse, recherchent une position de niche. La Suisse est le pays dont les publications sont le plus citées dans le monde avec près de 40 % de ses publications figurant dans le décile des publications le plus citées.
- Enfin, quelques pays émergent comme des réservoirs de talents pour les leaders. L'Inde se distingue ainsi comme un pays d'inventeurs travaillant massivement pour des demandeurs étrangers, principalement américains (275 familles de brevets en quantique impliquent des inventeurs indiens pour des demandeurs américains contre seulement huit dans l'autre

[66] Le RTA est un ratio permettant de mesurer le degré d'orientation stratégique réelle d'un système d'innovation national. Il rapporte la part d'un pays dans les familles de brevets internationales (IPF) d'un domaine particulier par rapport à sa part dans les IPF de tous les domaines technologiques confondus. Il évalue ainsi l'intensité de la spécialisation du pays considéré dans la technologie, indépendamment du volume de brevets déposés, qui peut être massif. Un RTA inférieur à un signifie que le pays est sous-spécialisé et, à partir de un, que sa spécialisation est de plus en plus affirmée. Les chiffres cités sont issus d'un rapport de l'OCDE/OEB, *Mapping the global quantum ecosystem*, publié en décembre 2025.

sens). L'indice de fuite des cerveaux[67] du pays en 2024 s'élevait à encore 4,8 points sur une échelle de 0 à 10 après un pic à plus de 6 avant la pandémie de Covid. Par ailleurs, 70 % des étudiants indiens partis à l'étranger pour avoir de meilleures opportunités de recherche et de carrière détenaient des diplômes en STEM (sciences, technologie, ingénierie et mathématiques) selon le *Times of India*.

Dans ce contexte, la France est dès aujourd'hui confrontée au choix délicat d'avoir des partenaires subis ou choisis. L'indécision risquerait de se traduire par une forme de dépendance subie plutôt que par un choix pleinement assumé[68].

II - Le risque de captation de la connaissance et de l'investissement public sous-jacent existe malgré les dispositifs de veille

A - Un enjeu majeur de souveraineté

Les risques de prédation économique existent et des cas sont détectés sur notre territoire. Ils prennent les formes classiques de l'ingérence et proviennent de pays qui doivent être considérés comme des concurrents cherchant à s'approprier la valeur issue d'investissements publics. Un gradient de menaces se dessine :

- un petit groupe de pays, bien qu'avancés technologiquement, déploie une stratégie très agressive. Les États-Unis, la Chine et Israël tentent ainsi de s'approprier des connaissances scientifiques en France afin de s'assurer une supériorité technologique. Si tous recourent à l'ensemble de la palette de l'ingérence, chacun privilégie un outil dans lequel il dispose d'atouts particulièrement significatifs. Ainsi, les États-Unis privilégient les prises de contrôle de sociétés mais utilisent aussi toute la palette du *lawfare*[69].
- un autre groupe de pays, présentant un niveau de développement plus faible, cherche à rattraper un retard scientifique parfois important et à profiter des avancées réalisées en France. En dehors de la Russie et de l'Iran, il s'agit de pays asiatiques : Inde, Pakistan et Indonésie. Parmi les canaux de détection de ces coopérations risquées, figurent les demandes de formation ou de partenariat – déséquilibrée – auprès de chercheurs français, mais aussi les demandes de visa dans le cadre de la vigilance consulaire, ou la surveillance des ventes de biens à double usage (BDU).

Les concurrents directs de la France regroupent des pays occidentaux (en Europe, ainsi que le Canada et l'Australie), les pays du Proche et du Moyen Orient et des pays d'Asie (Corée du Sud, Japon, Singapour, Taïwan). Parmi ces puissances moyennes, plusieurs ont un tropisme américain historique :

[67] Cet indice composite, fait partie du Fragile States Index, produit par le Fonds pour la paix, qui évalue la vulnérabilité des pays à travers 12 indicateurs, dont l'indice Human Flight and Brain Drain. Cet indice est établi à partir de données quantitatives (comme les flux migratoires) et qualitatives (événements politiques, économiques, climatiques). Les scores sont validés par des experts et croisés avec d'autres statistiques pour éviter les biais.
[68] IFRI, *L'Europe à l'heure de la recomposition stratégique induite par les technologies quantiques*, 2026.
[69] À titre d'exemple, toute commande d'un supercalculateur supérieur à 400 000 $ doit donner lieu à un vote du Congrès, alors qu'il n'existe pas de supercalculateur ayant une valeur inférieure à 5 M$.

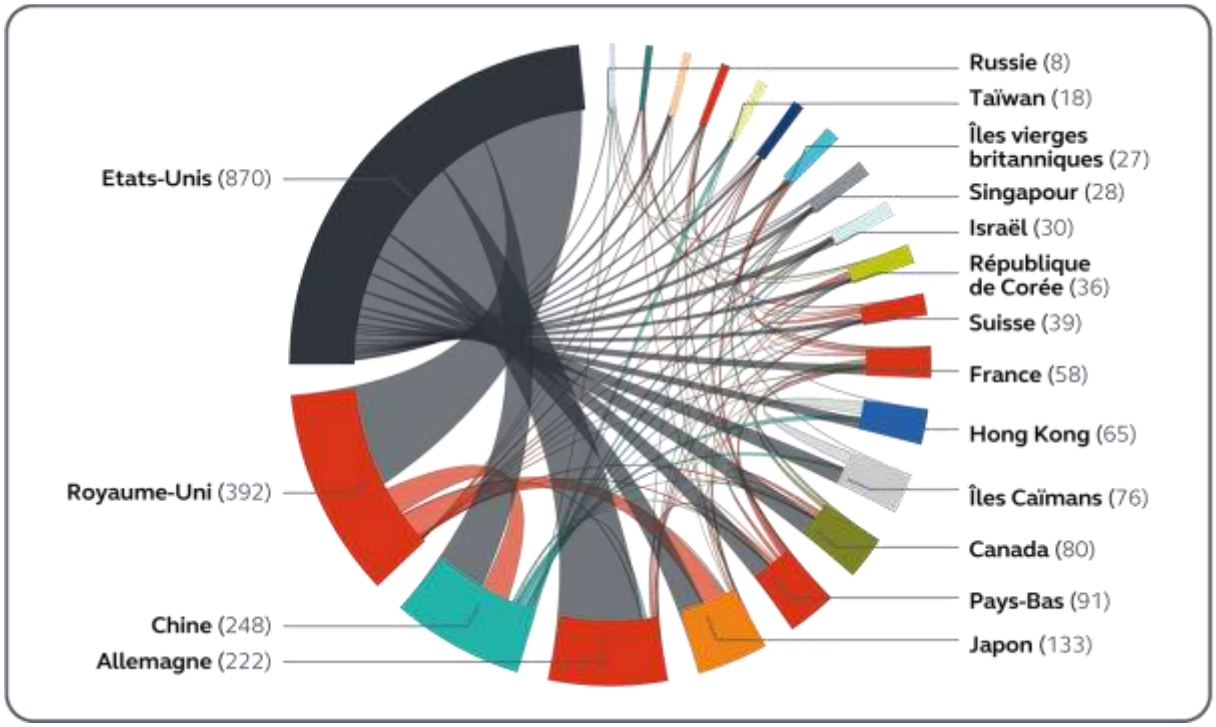
- l'Australie, le Canada et le Royaume-Uni sont très intégrés avec les États-Unis en matière de renseignement ;
- l'Allemagne, et plus particulièrement la Bavière (où se trouve la Quantum Valley), les Pays-Bas, la Corée du Sud et les pays du Golfe ont également une forte tradition atlantiste.

L'évolution géopolitique récente esquisse des évolutions dont la pérennité est difficile à estimer. Ainsi, le Canada a manifesté sa volonté de coopérer plus étroitement avec l'Europe (tant par la voix de son Premier ministre qu'au niveau des scientifiques en informatique quantique) ; doit être soulignée, à l'inverse, l'ouverture de l'Italie très favorable aux États-Unis.

Cela se traduit concrètement par des alliances commerciales de circonstance. La souveraineté ne semble pas analysée comme en France sous les angles de l'indépendance de la décision et de la sécurité des approvisionnements. L'Italie et l'Allemagne achètent ainsi des produits américains ou chinois même lorsque leur équivalent français ou européen existe. L'Italie a notamment acheté un ordinateur américain, et l'Allemagne dispose de matériel américain et chinois dans son grand centre de calcul de Garching bei München.

Certains pays sont ainsi plus ouverts et exposés à l'appropriation de la valeur. Le graphique ci-dessous permet d'apprécier leur degré d'ouverture à travers les collaborations sur les brevets applicatifs. La France a un profil plus souverain, sans s'interdire les coopérations. Le pragmatisme du Royaume-Uni et de la Chine, de même que la dépendance allemande sont mis en lumière.

Graphique n° 16 : collaborations internationales sur les brevets applicatifs en technologies quantiques (2024-2025)



Source : Mapping the global quantum ecosystem, OCDE/OEB, décembre 2025. La taille des arcs est proportionnelle aux familles de brevet qui impliquent une collaboration internationale (870 pour les États-Unis). La taille des flux indique la fréquence de collaboration entre deux pays (le lien le plus fort est entre les États-Unis et le Royaume-Uni avec 237 collaborations).

La phase de foisonnement s'achève et une nouvelle période s'ouvre avec des consolidations et une concentration des acteurs du secteur. Dans ce contexte, les risques de captation de la valeur par des acteurs étrangers se renforcent, d'autant qu'il est possible que la lutte soit *in fine* un jeu à vainqueur unique.

Selon un rapport[70] publié en 2024 par l'Académie chinoise de technologies de l'information et de la communication (CAICT)[71], 61 entreprises dans le monde travailleraient dans le calcul quantique, dont 25 entreprises selon l'approche dite supraconductrice (13 pour l'approche par ions piégés, 12 pour l'ordinateur quantique photonique, 11 pour l'ordinateur quantique par semiconducteur en silicium, huit dans l'approche atome neutre). La Chine compterait un tiers des entreprises de calcul quantique, avec une spécialisation sur la technologie des supraconducteurs, qui est également celle d'Alice & Bob.

Le rapprochement de ce rapport et d'une nouvelle publication intervenue en décembre 2025[72] témoigne d'une véritable éclosion de *startups* courant 2025 sur le périmètre plus large des technologies quantiques. En dix ans, le nombre d'entreprises du quantique serait en effet passé de 329 à 800 dans le monde. Un quart sont situées aux États-Unis, 17 % en Chine, et 29 % en Europe. Parmi les 230 entreprises européennes, plus de 70 seraient allemandes.

Plusieurs rachats sont déjà à l'œuvre courant 2025 et début 2026. Ainsi, Oxford Ionics, pépite britannique dont les avancées majeures avaient été remarquées en 2025, a été rachetée dans les mois suivants par une entreprise américaine. Une autre entreprise américaine a levé un milliard de dollars en septembre 2025, puis a atteint ensuite une valorisation de 7 Md$. En Chine, une entreprise du secteur a vu sa capitalisation boursière atteindre 6 Md€ également en 2025.

L'entreprise française Pasqal, la plus capitalisée en matière de *hardware*, poursuit la même stratégie mais à une échelle bien plus modeste. Elle a réalisé trois acquisitions pour franchir des caps technologiques. La levée de fonds qu'elle a effectuée en 2023, à hauteur de 100 M€, est dix fois inférieure à celles de ses concurrents. Dans ce contexte international, les entreprises françaises, bien que soutenues par les financements publics, sont vulnérables.

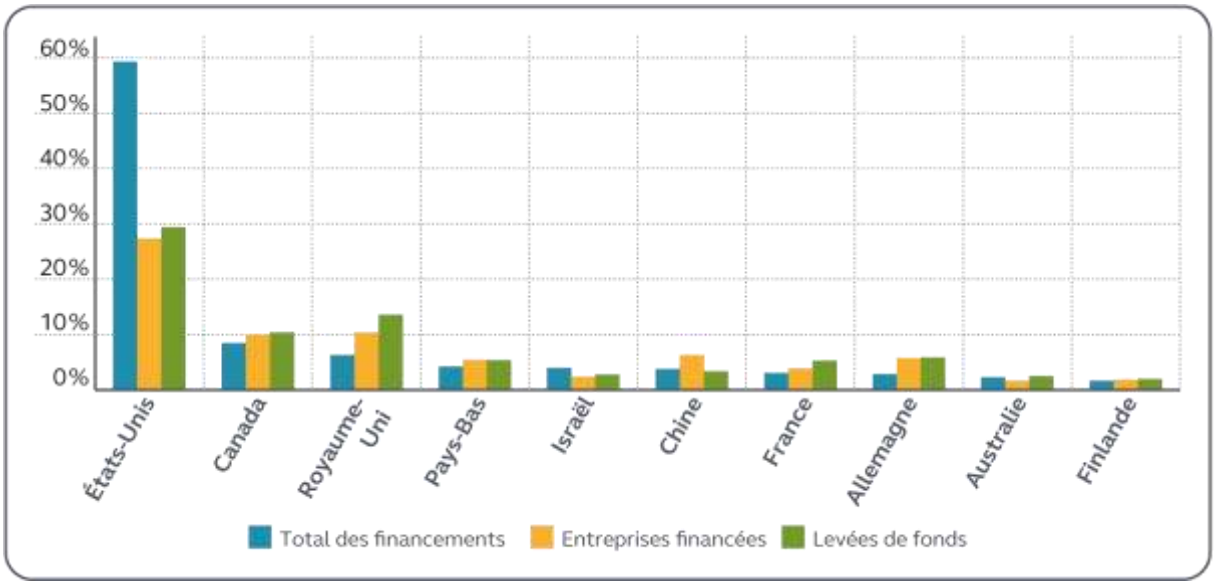
B - L'impact de la capacité de financement des principaux concurrents dans une logique économique qui peut être qualifiée de « guerre d'attrition »

Dans les pays anglo-saxons, le volume de l'investissement privé est massif par rapport à la France.

Le gouvernement australien et celui de l'État du Queensland ont consacré en 2024 550 M€ à une entreprise américaine pour construire un ordinateur tolérant aux fautes et commercialisable d'ici la fin 2027. L'entreprise avait déjà bénéficié, en 2022, de financements d'un autre État, grâce au gouvernement fédéral américain (DoE), même si ni le montant de ces subventions directes, ni la répartition des différents dispositifs mobilisés (subvention, prise de participations, réduction d'impôts) ne sont connus. Le DoE a également autorisé cette entreprise à utiliser les installations d'un laboratoire national pour conduire ses recherches en matière de cryogénie.

