



QUANTIQUE

**Des premières innovations se concrétisent
dans un secteur à haut potentiel en plein essor**

QUANTIQUE

Des premières innovations se concrétisent dans un secteur à haut potentiel en plein essor

Domaine méconnu, surtout développé dans les centres de recherche et peu présent au sein des entreprises, le quantique opère pourtant sa mue avec les avancées technologiques. Mis en lumière par les géants du numérique américains, le secteur accélère et dévoile son potentiel alors que de premières applications émergent au niveau industriel. Calcul, modélisation, capteurs, cryptographie... Le quantique ouvre la voie à une multitude d'innovations et à des gains de productivité parfois gigantesques.

Trois phénomènes principaux expliquent ce changement. Les progrès scientifiques révèlent l'étendue des marchés concernés par le quantique ainsi que les risques qu'il fait peser en matière de cybersécurité, poussant les États à soutenir la filière de façon vigoureuse. Attirés par son potentiel disruptif, les investisseurs privés se montrent quant à eux de moins en moins frileux face aux technologies de rupture et s'engagent auprès des acteurs émergents. Un écosystème de start-up et de laboratoires se constitue, s'appuyant sur des chercheurs-entrepreneurs et les transferts de technologie pour se lancer dans le secteur.

Dans ce contexte, la France dispose d'atouts pour se positionner parmi les leaders mondiaux du quantique. Entre la qualité de sa recherche, encore récompensée par un prix Nobel en 2022, ses grands groupes de technologie et un tissu de start-up explorant une variété de segments, le pays affiche un dynamisme certain dans le domaine. Confirmer cet avantage nécessitera notamment plus d'expérimentations des entreprises françaises pour identifier des cas d'usage, alors que ces dernières restent encore peu offensives sur le sujet.