[70] caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202409/P020240925556609114480.pdf
[71] Le CAICT est placé sous la tutelle du ministère chinois de l'industrie et des technologies de l'information (MIIT).
[72] https://finance.sina.com.cn/tech/roll/2025-12-15/doc-inhavwnm2540100.shtml

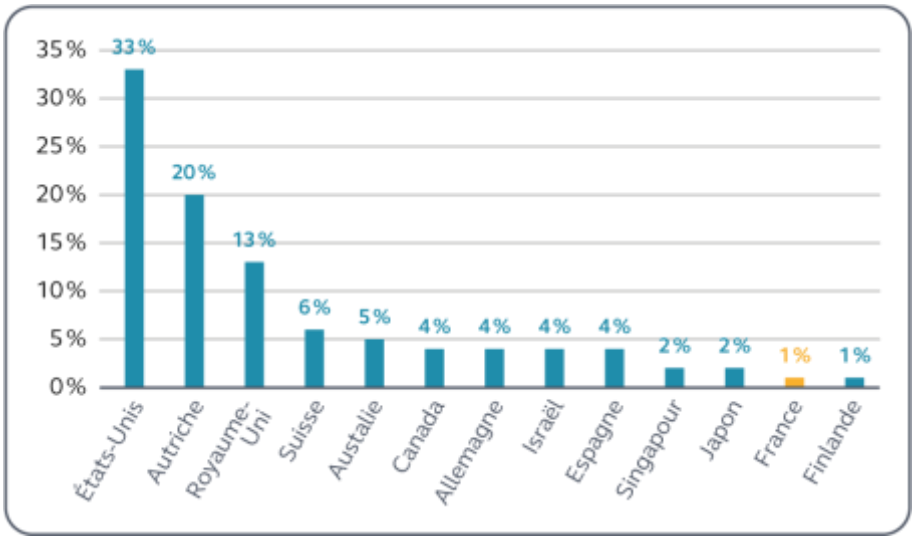
Graphique n° 17 : financement des principaux concurrents dans les technologies quantiques



Source/note : Mapping the global quantum ecosystem, 2025, OCDE. Le « financement total » désigne la position relative de chaque pays par rapport à l'ensemble des financements des entreprises quantiques dans le monde. Les « levées de fonds » correspondent à la proportion des investissements directs étrangers captés par chaque pays. Enfin, le terme « entreprises financées » fait référence à la proportion des entreprises phares du secteur quantique d'un pays donné, par rapport au total mondial des entreprises qui ont obtenu une forme quelconque de financement.

Le constat est accentué pour les activités centrées sur les logiciels. Cela témoigne en creux de la spécialisation française davantage concentrée sur la partie *hardware* que sur la « pile » logicielle. Dans ce domaine, les pays germaniques semblent plus avancés.

Graphique n° 18 : part des principaux pays développés dans les levées de fonds totales de *startups* en logiciels quantiques en 2024



Source : Cour des comptes, d'après le rapport Quantique, vers une logique de marché, *Institut Montaigne, octobre. 2024*

En termes d'entreprises cotées, 11 entreprises quantiques dans le monde ont réussi leur introduction en bourse, dont quatre au Canada, trois en Chine et trois aux États-Unis. Les entreprises françaises sont encore loin de ce cap, et les marchés européens offrent une moindre profondeur que ceux d'Amérique du Nord.

La Chine, quant à elle, se distingue par un investissement privé élevé par rapport aux investissements publics. Les montants sont certes sujet à caution. Toutefois, le dynamisme des investissements privés locaux s'est installé dès les années 2000. Le paysage du capital-risque chinois est marqué par une grande vitalité, mais avec des tickets d'entrée plus modestes qu'en Europe ou en Amérique du Nord. Avec dix opérations de financement majeures au cours des trois premiers trimestres de 2025, la Chine se classe deuxième mondiale en nombre de transactions, juste derrière les États-Unis.

La stratégie chinoise de financement du calcul quantique repose sur une architecture d'investisseurs fortement institutionnalisée, dominée par le capital-risque d'État. Alors que les phases d'amorçage restent relativement concentrées, les levées de fonds en série A et surtout en série B[73] réunissent un nombre élevé d'investisseurs – parfois plus d'une quinzaine – combinant acteurs étatiques, industriels et territoriaux. Des fonds souverains et parapublics jouent un rôle « d'investisseurs-ancres », tout comme les fonds régionaux et municipaux (Hefei, Shenzhen, Pékin). Ils servent avant tout de signal politique et technologique. À cette base étatique s'ajoute ensuite un capital-risque industriel particulièrement structurant (Lenovo Capital, China Mobile/Hechuang, CITIC Securities, etc.), agissant selon une logique d'anticipation industrielle.

Des nouvelles introductions en bourse sont à prévoir en 2026. En décembre 2025, deux leaders du secteur, CIQTEK (métrologie) et Precilasers (fournisseur de laser de précision), ont déposé leurs dossiers d'introduction en bourse (IPO) sur le marché STAR de Shanghai, visant à lever respectivement 143 et 172 M€.

L'Allemagne, les Pays-Bas et la Finlande, qui sont des acteurs majeurs des technologies quantiques (les technologies habilitantes pour les Pays-Bas, les capteurs et le logiciel pour l'Allemagne et l'ordinateur pour la Finlande), parviennent eux aussi à attirer des investissements privés au même niveau que leur soutien public. La France dispose donc d'une marge de progression.

En France, Bpifrance a pris des participations au capital de plusieurs sociétés du quantique, à travers les fonds d'investissement qu'elle gère soit pour son compte propre (fonds Digital Venture ou Large Venture), soit pour le compte de souscripteurs tiers (notamment l'État au titre des PIA/programme France 2030 et des ressources apportées par la DGA). Au total, près de 36,5 M€ ont été investis entre 2021 et août 2025 par Bpifrance.

En France, il n'existe qu'un seul fonds de capital-risque, Quantonation, consacré à l'amorçage des technologies quantique[74]. Il opère dans le monde entier et bénéficie d'une expertise scientifique de haut niveau. Fondé par trois Français, dont un physicien expert du domaine, Christophe Jurczak, il est conseillé par un lauréat du prix Nobel, Alain Aspect.

[73] *Cf* les définitions des différentes catégories de levées de fonds figurant dans l'annexe n° 6.

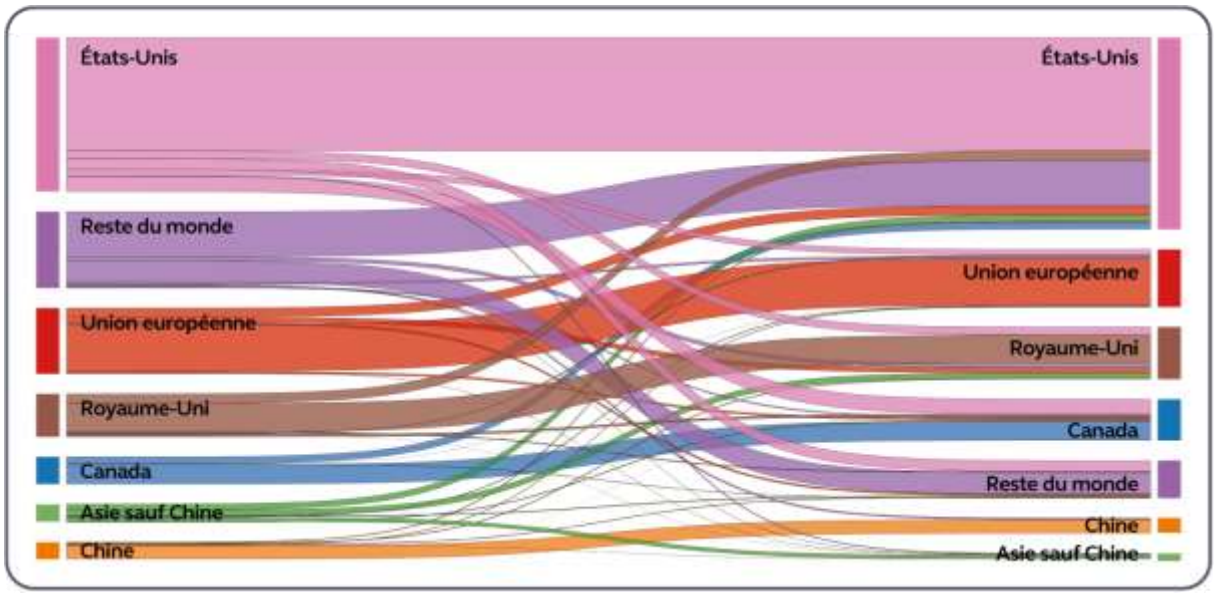
[74] Quantonation a été pendant plusieurs années le seul fonds consacré au quantique en Europe et aucun pays européen n'en a plusieurs. Le seul autre fonds comparable en Europe est danois (55North).

Pour sa première levée de fonds, Quantonation 1 avait investi 91 M€ dans 27 entreprises concentrées sur les technologies *hardware*, dont Pasqal et Quandela. La deuxième levée de fonds, Quantonation 2, a réalisé sa clôture à 220 M€ pour une cible initiale à 200 M€. Si une partie des fonds levés provient d'acteurs institutionnels[75], d'autres investisseurs privés, comme Audacia, ont soutenu ce deuxième tour de table. Cet acteur confirme son appétence croissante pour la *deeptech*, son fonds spécialisé dans le quantique contribuant notablement à la progression de ses revenus en 2025.

Ce signal positif est à confirmer en 2026. Il permet toutefois dès à présent, grâce à l'accroissement de la taille du fonds Quantonation d'envisager des tickets initiaux plus importants ou de permettre des accompagnements sur des horizons de développement plus longs.

Dans l'immédiat, les entreprises françaises du quantique doivent composer avec les liquidités disponibles dans les pays du Golfe. Elles regardent également davantage vers les marchés américains, sans pour autant négliger leur point d'ancrage national. Ainsi, Pasqal prépare son introduction en bourse au Nasdaq, avant de rejoindre la bourse de Paris. En préambule de cette opération, l'entreprise a annoncé une nouvelle levée de fonds de 340 M€. La moitié des fonds collectés provient d'investisseurs internationaux, parmi lesquels figurent des groupes industriels de premier plan (Parkway, Quanta Computer, LG Electronics et CMA CGM) ainsi que les actionnaires historiques des pays du Golfe.

Graphique n° 19 : flux d'investissements en capital-risque entre principales régions du monde vers les entreprises spécialisées dans le quantique entre 2012 et 2024



Source : Future Directions of Quantum Technology in Europe, JRC, 2025. Les investisseurs sont localisés à gauche, et les entreprises en technologies quantiques à droite (leur pays de rattachement est celui du siège social). 36% des transactions ne sont pas connues car leur valeur n'est pas publique et ne sont pas représentées sur ce graphique. La catégorie violette désigne le reste du monde. La catégorie verte (Asie développée) inclut le Japon, Taiwan, la Corée du Sud et Singapour. La Chine est représentée en Orange, Les États-Unis en rose, le Royaume-Uni en marron et le Canada en vert.

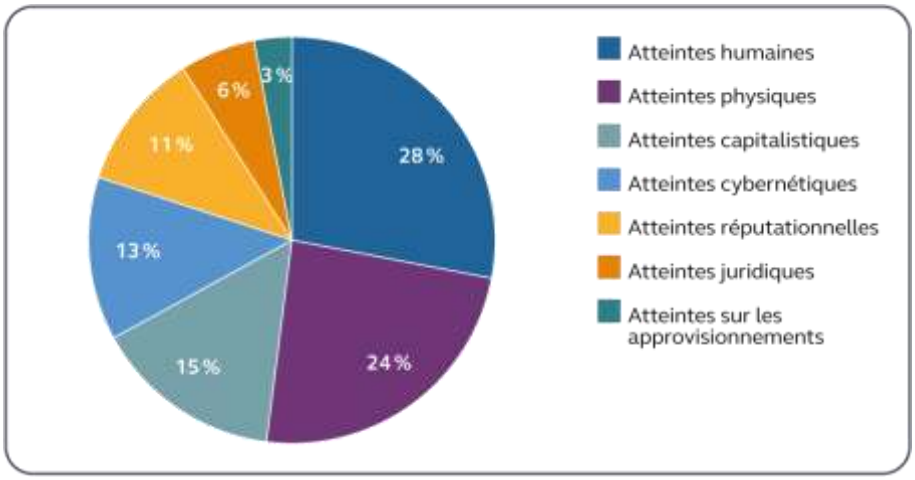
[75] Le Fonds National d'Amorçage 2 (FNA 2), géré par Bpifrance ainsi que le Fonds européen d'investissement (EIF), qui fait partie du Groupe de la Banque européenne d'investissement (BEI).

La France déploie des processus de contrôle des exportations et des prises de participation. La présence de Bpifrance au capital des entreprises les plus prometteuses constitue aussi un moyen de surveiller les agissements des autres actionnaires et offre un premier niveau de vigilance. Ces dispositifs de contrôle existent aussi chez tous nos concurrents, car ces actifs sont stratégiques et soutenus financièrement par les États. Un suivi plus spécifique des investissements directs étrangers (IDE) dans le secteur stratégique de l'informatique quantique devrait toutefois être assuré. Certains de ces IDE sont exclusivement guidés par des objectifs de rentabilité financière et ne sont pas motivés par l'accès à la propriété intellectuelle de l'entreprise concernée. D'autres prises de participation peuvent en revanche s'inscrire dans des stratégies d'achat de connaissances, y compris en faisant intervenir des investisseurs « paravents » ou par le canal d'investissements discrets réalisés en plusieurs étapes.

C - De nombreux autres risques de prédation existent

De manière assez classique, les services de contre-ingérence luttent contre des actions hostiles qui prennent différentes formes. Les atteintes capitalistiques, bien que les plus visibles, ne représentent que 15 % des atteintes au potentiel scientifique et technique français.

Graphique n° 20 : répartition par type d'ingérence constatées sur la base industrielle de technologie et de défense en 2025



Source : Cour des comptes, d'après la DRSD

Les atteintes humaines représentent de loin la première menace. Cela se matérialise par des recrutements agressifs, constatés par les *startups*, et des tentatives d'infiltration par des visiteurs étrangers, des stagiaires, des intérimaires ou encore des prestataires de service. La Chine utilise de manière massive ce vecteur pour collecter des informations. Elle met également à profit le volume de ses ressortissants pour saturer les moyens de surveillance. Ainsi, de manière institutionnalisée, la Chine contraint ses élèves boursiers, présentant par définition un excellent niveau académique, à recueillir du renseignement dans le cadre des activités qu'ils sont amenés à exercer à l'étranger.

Dans ce contexte, le renforcement de la sécurité des entreprises et des laboratoires constitue une priorité. Leurs installations sont en effet des cibles privilégiées, y compris matériellement (elles font ainsi l'objet d'intrusions, de vols de supports informatiques ou d'informations sensibles, de sabotages, etc.).

La plupart des pays lancés dans la course au calcul quantique ont lancé simultanément des programmes similaires, avec des objectifs de souveraineté et une stratégie affirmée d'attraction des capitaux et des talents mondiaux. Si les moyens et les stratégies européennes sont plus proches, la concurrence n'en demeure pas moins exacerbée, d'autant que les objectifs temporels pour la réalisation d'un ordinateur quantique sont les mêmes.

En se basant sur une échelle qui prend en compte les capacités d'ingérence et l'intention malveillante, **les services de renseignement intérieur (DGSI, DRSD) considèrent que le niveau actuel de la menace pesant sur l'informatique quantique est maximal**. Les risques sont d'autant plus importants que l'écosystème de l'informatique quantique est vulnérable. Cette pression révèle en creux l'efficacité des résultats obtenus par effet de levier des investissements publics.

L'écosystème actuel de l'informatique quantique est constitué de chercheurs qui sont insérés dans des communautés très internationalisées, ainsi que de *startups* dont les moyens de protection (cyber, juridique, etc.) sont limités par leur expérience et leurs ressources. Le contraste entre la vulnérabilité du secteur et sa valeur scientifique et économique sont incitatifs pour des prédateurs.

Face à cette menace, l'État dispose de moyens de surveillance et d'entrave, notamment le dispositif de Protection du potentiel scientifique et technique de la nation (PPST). L'objectif est de garantir la pérennité du potentiel scientifique tout en favorisant l'innovation. Les actions mises en œuvre reposent notamment sur une cartographie des actifs sensibles, englobant brevets, savoir-faire, données de recherche ou prototypes. Par ailleurs des dispositifs réglementaires contraignent les organisations à former leurs équipes à la culture de la sécurité.

La réalisation d'audits réguliers et l'insertion de clauses de confidentialité dans les contrats avec les partenaires sont essentielles pour limiter les risques de fuite. La mise en œuvre de ces dispositifs incombe principalement au SGDSN, qui s'appuie pour cette mission sur l'expertise de l'ANSSI, de la DGA et des services de renseignement. Le SGDSN conduit à ce titre une politique de prévention active.

Cet ensemble d'éléments montre qu'il existe un risque important que les investissements consentis soient effacés voire captés par la concurrence. Les ressources sont limitées pour tous les États et l'appropriation de celles des autres apparaît comme un moyen de s'assurer une domination future, même pour les États les plus riches et les plus puissants.

Dans ce contexte, le niveau européen, qui connaît des limites et ne doit pas être idéalisé, doit être mobilisé pour augmenter les capacités d'action. L'échelon communautaire ne saurait toutefois se substituer mais doit être complémentaire de partenariats choisis pour construire une action industrielle concertée.

III - La vocation de la France à devenir un pilier européen du calcul quantique dans une Europe désorganisée

A - Des financements tardifs et insuffisamment adaptés sur le plan économique

Au cours de la dernière décennie, l'Union européenne a lancé de nombreuses initiatives dans le domaine de l'informatique quantique, témoignant d'une montée en puissance progressive, allant du soutien à la recherche fondamentale au déploiement d'infrastructures stratégiques communes. La multiplication de ces initiatives reflète l'ambition européenne, mais a parfois entraîné une dispersion et un manque de lisibilité des actions, limitant la coordination et la visibilité des résultats.

La commission européenne s'est saisie des enjeux des technologies quantiques, comme en témoigne la publication de deux rapports au second semestre 2025 : la stratégie européenne quantique, « *Quantum Europe in a Changing World* »[76] publiée en juillet 2025 suivie de la publication par le JRC en octobre du rapport « *Future Directions for Quantum Technology in Europe* »[77], eux-mêmes précédés du rapport de M. Draghi[78] en 2024. Ces rapports mettent en avant le retard de l'investissement Européen en matière de technologies quantiques, particulièrement pour le calcul quantique, par rapport aux principaux compétiteurs mondiaux. De plus, l'adoption du *Quantum European Act,* qui fixera un cadre législatif à la gouvernance, l'organisation et le soutien de l'informatique et des technologies quantiques, n'est prévue qu'en 2026. Dans le même temps, la stratégie européenne vient seulement d'être publiée, soit postérieurement à plusieurs stratégies nationales déjà en vigueur. Ainsi, du seul point de vue du calendrier, la gouvernance européenne apparaît en décalage, intervenant tardivement par rapport aux dynamiques engagées au niveau des États membres.

Le calcul quantique n'a pas été érigé en priorité européenne, contrairement à ce qui a été fait en France, comme le montre la répartition des financements entre les différentes technologies[79]. La France, en tant que leader en calcul quantique, de par son écosystème émergent mais déjà structuré et de ses orientations privilégiées dans ce domaine doit donc réussir à faire émerger le calcul quantique comme une priorité, et se positionner en tant que chef de file d'un ordinateur quantique européen.

Par ailleurs, les cofinancements européens de projets inclus dans la stratégie nationale pour le quantique restent à préciser. En effet, bien que la France capte un certain nombre de financements européens, les cofinancements européens ne sont pas considérés dès la phase d'examen du projet, mais s'ajoutent par-dessus les projets existants, lors d'appels à projets européens disjoints. Par ailleurs, les différents acteurs français soulignent les fortes contraintes liées à la participation simultanée à plusieurs appels à projets (nationaux et européens). Les dossiers initiaux présentent souvent de fortes redondances, auxquelles s'ajoutent des exigences multiples en termes de livrables et d'évaluations intermédiaires, générant une surcharge administrative. Les calendriers respectifs des appels à projets nationaux et européens ne sont pas synchronisés, ce qui complique encore davantage les possibilités de cofinancements.

[76] *Quantum Europe in a Changing World*, Commission européenne, 2025.
[77] Future Directions for quantum technologies, JRC, 2025.
[78] L'avenir de la compétitivité européenne, 2024, M. Draghi.
[79] Future Directions for quantum technologies, JRC, 2025.

Lorsque des projets communs émergent, la collaboration est souvent source de retard, comme le montre l'exemple du projet HQI.

Certains pays européens, tels que l'Espagne, ont réussi à mieux coordonner leurs appels nationaux et européens. À travers le « Centre de développement des technologies industrielles » (CDTI), l'Espagne a mis en place un dispositif structuré combinant soutien direct à la R&D des entreprises et gestion de la participation nationale aux programmes européens. Les projets labellisés « *Seal of Excellence* » de *l'European Innovation Council* peuvent ainsi bénéficier d'un financement national lorsque l'enveloppe européenne est insuffisante, avec une procédure allégée car le projet a déjà été évalué par les instances européennes. Ce mécanisme optimise l'impact des financements européens sur le territoire, sécurise les projets de haute qualité, favorise la montée en maturité technologique des PME, et accélère la R&D, ce qui est particulièrement pertinent dans une course mondiale.

La France pourrait s'inspirer de ce modèle en créant un guichet national « relais » qui, dans des domaines identifiés comme prioritaires (par exemple l'intelligence artificielle et le calcul quantique), permettrait aux projets labellisés à l'échelon européen de bénéficier en complément d'un financement national, assurant continuité, valorisation et compétitivité de ces projets sur le territoire national. La mise en œuvre d'un tel dispositif nécessiterait d'aligner les calendriers des appels à projets nationaux sur ceux des AAP organisés à l'échelle européenne et de mutualiser les dossiers nationaux et européens. Cela permettrait d'offrir de la visibilité aux acteurs économiques et de diminuer les coûts de gestion liés à la constitution des dossiers.

Les investissements européens sont dispersés, aussi bien en termes de projets, d'objectifs, de technologies et de cibles, car ils n'entrent dans aucune stratégie globale et structurée de long terme. Seul le projet Chips JU[80], avec l'annonce de six lignes pilotes européennes de puces quantiques, rassemblant des consortiums d'acteurs européens, publics et privés, travaillant sur la même technologie attendue à l'horizon 2030, constitue un premier pas vers un travail européen commun et ciblé. Ce projet est cofinancé par la stratégie nationale grâce à Bpifrance.

Le projet *EuroHPC*, dans sa partie hybridation avec le calcul quantique, offre aussi un modèle de cofinancements. Les projets sont alors cofinancés en partie par le pays bénéficiaire (qui est souvent le pays dont est issus le fournisseur) et à 50 % par des fonds européens. C'est en rassemblant les différents acteurs européens autour d'objectifs et de projets communs, et autour de technologies clairement identifiées, que l'écosystème quantique européen pourra connaitre l'essor dont il a le potentiel, à l'image du projet Chips JU ou des appels à projets trilatéraux mis en place par la France, l'Allemagne et les Pays Bas[81] (piloté du côté français par Bpifrance) et non par des instances européennes.

Un projet européen d'ordinateurs quantiques, inspiré de *PROQCIMA*, devrait être intégré à la stratégie européenne. Il viserait à limiter le nombre d'acteurs cherchant à développer un ordinateur quantique, en désignant le meilleur et en encourageant les rachats ou les collaborations européennes.

[80] Chips JU est une entreprise commune d'initiative européenne concernant les semi-conducteurs.
[81] En mai 2025, la France, les Pays-Bas et l'Allemagne ont lancé avec succès leur premier appel trilatéral à l'innovation quantique, marquant une étape importante pour renforcer le leadership européen dans ce domaine.

Présentation de l'entreprise commune EuroHPC

Dans une logique de passage de la recherche vers des infrastructures opérationnelles et un usage à grande échelle, le Quantum Technologies Flagship devrait désormais s'inscrire dans une dynamique plus large de convergence avec le calcul à haute performance européen, incarnée par l'entreprise commune EuroHPC. Créée en 2020 et basée à Luxembourg, cette entreprise commune a pour mission de développer un dispositif européen de supercalcul de classe mondiale en mutualisant les ressources de l'Union européenne, des États participants et de partenaires privés. Elle coordonne la création et l'exploitation d'infrastructures de calcul à haute performance et d'informatique quantique sécurisées, interconnectées et orientées vers les besoins des utilisateurs, tout en renforçant la chaîne d'approvisionnement, les applications logicielles et les compétences clés en Europe.

Cette initiative a déjà permis de déployer deux supercalculateurs au sein de l'Union européenne : un à Julich en Allemagne et un autre en France, prévu pour 2026. L'intégration de la stratégie européenne en matière de technologies quantiques au sein d'EuroHPC permet de rationaliser sa mise en œuvre et d'éviter la multiplication d'initiatives parallèles, tout en encourageant les acteurs à privilégier les technologies européennes.

Si cette approche comporte le risque de limiter la portée de l'informatique quantique au seul domaine des supercalculateurs, elle représente néanmoins une démarche positive, renforçant la souveraineté technologique et l'industrie quantique européenne. L'objectif affiché est de promouvoir encore davantage la préférence européenne et de développer un ordinateur quantique tolérant aux fautes en Europe. Plus globalement, cette entreprise commune constitue une avancée majeure, car elle traduit pour la première fois un consensus européen clair : le développement des technologies quantiques doit se faire à l'échelle de l'Union, avec des solutions conçues et produites en Europe.

Pour mettre en œuvre cette stratégie, la Commission européenne a lancé un appel à contributions, clôturé le 15 décembre 2025, afin de préparer le futur acte législatif de l'UE sur les technologies quantiques, dont l'adoption est prévue en 2026. Ce texte vise à mettre fin aux superpositions et complexités administratives résultant de la multiplication des initiatives européennes et transnationales, en établissant un cadre juridique et opérationnel clair pour le développement des technologies quantiques à usage civil et industriel. Ses principaux axes consistent à stimuler la recherche et l'innovation, renforcer la capacité industrielle européenne, notamment grâce à des lignes pilotes et une infrastructure de conception, et accroître la résilience ainsi que la gouvernance de la chaîne d'approvisionnement. Prévu pour le premier semestre 2026, ce texte intervient après plusieurs années marquées par un enchaînement rapide de dispositifs européens.

Si ces initiatives ont permis de mobiliser des moyens significatifs, elles se sont souvent développées sans réelle coordination entre elles ni articulation suffisante avec les cadres nationaux, générant une certaine complexité et un manque de lisibilité. Il s'agit désormais de structurer cet ensemble afin de gagner en cohérence. Le texte devrait rationaliser les financements existants, renforcer leur articulation avec les stratégies nationales et clarifier l'architecture d'ensemble. Il devrait en outre intégrer un volet sur la préférence européenne ainsi qu'une dimension consacrée aux technologies duales, afin d'affirmer une approche plus stratégique et coordonnée à l'échelle de l'Union.

Le manque d'articulation entre stratégies européennes et nationales est toutefois à relativiser en France où l'articulation entre les deux niveaux est assurée de manière relativement harmonieuse, contrairement à ce qui est souvent observé. Ceci est dû notamment à l'implication directe des experts responsables de la stratégie nationale dans les réflexions européennes. Le

rôle dévolu au coordinateur national de la stratégie quantique facilite particulièrement cette cohérence. Le futur *Quantum Act* aura néanmoins des répercussions importantes sur la stratégie nationale, qui arrive par ailleurs à son terme au moment même de l'émergence de ce texte européen.

B - Des modalités de financement à renforcer

1 - Instaurer une préférence européenne pour le quantique

Le *Quantum Act* devra s'accompagner d'un message politique fort en faveur de la souveraineté technologique européenne. Les financements publics européens devront prioritairement soutenir les acteurs établis dans l'Union européenne, afin de structurer un écosystème industriel solide et compétitif. Dans cette perspective, une préférence européenne affirmée devra guider l'allocation des fonds publics, afin d'éviter que ceux-ci ne bénéficient à des entreprises extra-européennes.

2 - L'étape du pré-amorçage, déjà efficace, peut être renforcée

Le modèle allemand de l'agence SPRIND est au cœur du dialogue franco-allemand sur l'innovation de rupture. Face au constat du manque de prise de risque en R&D de ses industriels, l'Allemagne a fait le choix de créer en 2019 une agence consacrée à l'innovation de rupture. À la différence du modèle américain des ARPA, dont elle s'inspire, l'agence SPRIND (*Bundesagentur für Sprunginnovationen*) vise en priorité la création de nouveaux acteurs économiques. Le modèle SPRIND comporte des facteurs d'attractivité pour les porteurs de projets d'innovation de rupture pour lesquels un besoin du marché est déjà identifié ; il leur offre en effet :

- un modèle de financement innovant, avec en particulier le recours systématique au dispositif *pre-commercial procurement* (PCP) autorisant un taux d'aide de 100 % pour les entreprises ;
- un processus de décision court (*time-to-money* de 17 jours pour les appels à projets) ;
- un pilotage continu appliquant un « *fail fast* » strict sur les projets, avec une forte valeur ajoutée de l'accompagnement à la fois technique et business.

Dotée initialement de 1 Md€ sur 10 ans, l'agence SPRIND a investi 220 M€ en 2024. Ses moyens devraient être renforcés, et son périmètre étendu au domaine de la défense.

Lors de la réunion du conseil des ministres franco-allemand du 29 août 2025, le Président de la République a annoncé sa décision de développer un instrument en France s'inspirant de cette agence. Ce projet doit toutefois s'articuler avec les dispositifs de Bpifrance pour éviter la multiplication des guichets et la superposition des mécanismes de soutien. La mission d'étude confiée à Bpifrance inclut les questions liées à la fiscalité de l'innovation et la réglementation.

L'État peut également profiter d'événements comme « Choose France » **pour communiquer autour des projets et favoriser les investissements dans les technologies quantiques.** Le salon France Quantum, organisé à la Station F à Paris, contribue depuis 2022

à réunir les acteurs publics et privés de l'écosystème. Les prochaines éditions pourraient chercher à renforcer l'appariement entre financeurs privés et chercheurs. **La communication autour de ces événements pourrait également être accentuée autour des projets et des réalisations possibles, afin d'attirer les investisseurs et de mobiliser l'épargne privée. Le coût de l'électricité en France pourrait aussi être mis en avant afin d'inciter des acteurs étrangers de l'informatique quantique à installer en France des unités de production.**

3 - Les pistes pour un passage à l'échelle requièrent la mobilisation et la structuration des acteurs privés, notamment des industriels

La structuration des investisseurs privés doit se poursuivre et s'amplifier. Mais d'autres types d'acteurs privés peuvent contribuer à consolider l'écosystème quantique. La prise de participation majoritaire par l'État d'une partie des activités du groupe Atos[82] ouvre de nouvelles perspectives. L'expérience de l'entreprise Bull, créée en 2026 à la suite de cette opération, ainsi que sa taille, permettent d'imaginer d'autres formes d'appui pour les entreprises du secteur.