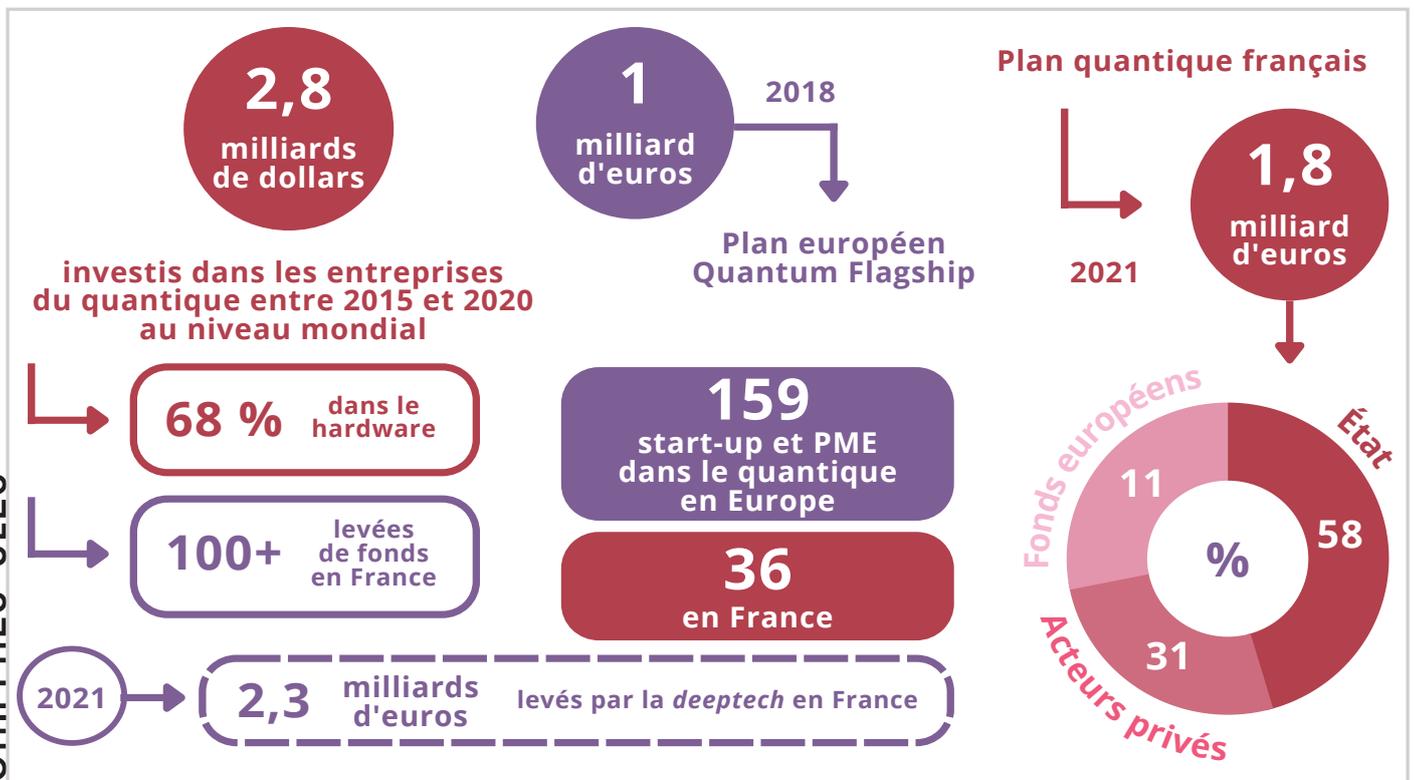
DANS CE DOSSIER

POINTS-CLÉS ET ENJEUX	4
UN SECTEUR EN PHASE DE R&D AUX PROMESSES COLOSSALES	8
Une révolution attendue dans de nombreux domaines	8
Plusieurs technologies en lice pour créer les ordinateurs quantiques	9
Des enjeux majeurs de souveraineté poussent les États à investir massivement.....	10
L'écosystème se structure et obtient la confiance des investisseurs privés.....	15
Le secteur s'organise par des rachats et des partenariats entre acteurs	18
Au manque de personnel qualifié s'ajoutent des défis particuliers pour l'Europe.....	19
UNE COURSE À LA SUPRÉMATIE QUANTIQUE INITIÉE PAR LES FABRICANTS NORD-AMÉRICAINS	20
De multiples projets aux résultats incertains, voire controversés	20
Google, IBM, Honeywell : trois stratégies pour se positionner dans le quantique	22
Des start-up américaines et canadiennes aux moyens financiers considérables	24
GROUPE DU NUMÉRIQUE ET INDUSTRIELS FRANÇAIS INVESTISSENT LE SECTEUR	25
Un tissu d'entreprises hexagonales présentes dans une variété de segments	25
Atos se positionne dans les services et les supercalculateurs hybrides	26
Thales renforce sa place de spécialiste des capteurs et de la cryptographie.....	27
De nombreux secteurs s'intéressent au quantique et conçoivent des cas d'usage	29
LES START-UP CHERCHENT À GRANDIR	30
Un riche écosystème de jeunes pousses, dépendant de la recherche	30
Le hardware attise l'innovation	31
Anticiper sur le software et ses multiples débouchés	33
À la recherche de financements plus conséquents	35
Amorcer la monétisation en investissant le monde professionnel	37
FORCES EN PRÉSENCE : LES START-UP FRANÇAISES ACTIVES DANS LE QUANTIQUE	39
LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE	40
LEXIQUE	42
SOURCES UTILISÉES	43