En effet, l'accès à la commande publique est soumis à la libre concurrence. Cela conduit parfois à attribuer les marchés à des entreprises étrangères, et à subventionner ainsi leur R&D. Par ailleurs, la réglementation peut exiger des éléments contractuels rédhibitoires pour de petites structures, tels qu'un niveau de garanties financières ou un montant de pénalités dissuasif.

Ainsi, de nouvelles modalités d'accès à la commande publique pour l'écosystème des *startups* pourrait être imaginé avec l'appui d'un intégrateur, qui pourrait être Bull ou une société présentant les caractéristiques requises. L'entreprise, à définir, pourrait négocier en amont des appels d'offre certains points pour éviter les effets de bord négatifs de clauses qui portent atteinte à une nouvelle filière.

À titre d'exemple, le prix des barrettes de mémoire a triplé entre le troisième trimestre 2025 et le début 2026, tandis que les délais de livraison se sont allongés. L'exposition d'une petite structure à ces variations d'approvisionnement est forte, et peut entraîner une faillite si elle s'engage sur un prix et ne parvient pas à négocier un ajustement en cours d'exécution du marché.

Plusieurs objectifs, à définir, pourraient être fixés à une entreprise intégratrice pour les technologies quantiques, tels que :

- mobiliser ses services juridiques et achat dans l'expertise des clauses contractuelles ;

[82] L'État a signé le 31 juillet 2025 un contrat avec Atos portant sur l'acquisition de l'activité *Advanced Computing*. La valeur d'entreprise retenue est de 410 M€, dont 110 M€ de complément de prix. Le périmètre de l'activité *Advanced Computing* rassemble les divisions *Calcul Haute performance & Quantique* et les divisions *Business computing & Intelligence Artificielle*. Elle conçoit et fabrique des serveurs de haute performance ainsi que des supercalculateurs, technologies critiques dont les applications au profit de la défense et de l'industrie française sont essentielles pour la souveraineté. Ces activités regroupent plus de 2 500 personnes, majoritairement en France, pour un chiffre d'affaires attendu en 2025 d'environ 800 M€. En 2025, le premier supercalculateur dit *exascale* JUPITER, conçu, fabriqué et assemblé par les équipes d'*Advanced Computing*, a été livré dans le cadre du programme EuroHPC.

- constituer un stock stratégique pour les pièces détachées ;
- se porter garante pour les entreprises avec une surface financière insuffisante ;
- enrichir l'offre d'une *startup* avec ses propres produits et sa propriété intellectuelle pour une proposition plus complète ;
- réaliser de l'assemblage et mobiliser son service de maintenance.

À défaut d'un consortium à l'échelle nationale, cette première étape pourrait amorcer la structuration d'un écosystème dont la viabilité se situe à l'échelle du marché européen.

Par ailleurs, la cartographie des chaînes d'approvisionnement et des vulnérabilités des entreprises du secteur est en cours, sous l'impulsion du SGPI. Elle devra donner lieu à un plan de sécurisation dès 2026, d'autant que la situation internationale accroît les incertitudes économiques. Cette action est un préalable à une réflexion sur un consortium européen avec un partage de la valeur entre opérateurs et pays partenaires.

CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Alors que la course à l'ordinateur quantique s'accélère, que la compétition entre les puissances industrielles s'exacerbe et que les risques de captation ou de prédation des investissements réalisés s'intensifient, la France à les capacités de devenir un pilier européen du calcul quantique.

La phase de passage à l'échelle qui s'annonce nécessite une mobilisation et une structuration des acteurs privés qui doivent être coordonnées entre les États membres de l'Union européenne ou dans le cadre de coopérations bilatérales. La France doit s'organiser pour que cette coordination ou ces coopérations lui permettent de répondre à l'enjeu majeur de souveraineté que constitue la maîtrise du calcul quantique.

La Cour formule la recommandation suivante :

6. *Construire d'ici 2028 des partenariats industriels ciblés à l'échelle européenne, le cas échéant avec une spécialisation par pays par exemple sur des technologies complémentaires (SGPI, 2028).*

Conclusion générale

L'ordinateur quantique représente une technologie de rupture. Investir dans cette technologie est plus rentable, d'un point de vue économique, que de chercher à perfectionner une technologie déjà existante (*midtech*) qui souffrirait d'un déficit de compétitivité. En effet, la production de biens est soumise à la logique des rendements décroissants : améliorer une technologie dont l'usage est généralisé est coûteux et produit de moins en moins de gains de productivité, tandis que l'introduction sur le marché d'un nouveau produit, rare, permet d'acquérir rapidement des parts de marché importantes et de maximiser le rendement des investissements consentis.

Pour les technologies quantiques, dont l'informatique quantique, la phase de consolidation industrielle est amorcée. Les besoins en matière de recherche et d'innovation sont encore importants, dans un jeu qui sera sans doute « à vainqueur unique ». Par ailleurs (même si ce point n'a pas été examiné dans le cadre de l'enquête de la Cour), la perspective désormais certaine de la mise au point de l'ordinateur quantique à moyen terme a d'ores et déjà des incidences sur la cryptographie.

En permettant l'émergence d'un écosystème dynamique, la stratégie nationale quantique, déployée sur la période 2021-2025, a été efficace. En effet, l'exploitation de synergies entre recherche fondamentale et R&D, mais aussi entre acteurs publics et privés, a produit des résultats concrets dans un pas de temps resserré.

Toutefois, depuis le lancement de la SNQ, les besoins du secteur ont considérablement évolué. En 2026, l'enjeu pour l'État n'est plus de faire émerger un écosystème industriel, mais d'assurer sa montée en puissance, unique voie de sa survie. Or, le passage à l'échelle a commencé et va s'accompagner d'une phase de concentration, qui sera initiée par les entreprises les plus capitalisées. À ce stade, en effet, les acteurs dotés des financements les plus importants achètent les plus petits. La valeur créée par les innovations issues et soutenues par le secteur public risque donc d'être transférée à nos principaux compétiteurs européens ou plus probablement extra-européens. Par ailleurs la taille du marché européen ne permettra pas à chaque État de disposer d'un champion national dans des conditions de libre concurrence.

Les principales pistes de financement d'une trajectoire soutenable pour la recherche française dans le calcul quantique sont limitées.

Indépendamment des dynamiques européennes, la France doit définir au-delà de 2025 une trajectoire nationale cohérente et hiérarchisée pour la recherche et l'innovation en calcul quantique, avec un financement en adéquation avec les ambitions définies.

Le financement public est indispensable pour amorcer et structurer la filière. En effet, l'essentiel des publications et brevets nationaux est alimenté par le secteur public, l'État compensant la défaillance de marché liée à l'aversion au risque des investisseurs pour les recherches très amont.

Une seconde version de la stratégie nationale quantique doit être élaborée rapidement, en lien avec les industriels, en réaffirmant la priorité donnée à l'informatique quantique tout en assumant des arbitrages plus sélectifs. L'actualisation de la SNQ va sans doute nécessiter des décisions difficiles mais nécessaires, notamment un arrêt plus précoce du soutien apporté aux acteurs dont les perspectives technologiques ou industrielles apparaîtront insuffisamment robustes. Une stratégie crédible suppose une capacité réelle à prioriser et à concentrer les ressources.

L'actualisation de la SNQ doit s'accompagner d'une évaluation de la répartition optimale des moyens qui y seront consacrés entre les différentes briques de la filière (formation, recherche fondamentale, R&D), mais également entre les secteurs industriels de l'informatique quantique (*software, hardware*, technologies habilitantes). La France présente un déficit relatif dans l'émergence de *startups* positionnées sur les cas d'usage et les couches logicielles du calcul quantique, alors même que ces segments requièrent des investissements en capital moins intensifs que le *hardware*. Un soutien ciblé sur cet écosystème applicatif permettrait de structurer la demande, de créer des retombées économiques à moyen terme et d'anticiper la montée en maturité des technologies matérielles.

Toutefois, le financement public ne peut plus constituer l'unique pilier de l'effort national.

Alors que la contrainte budgétaire pèse souvent plus lourdement sur les dépenses d'investissement, dont la recherche, le soutien au développement de fonds privés doit être recherché et favorisé

Dans le domaine du calcul quantique comme sur de nombreux autres segments d'innovation, la France souffre d'un manque de fonds privés et de financement en capital des *startups* au stade de la croissance. Le rapport Forteza a préconisé de « *Faire émerger un fonds d'investissement « late-stage » de confiance de 300 M€ à 500 M€ consacré aux startups du quantique* ». Le montant nécessaire d'un fonds consacré au calcul quantique, abondés notamment par des acteurs privés, serait supérieur à 1 Md€ pour les années 2026 à 2028.

Il existe un unique fonds privé d'investissement français dans le domaine des *deeptechs*, la société de capital-risque Quantonation, spécialisée dans le financement des technologies quantiques. Cependant, ce seul fonds ne suffira pas à soutenir tous les nouveaux acteurs émergents, et sa taille ne lui permet pas d'être chef de file pour des levées de fonds en série C, (levées de fonds à hauteur de plusieurs centaines de millions d'euros, dont le chef de file doit environ couvrir 30 %). L'émergence de fonds spécialisés chez les grands investisseurs est donc indispensable.

Le passage à l'échelle industrielle et la consolidation d'une position technologique relativement souveraine supposent ainsi une mobilisation accrue de capitaux privés, nationaux et internationaux. L'enjeu n'est donc plus seulement d'augmenter les moyens, mais d'organiser un effet de levier stratégique entre financements publics et investissements privés.

Le secteur public ne peut intervenir qu'en créant un environnement propice à la création d'un tel fonds, en instituant un fonds ancre pour rassurer les investisseurs ou en recourant davantage à des fonds fléchés vers l'effort de défense au titre des enjeux de souveraineté, comme le FID. L'État est également souscripteur, en respectant la règle communautaire de l'investisseur avisé, de véhicules publics comme l'Initiative de la BEI, *European Tech*

Champion Initiative, à laquelle France 2030 participe à hauteur de 1 Md€ et dont une partie des financements pourraient se porter sur un fonds croissance consacré aux technologies quantiques.

La France doit parallèlement nouer des partenariats stratégiques à l'échelle internationale

L'échelon européen doit s'affirmer comme le niveau stratégique central de la gouvernance du quantique. Les 27 états membres de l'UE ont intérêt à unir leurs capacités scientifiques, industrielles et financières afin de rester compétitifs à l'échelle internationale et de peser réellement dans la course mondiale à l'innovation. Cette ambition pourrait se concrétiser par l'adoption d'un *Quantum European Act,* annoncé pour 2026, qui structurerait une stratégie commune et renforcerait la coordination des investissements et des infrastructures.

À défaut d'un consensus à l'échelle de l'Union, ou de l'adoption d'outils calibrés au regard des besoins nationaux, le développement d'accords bilatéraux ou plurilatéraux entre États, prioritairement européens, devrait être encouragé, sur le modèle des partenariats déjà noués avec les Pays-Bas et l'Allemagne.

Sur ce dernier volet, un double travail est à engager simultanément. Il convient en premier lieu d'identifier les partenaires les plus complémentaires et les plus fiables dans une logique de partage de la valeur. Un projet comme Airbus, parfois invoqué comme un modèle à suivre, est né de synergies industrielles. Les États ne peuvent se substituer à l'intérêt de ces acteurs économiques. Il leur appartient en revanche de favoriser les occasions d'échanges entre structures complémentaires et de soutenir les projets les plus prometteurs au regard des enjeux économiques et de souveraineté nationale. Des arbitrages difficiles seront sans doute à prendre entre approvisionnement européen souverain et développement de l'emploi sur le territoire national.

Dans ce contexte, deux scénarios sont envisageables pour l'avenir, entre lesquels le Gouvernement devra rapidement arbitrer.

(1) Assumer le coût de la souveraineté en consentant une accélération des financements, dès le budget 2027, pour soutenir le développement d'un champion national ou européen.

La suite du volet concernant l'informatique quantique du plan France 2030 doit être amorcée dès à présent afin d'éviter une rupture dans les cycles de projets sur lesquels les organismes nationaux de recherche (ONR) et les universités programment leurs recherches. Dans l'hypothèse où la France confirmerait l'objectif qu'elle s'est assignée dans le cadre de la SNQ pour la période 2021-2025 de se doter d'un champion du calcul quantique, l'effort consenti devrait être dimensionné au regard des investissements réalisés par nos principaux concurrents, au risque de n'être que le fonds d'amorçage d'entreprises étrangères conquérantes, financé par le contribuable.

Pour l'ensemble de la filière française de l'informatique quantique, acteurs publics et privés confondus, le besoin de financement s'élève à plus de 1,5 Md€ sur la période 2026-2028. Cette estimation s'appuie sur la répartition du soutien public aux acteurs de la filière, et aux besoins en capitalisation des principaux acteurs privés pour les prochaines années.

Le maintien du soutien public à son niveau actuel aurait mécaniquement une incidence sur les indicateurs d'excellence académique et rendrait le décrochage inévitable à terme, même si les effets ne seraient pas immédiatement visibles.

La stratégie de soutien public doit rester globale et donc reposer sur une vision consolidée de l'ensemble des financements nationaux. L'évolution à la hausse ou à la baisse des financements issus de France 2030 a un effet mécanique de report sur les appels à projets de l'ANR. La loi de programmation de la recherche de 2020 avait tenté de réaligner ce guichet au niveau des standards internationaux de financement de la recherche. Si le soutien structurel de l'ANR devait être réduit, ou celui de Bpifrance, les efforts d'une nouvelle SNQ pourraient être amoindris, voire inutiles. Le renforcement de l'un des piliers de financement (France 2030, ANR ou Bpifrance) ne peut se faire au détriment des autres.

(2) Réorienter les moyens alloués aux entreprises privées vers un autre secteur industriel avec un possible avantage concurrentiel.

La France peut aussi faire le choix, retenu par d'autres puissances européennes disposant également de moyens contraints (Pays-Bas, Autriche, Finlande), du renoncement à une stratégie à large spectre au profit d'une spécialisation sur un volet particulier du domaine de l'informatique quantique.

À défaut d'ambition assumée de développement d'un ordinateur quantique complet, une réorientation stratégique pourrait ainsi être envisagée vers certaines strates (comme la pile logicielle ou les cas d'usage) ou vers des technologies habilitantes. Ces segments représentent des vecteurs de souveraineté industrielle, offrent des perspectives de valorisation plus rapide et s'inscrivent dans des chaînes de valeur internationales déjà structurées.

Une diminution brutale du soutien apporté aux *startups* de l'informatique quantique les condamnerait très rapidement à un rachat par des entreprises étrangères, principalement américaines. Même dans l'hypothèse d'un transfert de leur siège dans le pays acquéreur, une partie de leurs activités et de leurs emplois serait sans doute maintenue en France à moyen terme, mais leur développement ne coïnciderait plus avec les intérêts souverains de notre pays.

Ce risque étant majeur, dans l'hypothèse où il s'avérerait non soutenable d'augmenter les financements alloués aux entreprises de calcul quantique, il serait plus efficient de les affecter à une autre filière *deeptech* ayant un avenir industriel encore ouvert pour les acteurs français. En revanche, une réallocation vers un secteur industriel *midtech*, comme l'automobile, aurait un effet de levier très limité tant économiquement qu'en termes de souveraineté future.

Quelle que soit l'orientation retenue, il est indispensable d'évaluer finement les besoins afin de maximiser l'impact des investissements réalisés par les pouvoirs publics. Les arbitrages nécessaires devront être rendus rapidement, au risque d'intervenir à contre-temps et de ne pas produire les effets escomptés. Le second semestre 2026 apparaît ainsi comme un moment charnière.

Liste des abréviations

AE : ..... Autorisations d'engagement
ANR : ..... Agence nationale de la recherche
AID : ..... Agence de l'Innovation de Défense
ANRT : ..... Association nationale de la recherche et de la technologie
ANSSI : ..... Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information
BPI : ..... Banque publique d'investissement
C2I : ..... Conseil interministériel de l'innovation
C2N : ..... Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies
CIR : ..... Crédit d'impôt recherche
CMA : ..... Compétence et métiers d'avenir
CND : ..... Commissariat au Numérique de Défense
COMP : ..... Contrats d'objectifs, de moyens et de performance
CP : ..... Crédits de paiement
CPJ : ..... Chaires de professeur junior
CPMO : ..... Comité de pilotage ministériel opérationnel
DB : ..... Direction du budget
DGA : ..... Direction générale de l'armement
DGE : ..... Direction générale des entreprises
DGRI : ..... Direction générale de la recherche et de l'innovation
DNC : ..... Dotation non consommable
EIC : ..... Conseil européen de l'innovation
EPIC : ..... Établissement public à caractère industriel et commercial
ERC : ..... Conseil européen de la recherche
ETI : ..... Entreprise de taille intermédiaire
FID : ..... Fonds Innovation Défense
HPC : ..... Calcul haute performance
IPP : ..... Institut polytechnique de Paris
JEC : ..... Jeune entreprise de croissance
JEI : ..... Jeune entreprise innovante
LLM : ..... Grands modèles de langage
LPM : ..... Loi de programmation militaire
MSCA : ..... Marie Skłodowska-Curie Actions
MESRE : ..... Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'espace
MIT : ..... Massachusetts Institute of Technology
ONR : ..... Organismes nationaux de recherche
OAT : ..... Obligations assimilables au Trésor

PEPR : ..... Programme et équipements prioritaires de recherche
PGG : ..... Politique prioritaire du Gouvernement
PPST : ..... Protection du potentiel scientifique et technique
QPU : ..... Unité de traitement quantique
R&D : ..... Recherche et développement
SGDSN :..... Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale
SGPI : ..... Secrétariat général pour l'investissement
SNQ : ..... Stratégie nationale quantique
TGCC : ..... Très grand centre de calcul
TRL : ..... Niveau de maturité technologique
UMR : ..... Unité mixte de recherche
UE : ..... Union européenne

Annexes

Annexe n° 1 : glossaire....104
Annexe n° 2 : périmètre de l'enquête....107
Annexe n° 3 : méthode de ventilation des projets....109
Annexe n° 4 : la conception et le fonctionnement de l'ordinateur quantique....112
Annexe n° 5 : échelle des TRL (Technology Readiness Level) - Niveaux de maturité des technologies....116
Annexe n° 6 : les cycles de levée de fonds....118
Annexe n° 7 : présentation de la stratégie nationale quantique (2021-2025)....119
Annexe n° 8 : synthèse des financements régionaux recensés....121
Annexe n° 9 : les fonds de l'Union européenne....122
Annexe n° 10 : les programmes liés à la formation....123
Annexe n° 11 : le programme *HQI*....125
Annexe n° 12 : le programme *MetriQs*....126
Annexe n° 13 : le programme *Q-Loop*....127

Annexe n° 1 : glossaire

A

- Agnostique (usage en informatique) : technologie en informatique qui peut s'adapter à des environnements techniques différents et être interopérable au sein de systèmes distincts.
- Algorithme quantique : Méthode de calcul conçue pour un ordinateur quantique, souvent plus rapide que les algorithmes classiques pour certains problèmes (ex. : recherche dans une base de données, cryptographie).
- Atome : Plus petite unité de la matière, utilisée en informatique quantique pour créer des qubits (ex. : ions piégés).

B

- Bit : Unité de base de l'informatique classique, qui vaut soit 0, soit 1.
- Bit quantique (qubit) : Version quantique du bit, qui peut valoir 0, 1, ou les deux en même temps (superposition).
- Bruit quantique : Perturbations qui affectent la stabilité des qubits et causent des erreurs.

C

- Calcul quantique : Utilisation des principes de la mécanique quantique pour effectuer des calculs.
- Capteurs quantiques : Dispositifs utilisant les propriétés quantiques pour mesurer des grandeurs physiques avec une précision bien supérieure à celle des capteurs classiques.
- Cas d'usage : Applications concrètes de l'informatique ou des technologies quantiques dans des domaines comme la cryptographie, l'optimisation logistique, la découverte de médicaments, la finance, ou la simulation de matériaux.
- Correction d'erreurs quantiques : Techniques pour détecter et corriger les erreurs dans les calculs quantiques.
- Cryptographie post-quantique : Techniques de chiffrement résistantes aux attaques des ordinateurs quantiques.
- Cryostat : Équipement permettant de refroidir les qubits à des températures extrêmement basses (proches du zéro absolu, soit -273°C), afin de limiter la décohérence et de maintenir leur état quantique. Ils sont indispensables pour la plupart des technologies quantiques actuelles.

D

- Décohérence : Perte des propriétés quantiques d'un qubit due à son interaction avec l'environnement, ce qui cause des erreurs.
- *Deeptech* : Fruit de la recherche fondamentale, elle repousse les limites de la connaissance et de l'innovation, entraînant des changements industriels, voire sociétaux (comme l'IA).

E

- Électron : Particule élémentaire utilisée dans certains types de qubits (ex. : qubits de spin).
- Électronique de contrôle : Système électronique qui crée et gère les signaux nécessaires pour manipuler les qubits, lire leur état, et corriger les erreurs pendant un calcul quantique.
- État quantique : Description mathématique d'un système quantique (ex. : la valeur d'un qubit).

I

- Informatique quantique : Domaine qui utilise les qubits et les principes quantiques pour traiter l'information.
- Interférence quantique : Phénomène où les probabilités des états quantiques s'additionnent ou s'annulent, utilisé pour amplifier les bonnes réponses dans un calcul.
- Intrication, ou enchevêtrement quantique : Phénomène où deux qubits sont liés : modifier l'un affecte instantanément l'autre, même à distance.

L

- Laser : Outil souvent utilisé pour manipuler les qubits (ex. : ions piégés).

M

- Mécanique quantique : Branche de la physique qui décrit le comportement des particules à l'échelle atomique.
- Mesure quantique : Action qui force un qubit à « choisir » un état (0 ou 1), détruisant sa superposition.
- *Midtech* : technologie intermédiaire (comme l'automobile) où l'innovation est incrémentale et peu susceptible de produire des avancées significatives.

O

- Ordinateur quantique : Machine qui utilise des qubits pour effectuer des calculs, potentiellement plus puissante qu'un ordinateur classique pour certains problèmes.

P

- Parallélisme quantique : Capacité d'un ordinateur quantique à explorer plusieurs solutions simultanément grâce à la superposition.
- Photon : Particule de lumière, utilisée comme qubit dans les ordinateurs quantiques photoniques.
- Porte quantique : Opération de base sur un ou plusieurs qubits, similaire à une porte logique classique (AND, OR, etc.).
- Plateforme quantique : Technologie physique utilisée pour créer des qubits (ex. : supraconducteurs, ions piégés, atomes neutres).
- Processeur quantique : Composant matériel qui contient les qubits et effectue les calculs.

Q

- Qubit : Voir Bit quantique.
- Qubit logique : Unité de calcul quantique formée par plusieurs qubits physiques, conçue pour corriger les erreurs et améliorer la fiabilité des calculs. Un qubit logique peut nécessiter des dizaines ou des centaines de qubits physiques pour fonctionner correctement.
- Quantum : Terme latin signifiant « quantité discrète », utilisé pour décrire les plus petites unités d'énergie ou de matière.

R

- Réseau quantique : Infrastructure permettant de transmettre des informations quantiques entre plusieurs nœuds (ex. : Internet quantique).

S

- Simulateur quantique : Ordinateur quantique spécialisé pour simuler des systèmes quantiques (ex. : molécules).
- Spin : Propriété quantique des particules (ex. : électrons) utilisée pour coder des qubits.
- Superposition quantique : Principe selon lequel un qubit peut être dans plusieurs états à la fois (ex. : 0 et 1 simultanément).
- Supraconducteur : Matériau qui conduit l'électricité sans résistance, utilisé pour fabriquer certains qubits.
- Suprématie quantique : Moment où un ordinateur quantique résout un problème impossible à résoudre par un ordinateur classique en un temps raisonnable.

T

- Technologies habilitantes : Ensemble des outils, méthodes et infrastructures (ex. : cryostats, lasers, logiciels de correction d'erreurs) qui rendent possible le développement et l'exploitation des ordinateurs et capteurs quantiques.

Annexe n° 2 : périmètre de l'enquête

Si l'on se réfère à l'axe E.06 *Sciences et technologies quantiques*[83] de l'appel à projet générique de l'agence nationale de la recherche (ANR), les sciences et technologies quantiques relèvent aussi bien de la recherche fondamentale, du transfert et de l'innovation, que de leurs combinaisons possibles. Elles recouvrent un ou plusieurs des grands axes thématiques suivants :

- la communication quantique vise, entre autres, le développement de réseaux sécurisés par cryptographie quantique. Ceci inclut leurs sous-systèmes (sources, mémoires/répéteurs, détecteurs, etc.), leurs architectures (topologie, protocoles, etc.) et les applications qui en découlent (mise en réseau d'utilisateurs, de processeurs, de capteurs, etc.), ainsi que l'ensemble des usages liés à la distribution d'intrication et d'information quantique ;
- le calcul quantique vise le développement de dispositifs de calcul (processeurs, mémoires, architectures, etc.), quels que soient la plateforme matérielle et le codage de l'information, les algorithmes quantiques, les modèles de calcul, les langages et environnements de programmation, les applications et cas d'usage, les outils de certification et de vérification, les codes de correction d'erreurs, ainsi que l'hybridation HPC-quantique ;
- la simulation quantique consiste à concevoir des systèmes quantiques « modèles », configurables et dont on peut contrôler les spécificités, afin de simuler les propriétés d'autres systèmes quantiques difficiles voire impossibles à constituer. Ces systèmes modèles s'appliquent donc à la mise en œuvre de nouveaux matériaux, de composés physico-chimiques ou de phénomènes physiques complexes issus notamment de la matière condensée, et permettent ainsi de résoudre des problèmes dans d'autres domaines (hautes énergies, chimie, biologie, pharmaceutique, etc.) ;
- les capteurs et la métrologie quantiques visent le développement de systèmes quantiques offrant précision et répétabilité augmentées. Cela inclut donc toutes les plateformes servant le domaine, tels que les systèmes d'imagerie innovants et non-invasifs (notamment pour la biologie et le médical), les senseurs inertiels pour le géo-positionnement et les géosciences, les systèmes photoniques permettant la métrologie des matériaux, les horloges atomiques, les capteurs de champs électromagnétiques, les systèmes optomécaniques, etc.

Le périmètre de la présente enquête est celui du calcul quantique. Le vocabulaire associé à cet axe dans les documents de l'ANR est indiqué ci-dessous lorsqu'il relève de l'informatique quantique, comprise au sens hardware et software :

- [software] algorithmes quantiques ; modèles, logiciels, et environnement de programmation pour le calcul quantique ; correction d'erreur quantique ; mitigation d'erreur ; NISQ ; e-FTQC ; FTQC ; calcul hybride quantique-classique ; méthodes de contrôle et de vérification ; contrôle quantique optimal ; systèmes topologiques ; estimation ; feedback quantique.
- [hardware et plateformes de technologie] : circuits/processeurs quantiques ; portes logiques quantiques ; amplificateurs à la limite quantique ; qubits logiques ; qubits de contrôle ; qubits auxiliaires ; qubits de spin ; qubits semiconducteurs ; qubits supraconducteurs ;

[83] Le CNRS a contribué fortement, à la demande de l'ANR, à redéfinir les contours de cet axe au printemps 2025.

qubits photoniques ; nanotube de carbone ; molécules ; atomes froids ; ions piégés ; systèmes quantiques hybrides ; graphène ; matériaux 2D.

Sont donc exclus de ce périmètre les protocoles et développements en matière de capteurs quantiques, de cryptographie et communications quantiques et de cryptographie post-quantique. En particulier, cette dernière concerne l'étude de l'ensemble des systèmes cryptographiques conçus pour résister aux attaques menées par des ordinateurs quantiques.

Ainsi, si l'avènement prochain des ordinateurs quantiques motive le développement de ce domaine, il n'y a pas à proprement parler de lien avec l'algorithmique quantique. A contrario, la cryptographie quantique, qui exploite les lois de la mécanique quantique (notamment le principe d'incertitude et l'intrication) pour garantir la sécurité des communications, relève du périmètre.

L'enquête retient une approche de filière, cela signifie que l'ensemble des activités de la chaîne de valeur intégrées verticalement sont étudiées. Il s'agit de la formation, du continuum de recherche (de la recherche fondamentale à l'innovation), et du tissu industriel.

L'enquête s'attache exclusivement aux activités civiles, ou avec un caractère dual, et exclut de son périmètre les activités strictement militaires.

Annexe n° 3 : méthode de ventilation des projets

Les projets scientifiques financés par des fonds publics entrant dans le champ de l'enquête ont été répartis en sept catégories distinctes :

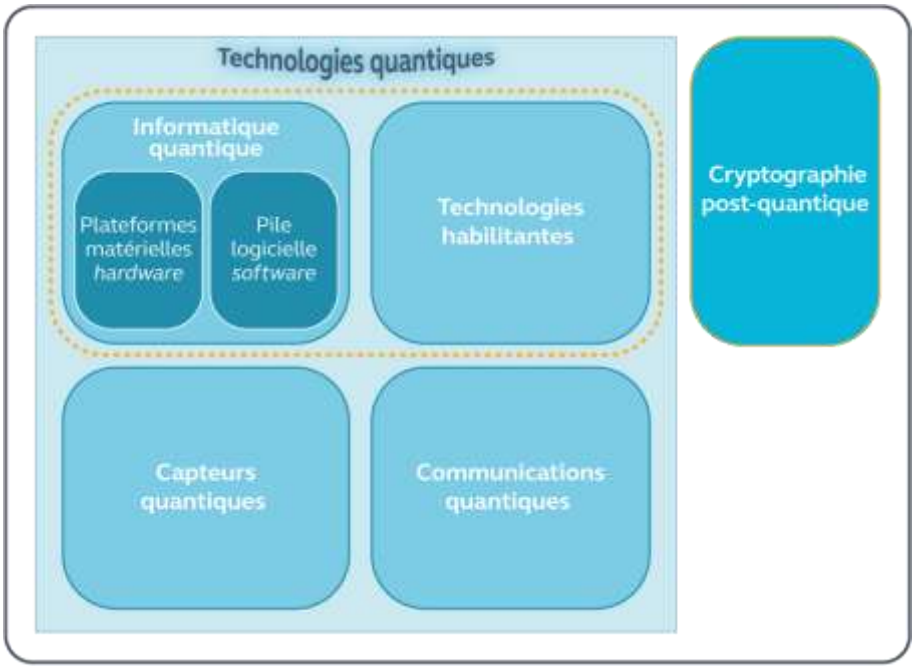
- cinq catégories correspondent aux différentes plateformes de qubits (plateformes photonique, atomes froids, ions piégés, supraconducteurs et qubits de spin) ;
- une catégorie est consacrée à la pile logicielle (*software*) et à l'algorithmique quantique, les cas d'usages et les codes correcteurs d'erreurs ;
- une catégorie couvre les technologies habilitantes.

N'entrent pas dans le champ du contrôle les autres axes de la stratégie nationale quantique : les capteurs quantiques, les télécommunications quantiques ainsi que la cryptographie post-quantique qui constitue un champ disciplinaire séparé, plus proche des mathématiques. Ces catégories distinctes ont été utilisées ponctuellement pour contextualiser le champ de l'enquête. Dans le parangonnage international, ces catégories sont fréquemment utilisées.

À noter que les termes pour caractériser la catégorie informatique quantique ne sont pas encore stabilisés. L'expression calcul quantique, qui désigne la finalité et non le vecteur, est fréquemment employée. Le vocabulaire pour désigner « *hardware* », « *software* » ou les types de plateformes peuvent également varier, de même que pour les technologies habilitantes dont les applications ne sont pas toujours destinées uniquement à des applications pour le calcul quantique.

Le tri effectué pour des projets portant sur de la recherche fondamentale (notamment pour les projets subventionnés par l'ANR ou l'ERC) est encore plus délicat. De par la nature de la recherche fondamentale, il est difficile de prédire les applications précises des recherches en cours. L'articulation a été faite de manière à prédire quelle technologie pourrait bénéficier des avancées effectuées par les différents projets, et susceptibles d'avoir, à terme, des applications en calcul quantique à court et moyen termes.

Schéma n° 5 : typologie utilisée pour l'enquête



Source : Cour des comptes, le périmètre de l'enquête est encadré en rouge

Dans le périmètre de l'enquête les projets ont été regroupés selon les caractéristiques précisées ci-dessous.

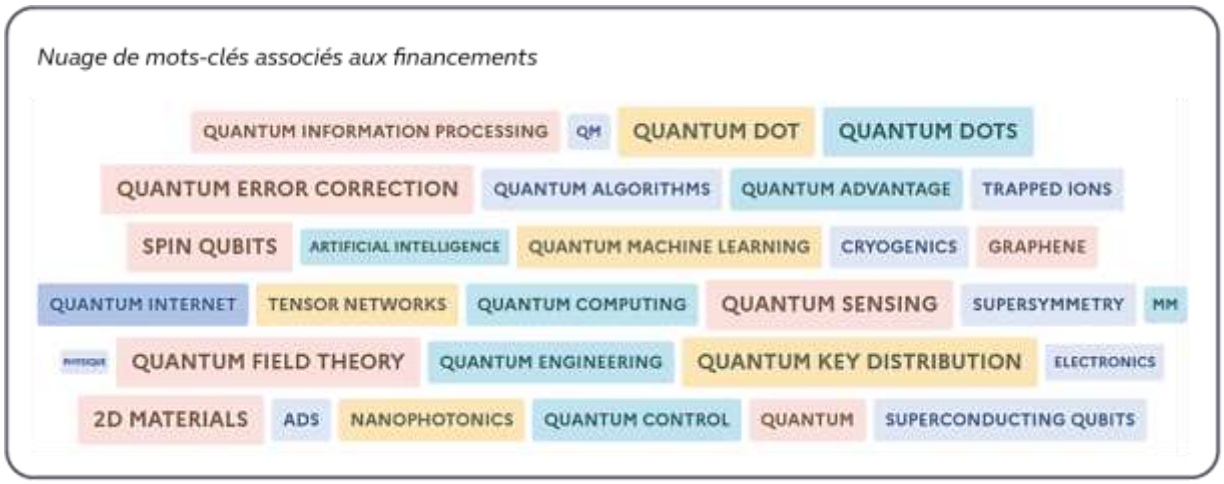
Les différentes plateformes physiques représentent chacune une catégorie, rassemblant l'ensemble des développements liés à la technologie et les variations possibles. Elles incluent notamment les travaux des *startups* et leurs collaborations avec le monde académique ou différents industriels, le développement d'architectures et de codes correcteurs d'erreurs spécifiques. Par souci de simplicité, les qubits topologiques à l'état solide sont regroupés avec les supraconducteurs, et les qubits de spin couvrent un spectre technologique large (graphène, semi-conducteurs, centres NV, etc.).

Relèvent de **la catégorie *software*** l'ensemble des développements en algorithmique quantique théorique et en correction d'erreurs, lorsqu'ils demeurent agnostiques vis-à-vis des plateformes ; le développement d'émulateurs quantiques (supercalculateurs simulant le comportement d'un ordinateur quantique), les logiciels d'hybridation calcul classique, calcul quantique ; les outils de benchmarking nécessaires à l'évaluation comparative des processeurs quantiques, la mise à disposition sur le cloud des machines existantes, ainsi que l'ensemble des cas d'usage et applications pratiques développés par des acteurs académiques ou industriels.

Les technologies habilitantes englobent l'ensemble des techniques indispensables au calcul quantique en dehors des qubits, quelle que soit la plateforme considérée. Elles comprennent notamment les lasers, les cryostats, l'électronique de contrôle et les amplificateurs paramétriques, les équipements nécessaires à la fabrication des puces (salles blanches), ainsi que l'approvisionnement en isotopes rares employés par certaines technologies. Les recherches fondamentales susceptibles d'avoir à terme des applications en calcul quantique (par exemple les détecteurs de photons), mais dont les usages ne sont ni avérés ni développés spécifiquement dans cette perspective, ne sont pas considérés.

Certains projets se situent au croisement de plusieurs catégories. L'arbitrage retenu vise à assurer la meilleure cohérence possible et à regrouper les technologies les plus proches.

Schéma n° 6 : nuage de mots associés aux financements en France dans le calcul quantique



Source : ScanR

Annexe n° 4 : la conception et le fonctionnement de l'ordinateur quantique

Fonctionnement simplifié du calcul quantique et défis techniques de sa conception

Au-delà des applications qui pourraient révolutionner certains domaines de notre société, la fabrication d'un ordinateur quantique constitue un défi technique et expérimental, qui requiert un contrôle inédit de systèmes quantiques microscopiques (atomes, photons, électrons). De plus, les propriétés contre-intuitives de la mécanique quantique rendent d'autant plus difficile la compréhension du calcul quantique.

L'unité de calcul d'un ordinateur classique est le bit, qui peut prendre soit la valeur 0 soit la valeur 1. Grâce au principe de superposition, phénomène fondamental de la mécanique quantique, un système quantique peut exister simultanément dans plusieurs états. Si l'on considère un système quantique pouvant être dans une superposition des états 0 et 1, alors il devient possible d'exploiter cette propriété afin d'effectuer plusieurs calculs simultanément, ce qui a poussé les scientifiques à théoriser des algorithmes quantiques dès les années 1990. Manipuler des états quantiques sur un système unique constitue en soi une prouesse technique du fait de la sensibilité de ces systèmes aux perturbations extérieures (ondes électromagnétiques, température, vibrations …). Or, construire un ordinateur quantique, ce n'est pas contrôler un système quantique unique, mais des dizaines de milliers d'états quantiques, toutes leurs interactions croisées simultanément et extrêmement précisément. Cela passe aussi par la fabrication d'électronique de contrôle pour ces systèmes, et l'intégration dans l'environnement logiciel adéquat.

La construction d'un ordinateur quantique requiert les cinq critères[84] suivants :

- une bonne caractérisation du qubit utilisé : c'est ce qui a conduit à la naissance des différentes plateformes technologiques présentées plus bas ;
- la possibilité de contrôler convenablement les qubits, notamment le fait de savoir les ramener dans un état voulu ;
- un temps de vie de l'état quantique convenable (appelé temps de cohérence) : la fragilité des états quantiques fait que chaque perturbation risque de détruire la superposition et peut ramener le système à un état classique, perdant ainsi tout intérêt ;
- la capacité d'effectuer des portes quantiques universelles et fiables : les portes quantiques sont les opérations élémentaires, analogues au « AND » et « OR » en informatique classique, qui sont la brique élémentaire de n'importe quel algorithme. Cela revient à maîtriser parfaitement les interactions entre qubits. Une fiabilité de 99 % est par exemple insuffisante, car après mille portes, la probabilité de ne pas avoir introduit d'erreurs (donc d'avoir un résultat correct) est de moins de 0,00001 % ;
- enfin, la capacité à mesurer les états des qubits : comme l'information est encodée par un état physique mesurable, seule la lecture de cet état pourra donner le résultat souhaité.

[84] Critères de DiVicenzo, The physical implementation of quantum computation, 2000, DiVicenzo *et al.*

Ainsi, tous ces facteurs contribuent à évaluer les performances d'un ordinateur quantique. Un millier de qubits avec une fidélité des portes supérieure à 99,9 % est le strict minimum requis pour espérer un ordinateur quantique (tout en ayant un temps de cohérence convenable et une capacité à mesurer ces états.

Tout système capable d'être dans deux états peut être théoriquement utilisé pour un ordinateur quantique. À titre d'exemple, le dernier prix Nobel de physique[85] récompense une expérience qui démontre qu'un circuit électrique visible à l'œil nu et donc à l'échelle macroscopique peut montrer les mêmes comportements quantiques que des atomes. C'est ce qui explique la diversité des solutions technologiques actuellement poursuivies.

Plusieurs voies technologiques sont explorées simultanément.

Les différentes technologies de qubits les plus prometteuses, sont présentées succinctement ci-dessous sous l'angle de la performance et des acteurs principaux. Pour des éléments approfondis, l'Académie des technologies a publié le rapport *État de l'art de l'ordinateur quantique tolérant aux fautes – Questions et défis* en mai 2025.

Plateforme des supraconducteurs

Les circuits supraconducteurs sont des circuits microscopiques gravés dans des couches minces de métaux et contrôlés par des signaux électriques. Ces circuits possèdent plusieurs niveaux d'énergie, permettant d'encoder l'information et sont contrôlés par des impulsions électriques. C'est une des technologies les plus avancées et les plus étudiées, avec des acteurs majeurs comme IBM, Google et Rigetti aux États-Unis, IQM en Finlande et Alice & Bob[86] en France. Les fidélités des portes atteignent jusqu'à 99,7 % et les meilleures puces comportent une centaine de qubits. Cependant, ils sont très sensibles aux perturbations et nécessitent une protection rigoureuse contre les rayonnements électromagnétiques, ainsi qu'un placement dans des cryostats à quelques millikelvins. Ces conditions expérimentales limitent actuellement l'augmentation de la taille des systèmes en raison de l'électronique de contrôle et des connexions nécessaires entre l'intérieur et l'extérieur des cryostats et du temps de cohérence limité de ces systèmes. De plus, les processus de fabrications sont assez peu reproductibles conduisant à d'autres contraintes expérimentales.

Plateforme des atomes neutres ou atomes froids

Les atomes neutres encodent l'information dans deux niveaux d'énergie différents, naturellement présents dans les atomes. Ils sont piégés dans des structures bidimensionnelles et refroidis par des lasers puissants. D'autres lasers sont utilisés pour contrôler les interactions entre atomes. Les systèmes actuels les plus avancés peuvent piéger jusqu'à 1000 atomes, pour 256 qubits, et une fiabilité des portes de 99,8 %. L'énergie requise pour de tels dispositifs est relativement raisonnable. Néanmoins, il reste difficile d'envisager de piéger quelques dizaines de milliers d'atomes, comme le requiert l'augmentation du nombre de qubits. De plus, les opérations sont assez lentes et il est fréquent de perdre des atomes pendant les calculs. Les leaders mondiaux dans cette technologie sont les américains QuEra et Atom Computing. En France, la *startup* Pasqal, cofondée par Alain Aspect, développe cette technologie et fait partie des leaders mondiaux.

[85] Attribué en 2025 à Michel Devoret, John Clarke et John Martinis.
[86] Alice & Bob a une technologie un peu différente mais que l'on peut ranger dans la catégorie des supraconducteurs.

Plateforme des ions piégés

Comme le nom de la technologie l'indique, la plateforme des ions piégés encode les deux états dans deux niveaux d'énergie d'ions. Ces ions sont ainsi piégés par des champs électriques et magnétiques et contrôlés par des lasers. Cette plateforme est relativement proche en termes de conception de celle des atomes froids avec des temps de vie de l'état quantique très longs et une fiabilité remarquable des portes à plusieurs qubits (99,9 %). Néanmoins, la possibilité de piégeage de milliers d'ions reste encore un défi expérimental majeur et non démontré, donc les plus gros systèmes sont composés de moins de 100 qubits. Les acteurs mondiaux prédominants sont IonQ et Quantinuum et l'autrichien Alpine Quantum Technologies. C'est l'unique technologie dans le paysage actuel pour laquelle il n'existe aucun acteur français compétitif.

Plateforme photonique

La plateforme photonique est tout à fait particulière car elle encode l'information dans des photons, grains de lumière, qui se déplacent donc à la vitesse de la lumière, et les calculs ne passent pas vraiment par des portes quantiques. Les états sont encodés dans différents états de la lumière, comme sa polarisation par exemple et sont manipulés à travers des dispositifs physiques comme des filtres, des lames semi-réfléchissantes et autres dispositifs optiques. Les qubits photoniques ont l'avantage d'exister à des températures plus élevées et ils sont assez peu sensibles aux perturbations extérieures. Cependant, les photons uniques sont difficiles à émettre et à détecter, et les portes à plusieurs photons sont difficiles à réaliser, avec un fonctionnement probabiliste compliquant l'obtention de résultats. Les meilleurs dispositifs possèdent une centaine de qubits et les acteurs majeurs sont Psi Quantum aux États-Unis, Xanadu au Canada ainsi que le français Quandela.

Plateforme des qubits de spins

La plateforme des qubits de spins est quant à elle la plateforme la plus récente mais n'en demeure pas moins prometteuse. Cette technologie comporte de nombreuses variations (centres NV dans le diamant, nanotubes de carbone, semiconducteurs) et repose sur le fait de piéger des électrons et d'encoder l'information dans les orientations de leur spin (les électrons se comportent comme des aimants avec un pôle nord et un pôle sud, et l'orientation de ce spin encode les différents états). L'avantage de cette technologie repose sur sa scalabilité, car les techniques de fabrication utilisées sont très similaires à ce qui existe actuellement pour les puces de semiconducteurs des ordinateurs classiques. La fidélité des portes est très bonne (supérieures à 99,9 %), mais ces architectures sont sensibles au bruit, nécessitent d'être refroidies à quelques Kelvins et restent pour le moment limitées à la dizaine de qubits. Les acteurs principaux sont Intel et Diraq ; côté français les *startups* C12 et Quobly explorent deux technologies différentes de qubits de spin.

Les normes permettant la comparaison de ces machines à la production artisanale n'existent pas encore.

Les standards permettant de comparer les performances d'ordinateurs aux fonctionnements très différents sont en cours de définition. Ils font l'objet de luttes âpres car chaque technologie souhaite valoriser ses points forts et les imposer comme métrique commune. Ainsi un travail de standardisation est en cours à l'échelle nationale (Programme MetriQs) comme aux échelles européennes et mondiales.

La génération actuelle des ordinateurs quantiques a été qualifiée de NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*) par John Preskill en 2018. Cet acronyme traduit les capacités limitées des ordinateurs actuels. À cela s'oppose l'ère du FTQC (*Fault Tolerant Quantum Computing*), qui désigne des ordinateurs résistants aux fautes, et donc non bruités, capables de réaliser un grand nombre d'opérations sans erreurs, et donc de concrètement entrer dans l'ère de la suprématie quantique. Bien que personne ne puisse prédire quand cet avantage concret se réalisera, les prévisions tablent sur les années 2030.

Annexe n° 5 : échelle des TRL (Technology Readiness Level) - Niveaux de maturité des technologies

TRL	Description
1. Les principes de base ont été observés et décrits	C'est le niveau le plus bas de maturité d'une technologie. On commence à évaluer les applications militaires de la recherche scientifique, par exemple sous la forme de publications analysant les caractéristiques fondamentales de la technologie.
2. Les concepts d'emploi et/ou des propositions d'application ont été formulés	Début de la phase d'invention. À partir de l'observation des principes de base, il devient possible d'envisager des applications pratiques. Ces applications restent potentielles. Il n'y a pas de preuve ni d'analyse détaillée pour les confirmer. On n'en est encore qu'au stade d'études papier.
3. Premier stade de démonstration analytique ou expérimental de fonctions critiques et/ou de certaines caractéristiques.	Lancement d'études analytiques et de travaux de laboratoire concernant la validation de certaines briques élémentaires de la technologie afin de valider concrètement les études prévisionnelles.
4. Validation en environnement de laboratoire de briques élémentaires et/ou de sous-systèmes de base	Les constituants de base de la technologie ont été intégrés, mais sous une forme relativement « peu représentative » d'un système éventuel, par exemple sous forme d'un « maquettage » en laboratoire.
5. Validation en environnement représentatif de briques élémentaires et/ou de sous-systèmes.	La représentativité des sous-systèmes s'accroît nettement. Les briques élémentaires sont intégrées dans un ensemble complet permettant l'essai de la technologie dans un environnement simulé réaliste, par exemple sous forme d'une intégration de laboratoire « très représentative ».
6. Démonstration en environnement représentatif de modèles ou de prototypes d'un système ou d'un sous-système.	On teste, dans un environnement représentatif, un modèle représentatif ou un prototype de système, bien plus complet que ce qui a été testé à l'étape 5, et ceci représente une étape clé de démonstration de maturité d'une technologie, comme par exemple l'essai d'un prototype dans un laboratoire restituant de façon très précise les conditions d'environnement, ou les conditions d'emploi opérationnel.
7. Démonstration d'un système prototype en environnement opérationnel.	Démonstration d'un système prototype conforme au système opérationnel, ou très proche. Représente une forte progression par rapport à l'étape 6, avec la démonstration d'un prototype réel, dans un environnement opérationnel, comme par exemple un véhicule ou un aéronef au banc d'essais. On recueillera à ce stade des informations pour obtenir l'aptitude au soutien de cette technologie.

TRL	**Description**
8. Le système réel complètement réalisé est qualifié par des essais et des démonstrations.	On a prouvé le fonctionnement de la technologie sous sa forme finale et dans les conditions d'emploi attendues. Cette étape est dans la majorité des cas la fin de la démonstration, afin de savoir s'il respecte les spécifications demandées, y compris pour le soutien en service.
9. Le système est qualifié, après son emploi dans le cadre de missions opérationnelles réussies.	Étape d'application de la technologie sous sa forme finale, et en conditions de mission représentatives, telles que celles qui peuvent être rencontrées lors d'essais et d'évaluations opérationnels, et d'essais de fiabilité, ce qui inclut par exemple l'emploi dans des conditions de missions opérationnelles.

Source : ANR, appel à projets « Accompagnement spécifique des travaux de recherches et d'innovation défense : maturation et valorisation », www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/aap/2014/aap-astrid-m-2014

Annexe n° 6 : les cycles de levée de fonds

Les cycles de levée de fonds

Pour financer sa croissance, une entreprise peut recourir à des appels de fonds privés successifs. Ces phases de développement, correspondant à un besoin de financement, ont des noms et des acteurs spécialisés.

La création de l'entreprise

Les fondateurs peuvent faire appel à des proches, parfois à des « *business angels* » ou à des fonds de capital-amorçage spécialisé afin de financer les premières phases de R&D et la preuve de concept.

La phase d'amorçage, ou graine

Elle finance les premières étapes du développement de l'entreprise, y compris l'amélioration du produit, l'acquisition des premiers clients et le développement initial du marché. L'objectif de cette phase est de stabiliser le modèle économique.

La série A, étape critique

À ce stade, l'entreprise souhaite développer son activité commerciale ou diversifier son offre. Elle convainc d'une trajectoire vers la rentabilité à un horizon de moyen terme.

La série B, un changement d'échelle

Lorsque l'entreprise a une croissance continue et qu'il est possible de prédire la situation de l'entreprise à moyen terme, le soutien financier vise à s'ouvrir à l'international ou à améliorer sa productivité. Il y a souvent une certaine continuité des investisseurs avec la précédente levée de fonds.

La série C pour consolider

Les besoins de financement accompagnent le développement de l'entreprise et l'augmentation de sa valorisation. Cela peut recouvrer l'acquisition de concurrent, le développement de nouveaux produits ou l'implantation dans de nouveaux pays.

Les séries D et E : des sources de financements diversifiées

Les entreprises matures disposent de sources complémentaires et alternatives à la levée de fonds en *equity*, à titre d'exemple, la dette bancaire. Leurs besoins recouvrent les mêmes finalités qu'en série C, mais avec une position de leader assumée.

Annexe n° 7 : présentation de la stratégie nationale quantique (2021-2025)

Lancée en 2021 et dotée d'un investissement d'un milliard d'euros jusqu'en 2025, la Stratégie Nationale Quantique vise à positionner la France parmi les leaders mondiaux des technologies quantiques. Cette initiative réunit l'État, les acteurs industriels, les *startups* et les investisseurs afin de construire une filière souveraine et compétitive d'ici 2030.

La stratégie nationale quantique couvre l'ensemble des technologies de la seconde révolution quantique — calcul, capteurs, communications et cryptographie post-quantiques, ainsi que les technologies habilitantes — afin de développer des systèmes plus performants, plus sûrs et à fort potentiel industriel.

Les principaux objectifs sont :

- la création de quatre *startups* de 1 Md€ de chiffre d'affaires et 50 % de part de marché ;
- le développement de deux ordinateurs quantiques universels de plus de 100 qubits logiques : depuis fin 2023, les avancées scientifiques ont démontré qu'un chemin vers l'ordinateur quantique universel (Fault-Tolerant Quantum Computer) est possible. Disposer à minima de deux fournisseurs évitera le risque de monopole et favoriser la compétition et l'innovation. Atteindre les 100 qubits est une étape avant d'atteindre les 2000 qubits qui transformeront la cryptographie, la chimie et l'optimisation industrielle ;
- la France, après avoir fait émerger des champions du hardware quantique, doit désormais investir dans le logiciel pour transformer ses atouts scientifiques en dix *startups* mondiales capables de capter 30 % du marché et d'assurer son leadership économique et technologique.
- développer 100 cas d'usages industriels avancés — dont dix démontrant un véritable avantage quantique — afin de capitaliser sur les premières preuves de performance du calcul quantique et d'affirmer son leadership technologique dans les secteurs clés de l'industrie.
- faire émerger trois leaders industriels dans les technologies habilitantes — isotopes stables, cryostats à dilution et interconnect quantique — afin de garantir son autonomie technologique et de renforcer sa position stratégique dans le développement des systèmes quantiques.

Le plan d'action de la stratégie nationale quantique repose sur une approche complète couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur. Il vise à :

- renforcer la R&D, le transfert technologique, l'industrialisation et les coopérations internationales ;
- faciliter l'accès aux marchés grâce à la commande publique, au soutien aux usages et à l'export ;
- mobiliser des capitaux de confiance à travers les fonds spécialisés, Tibi, le FEI et des partenariats avec des fonds souverains ;
- former et attirer les talents en développant des programmes de formation, des partenariats universitaires internationaux et des dispositifs d'attractivité ;
- protéger les actifs stratégiques par des mesures de sécurité économique, de contrôle des investissements étrangers et des exportations.

Les investissements publics à la fin de l'année 2025 sont de :

- 300 M€ dans la recherche ;
- 600 M€ dans les infrastructures de calcul ;
- 100 M€ dans la formation ;
- 100 M€ dans les technologies habilitantes.

Fin 2025, les réalisations du plan quantique étaient :

- la création de 20 *startups* ;
- la levée de plus de 600 M€ de fonds ;
- l'atteinte des 20 % de part de marchés mondiales pour les *startups* françaises ;
- la création en France de 15 % des emplois créés dans le monde ;
- l'augmentation de 30 % des thèses sur le sujet et de 40 % des étudiants en master dans ce domaine.

Annexe n° 8 : synthèse des financements régionaux recensés

La plupart des régions ne tiennent pas de suivi précis des financements liés au quantique. Le tableau ci-dessous n'est donc pas exhaustif mais recense les régions ayant fournis les éléments liés à leurs financements régionaux et européens.

Tableau n° 5 : financements régionaux liés à la stratégie quantique (en €)

	Grand Est	Hauts-de-France	Bretagne
2020	600 000 €	Non connu (NC)	NC
2021	NC	126 450 €	100 000 €
2022	100 000 €	521 164 €	110 000 €
2023	127 000 €	167 508 €	148 000 €
2024	NC	328 234 €	295 000 €
2025	1 200 000 €[87]	204 300 €	200 000 €

Source : Cour des comptes

Tableau n° 6 : financements européens perçus par les régions pour la stratégie quantique (en €)

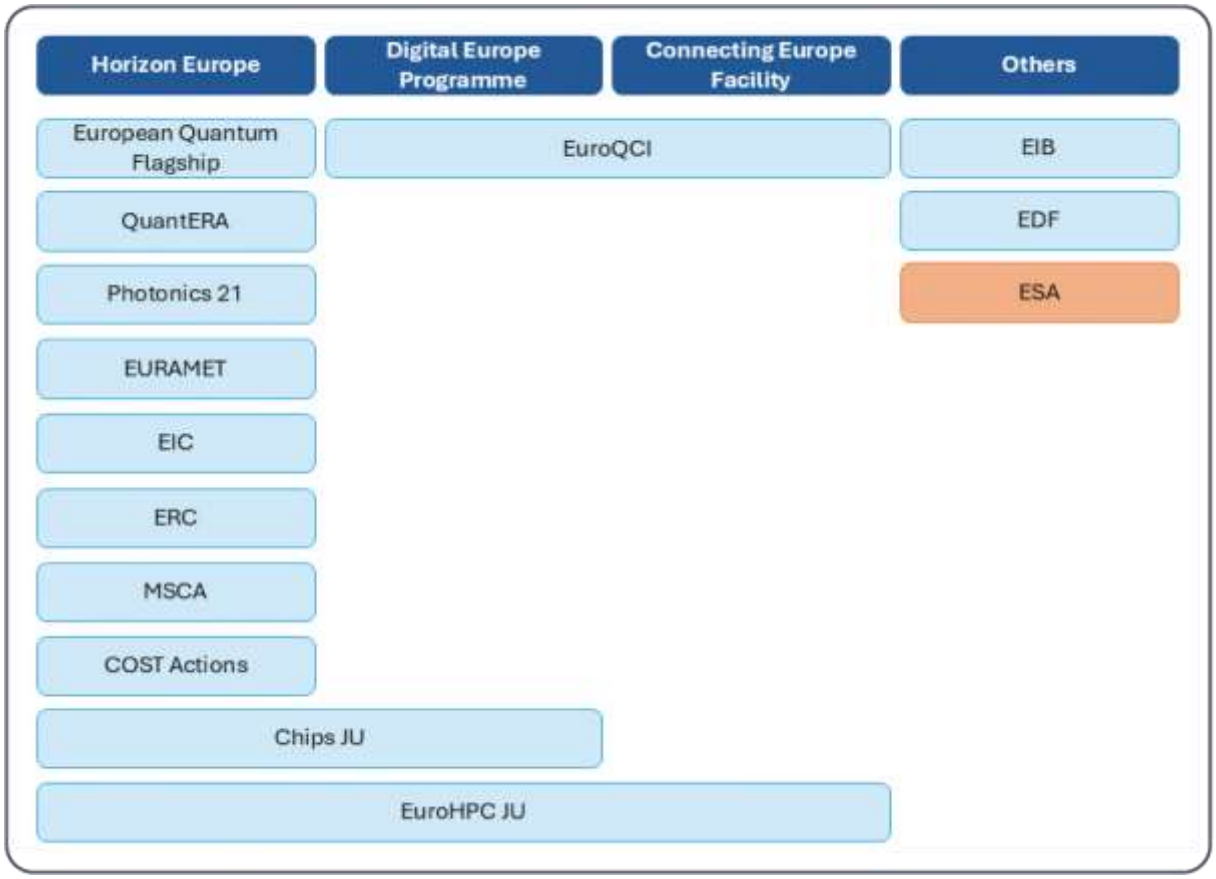
	Auvergne-Rhône Alpes[88]	Bretagne[89]	Grand Est[90]	Hauts-de-France[91]
2020	NC	80 000 €	NC	NC
2021	NC	NC	NC	NC
2022	NC	120 000 €	NC	NC
2023	NC	NC	NC	NC
2024	NC	315 000 €	NC	NC
2025	1 500 000 €	390 000 €	760 444 €	99 210 €

Source : Cour des comptes

[87] Dont budget pour la maison du quantique
[88] Financements FEDER
[89] Financements Horizon Europe
[90] Financements Interreg
[91] Financements Interreg

Annexe n° 9 : les fonds de l'Union européenne

Schéma n° 7 : panorama des fonds de l'Union européenne pour la R&D en technologies quantiques



Source : JRC

Annexe n° 10 : les programmes liés à la formation

Trois projets pilotes ont été précurseurs du programme QuanTEdu-France. Ils ont été financés par l'ANR pour un montant de subvention de 1 033 000 € chacun, pour une durée de 4 ans (du 1er septembre 2021 au 31 août 2025).

Le projet de soutien à la formation Quantum Paris-Saclay (FQPS)

Il réunit un consortium de cinq établissements : l'université Paris-Saclay en tant que coordinateur, l'École Polytechnique de Palaiseau, Telecom Paris, ainsi que la délégation régionale Ile-de-France Sud du CNRS et le CEA qui intègrent le consortium fin 2022 pour des raisons de facilité d'attribution des cofinancements des contrats doctoraux.

Le projet FQPS PC « Soutien à la formation aux technologies quantiques - Paris Centre »

Ce consortium est coordonné par l'Université Paris Sciences et Lettres, en partenariat avec ENS-PSL, Sorbonne Université et l'université de Paris Cité. Leurs objectifs étaient triples :

- déploiement de nouveaux programmes de formation de techniciens (Bac+2, Bac+3) ou sensibilisation aux technologies quantiques dans des programmes existants ;
- création ou modification de formations de niveau Bac+5 (deux formations en master 1 et quatre en master 2) ;
- participer à la formation doctorale : 75,5 % des financements ont permis de financer des contrats doctoraux (l'équivalent de 6,5 contrats doctoraux) répartis en 54 % de thèses en calcul quantique et 46 % en technologies habilitantes.

Au terme du projet, les actions mises en place se pérennisent, d'abord en raison de la montée en puissance du programme national QuanTEdu France, la poursuite des activités dans le cadre de PCQT[92], des projets de recherche pour les contrats doctoraux et les thèses CIFRE en partenariat avec les acteurs socio-économiques, mais aussi par la pérennisation des recrutements initiés en technologie quantique (concours de professeurs des universités, maître de conférence, directeur de recherche, chargés de recherche, recrutement de chaires de professeurs junior, etc.) Le financement, au terme du projet, a permis d'atteindre en grande partie les objectifs prévus. Certaines formations proposées n'ont cependant pas toutes atteint leur objectif en termes de nombre d'étudiants (école thématique 2023 proposé par Sorbonne université : 50 étudiants en 2024-2025 pour un objectif de 80 ; 14 et 15 étudiants en 2024-2025 respectivement pour un master 1 et un master 2 de physique – quantum engineering à ENS-PSL pour un objectif de 20, et 26 pour un master 1 à Sorbonne université pour un objectif de 35).

Le programme QuantForm-UGA

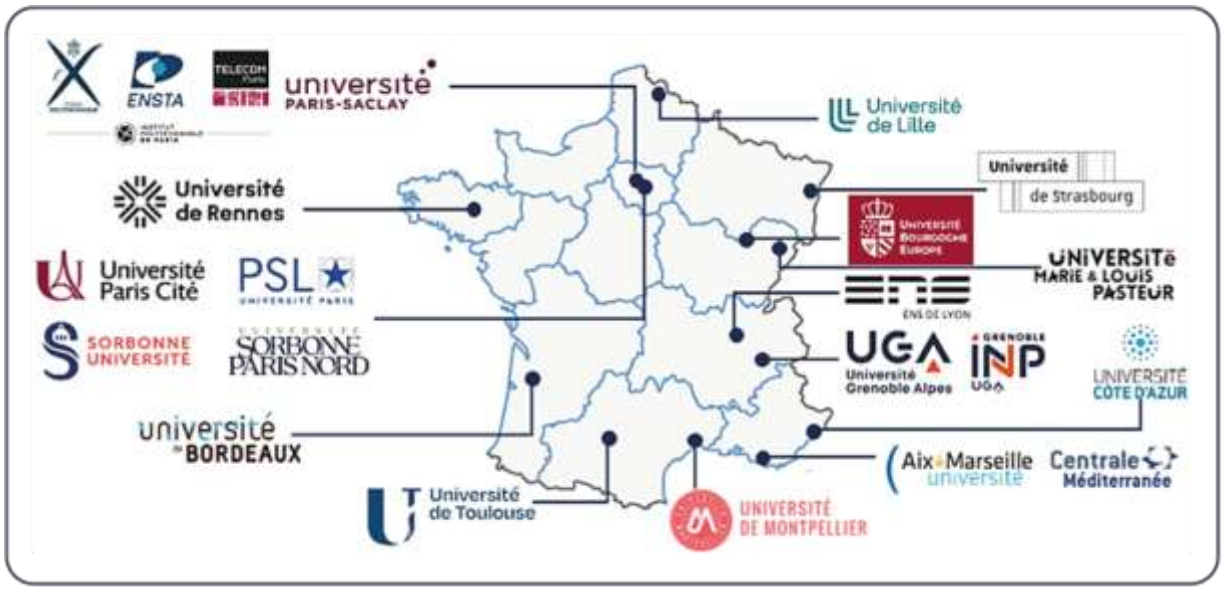
Ce programme, débuté le 1er octobre 2021 pour une durée de 48 mois, (prolongation de trois mois) avait pour ambition d'accélérer la structuration des offres de formation en technologies quantiques à l'Université Grenoble Alpes (UGA) identifiée comme site pilote,

[92] PCQT (Paris Centre for Quantum Technologies) est un consortium créé en janvier 2021, il a évolué en juillet 2023 avec la signature d'une convention de consortium entre cinq universités parisiennes (Sorbonne Université (coordinateur), Université PSL, Université Paris Cité, Université Sorbonne Paris Nord, CY Cergy Paris Université), le CNRS et l'INRIA.

avec Paris Saclay et Paris Centre. Son objectif principal et transversal étant de rendre lisible, visible et attractive la formation quantique à Grenoble, dans un contexte national et européen en pleine structuration, en axant ses objectifs sur la formation doctorale, l'attractivité et le rayonnement des écoles grenobloises. Ainsi, sur la période de quatre ans du programme, six contrats doctoraux ont été financés, cinq bourses de mobilité sortante au niveau M1/2A ont été attribuées en sortie de master 1 ou en deuxième année d'école d'ingénieurs, des dispositifs de bourses de mobilité et d'excellence (21 mobilités entrantes/sortantes ont été financées. Le budget restant (297 000 € hors frais de gestion) est affecté à la mise en place et le soutien à des actions de formation au niveau master, écoles d'ingénieurs et licence avec deux objectifs prioritaires affichés dans le projet : le soutien à l'ouverture d'un nouveau programme de master 2 « Quantum Information Quantum Engineering » (QIQE) et l'accélération du démarrage du programme thématique « Quantum » de la Graduate School de l'UGA. De nombreuses actions sont pérennisées, notamment celles relatives aux formations qui ont été intégrées dans les maquettes de formation de manière structurelle.

Le programme QuanTEdu-France

Schéma n° 8 : 23 établissements partenaires de QuanTEdu-France



Source : QuanTEdu-France

Annexe n° 11 : le programme *HQI*

Le programme *HQI* est consacré à l'hybridation de calculateurs quantiques et classiques haute-performance. Il est composé de deux axes majeurs : un axe Acquisition et un axe Recherche et Développement, tous deux dotés de 36 M€ dans le cadre de la stratégie nationale quantique. Le premier axe, piloté par Genci, vise à l'acquisition de deux prototypes d'ordinateurs quantiques (livrés par Pasqal et Quandela) dans le cadre commun EuroQCS et leur intégration dans le très grand centre de calcul (TGCC) administré par le CEA. Le deuxième axe, piloté par l'INRIA et le CEA regroupe les activités de recherche en calcul quantique, la création d'une plateforme afin d'accéder aux machines pour les premiers usages industriels et académiques. L'objectif du programme est de commencer la réflexion autour du calcul hybride, de surmonter les premiers écueils techniques, de permettre l'accès aux machines à un certain nombre d'acteurs français, et développer l'écosystème logiciel adapté à une telle hybridation, pour ensuite explorer différents cas d'usages et applications réelles.

HQI offre également aux fabricants de QPU, notamment Pasqal et Quandela, mais potentiellement aussi les autres acteurs français plus tard, une opportunité unique d'être confrontés à un environnement d'exploitation réaliste et bienveillant, sans renoncer à une certaine proximité avec les équipes de R&D des centres de calculs. Ce projet peut en quelque sorte être vu comme une première étape vers l'industrialisation voulue par PROQCIMA. Cette mise en situation progressive permet aux industriels d'adapter leurs technologies aux exigences d'un centre de calcul et de la livraison de machines, tout en conservant une forme d'autonomie dans leur feuille de route. À terme, cette maturité acquise dans un cadre coopératif rendra plus crédible leur intégration dans d'autres centres de calcul, possiblement moins spécialisés ou moins familiers des contraintes spécifiques du quantique. HQI joue ainsi un rôle de tremplin et de catalyseur pour la structuration d'un écosystème technologique.

Afin d'accompagner au mieux les communautés dans leur prise en main de la plateforme HQI, les partenaires se sont impliqués dans la mise en place du réseau des Maisons du Quantique, et l'acquisition permet la mise en place des premiers benchmarks comparatifs entre les différentes technologies, objectif du programme *Metriqs*. De plus, l'accès académique permet la mise en place de travaux dirigés utilisant cette nouvelle plateforme (à travers *QuantEdu*) et donc s'articule parfaitement au cœur de la stratégie nationale.

Le volet *HQI-Acquisition*, et plus globalement le programme HQI, s'inscrivent aussi dans une vision européenne avec la mise en place du projet *EuroHPC*, premier embryon d'une infrastructure pan-européenne hybride (Calcul haute performance et quantique), promue par le Quantum Flagship, *EuroHPC* et un rassemblement des centres de calcul européens (TGCC en France, Julich en Allemagne …) sous l'égide d'une entreprise commune. Les achats de machines quantiques sont ainsi cofinancés à 50 % par l'UE et 50 % par le pays, conduisant à une bonne coordination.

Annexe n° 12 : le programme *MetriQs*

Le programme *MetriQs* vise le développement de référentiels de mesure adaptés aux technologies quantiques et aux technologies habilitantes ainsi que l'évaluation de ces technologies émergentes et des différentes plateformes de calcul quantique. Il est coordonné par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). Ce programme comprend deux parties complémentaires, avec le projet *MetriQs-DEV-France*, doté de 9 M€, qui constitue la partie opérationnelle principale et qui concentre des projets de R&D collaboratifs sur le quantique : consacrés aux outils de mesure et à la caractérisation de composants, à travers le projet *MOQUA* et la mise en place de benchmarks applicatifs pour le calcul quantique, par l'intermédiaire du projet BACQS et la promotion à large échelle, notamment sur le plan de la normalisation internationale.

Le projet *MetriQs-HUB-France*, doté de 4 M€, prévoit le déploiement d'une plateforme de métrologie quantique sur la base des compétences et d'équipement du Réseau national de la métrologie française. La plateforme sera déployée dans la perspective de construire une infrastructure nationale regroupant des installations accréditées pour la caractérisation et l'évaluation des technologies quantiques.

Ces programmes s'inscrivent donc parfaitement dans la stratégie. En effet, les fournisseurs de ces nouvelles technologies quantiques et les utilisateurs potentiels expriment un très fort besoin de métrologie pour leur procurer une mesure fiable et objective des caractéristiques et des performances de leurs produits, leur permettre une comparaison sur une même base, partagée entre tous. L'analyse comparative des performances, qui évalue les capacités absolues et relatives de différentes plates-formes ou systèmes, s'est avérée utile pour évaluer d'autres technologies (benchmark IA, benchmark HPC). L'analyse comparative des performances peut accélérer les progrès de l'informatique quantique. La clé est de concevoir des benchmarks utiles, évolutifs et complets. Il s'agit également de soutenir l'établissement de la filière industrielle française et de promouvoir l'avantage concurrentiel des entreprises françaises du domaine dans la durée, dans un contexte de forte compétition internationale.

Dans l'objectif d'un déploiement à grande échelle, le besoin de référentiels de mesure partagés et objectifs est donc critique. Il est tout autant indispensable pour les fournisseurs de technologies quantiques concurrents de pouvoir comparer les technologies entre elles, d'évaluer leurs performances objectivement, sans biais. Cela permettra d'assainir la compétition et d'évaluer objectivement les différentes solutions technologiques pour répondre aux besoins des utilisateurs, de développer les usages sur une base objective et finalement de rétablir la crédibilité du domaine, en atténuant les effets secondaires du battage médiatique.

Annexe n° 13 : le programme *Q-Loop*

Le programme *Q-Loop*, pleinement intégré dans la stratégie nationale quantique porte l'ambition d'identifier les moyens de passage à l'échelle des chaînes de contrôle et lecture des qubits à l'état solide. Ce projet est réuni autour d'un consortium d'acteurs complémentaires, fédérés autour de l'Institut de recherche technologique (IRT) Nanoelectronique, afin d'accélérer l'avènement de l'ordinateur quantique. Le programme *Q-Loop* agit pour préparer le passage à l'échelle des systèmes de contrôle des qubits et définir des technologies de contrôle-commande de l'ordinateur quantique.

Le programme Q-Loop se concentre sur l'ensemble des briques technologiques situées autour de la puce de qubits : câblage, électronique de contrôle et de lecture, intégration système, architectures matérielles, ainsi que sur le défi central de la correction d'erreurs quantiques en temps réel. Q-Loop s'appuie sur les approches d'intégration issues de la microélectronique industrielle, en les adaptant aux contraintes spécifiques du calcul quantique, en particulier le fonctionnement en environnement cryogénique.

Porté par l'IRT Nanoelec, consortium associant acteurs publics et privés, le programme est placé sous le pilotage du CEA, chef de file, et associe notamment le CNRS, INRIA (correction d'erreurs quantiques), Grenoble INP–UGA (cryoélectronique), Minalogic, ainsi que des industriels majeurs tels que STMicroelectronics et Siemens, aux côtés d'acteurs émergents du secteur quantique. De nouveaux partenaires industriels ont également intégré l'IRT à l'occasion du lancement de Q-Loop, et le programme demeure ouvert à d'autres contributions industrielles.

D'une durée de six ans, *Q-loop* représente un effort global de 65 M€, dont 40 M€ financés au titre de France 2030, conditionnés à un apport industriel de 25 M€ (avec une contribution de 3,5 M€ prévue pour 2025). Il s'inscrit dans un cadre de partenariat public-privé structuré, reposant sur des mécanismes de gouvernance et de suivi exigeants : convention d'aide entre le CEA et l'ANR, *reporting* technique et financier, conseil scientifique spécifique, suivi régulier auprès de la direction de l'IRT, du CEA et du SGPI dans le cadre de la stratégie nationale.

Le programme s'articule étroitement avec les autres dispositifs de la stratégie quantique. Il bénéficie indirectement à l'ensemble des *startups* développant des qubits à l'état solide (notamment C12, Alice & Bob et Quobly), ainsi qu'aux projets du PEPR sur des thématiques connexes. Les travaux sur l'électronique cryogénique trouvent également des synergies avec des initiatives telles que CRYONEXT. À terme, les briques développées dans Q-Loop ont vocation à soutenir le passage à l'échelle de systèmes plus mûrs et à s'intégrer dans des programmes applicatifs tels que HQI, notamment à travers les interfaces de programmation liées à la correction d'erreurs quantiques.

En fédérant l'écosystème industriel et académique autour des verrous technologiques du contrôle-commande quantique, Q-Loop constitue ainsi un programme structurant pour la compétitivité et la souveraineté française dans le domaine des technologies quantiques.

L'intégralité du rapport
« Le soutien à l'informatique quantique : premier bilan et perspectives »
et sa synthèse sont disponibles sur le site internet de la Cour des comptes :
www.ccomptes.fr

Cour des comptes
13, rue Cambon
75100 Paris Cedex 01
Tél. : 01 42 98 95 00
www.ccomptes.fr