POINTS-CLÉS

Ce qu'il faut retenir

CHIFFRES-CLÉS

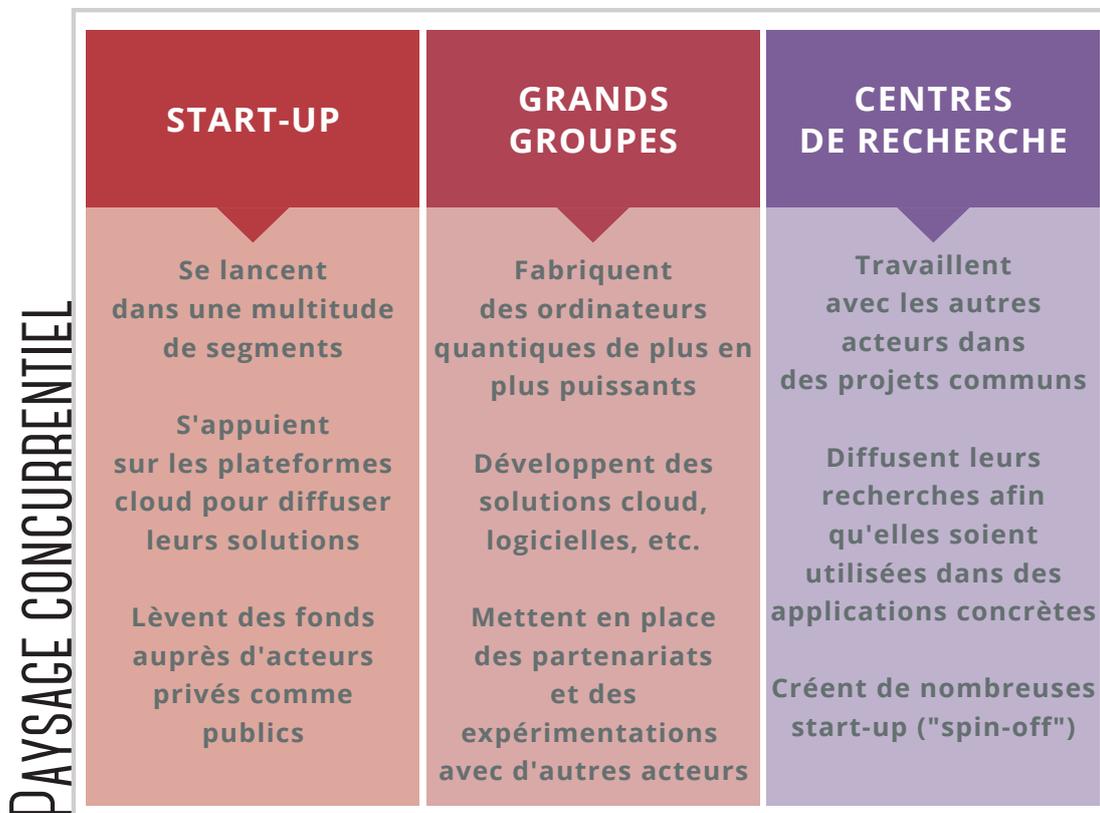


MOTEURS

PROGRÈS TECHNOLOGIQUES	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des capacités des ordinateurs quantiques • Émergence de nombreuses technologies quantiques différentes • Innovations dans les technologies habilitantes • Émulation liée à la concurrence et au potentiel de croissance
INITIATIVES DES ACTEURS PRIVÉS	<ul style="list-style-type: none"> • Grands groupes déjà présents dans le secteur • Start-up lancées par des chercheurs : transferts de technologies facilités • Variété de positionnements possibles
SOUTIEN GOUVERNEMENTAL	<ul style="list-style-type: none"> • Prise de conscience du caractère stratégique du quantique • Programmes de financement de montants importants • Plans supplémentaires pour la <i>deeptech</i>, la cybersécurité... • Excellence de la recherche européenne dans le domaine
ÉCOSYSTÈME EN CONSTRUCTION	<ul style="list-style-type: none"> • Intérêt croissant des investisseurs privés • Multiples partenariats entre acteurs • Expérimentations menées par des utilisateurs potentiels • Mise à disposition de plateformes quantiques open source

POINTS-CLÉS

Ce qu'il faut retenir



FREINS ET DÉFIS



Quel équilibre entre innovation radicale mais lointaine et rentabilité immédiate ?

Les géants américains du numérique ainsi que certaines start-up misent sur **le développement d'ordinateurs quantiques les plus universels possibles**. Innovation de rupture, elle apporterait en effet un succès certain à celui qui parviendrait à créer une telle machine, et conférerait un avantage décisif à ces grands acteurs sur l'ensemble de leurs marchés. **Le chemin se révèle cependant encore long avant l'apparition d'un ordinateur quantique universel**, le plus probable demeurant l'émergence à moyen terme de machines spécialisées. Ce pari nécessite donc un apport colossal en capitaux : si les grands groupes disposent de ressources suffisantes, les start-up doivent quant à elles **lever régulièrement des fonds pour se permettre un tel investissement**. Sauf à maîtriser une technologie nouvelle plus performante, **le segment hardware de l'informatique quantique semble déjà suffisamment encombré** et n'apparaît plus attractif pour de nouveaux entrants.

Alors que certains redoutent un "hiver quantique", soit le gel des investissements faute de résultats concrets, une autre approche, plus prudente et graduelle, peut s'incarner dans **le développement**

de solutions hybrides, en particulier au niveau des logiciels. Le NISQ (*noisy intermediate-scale quantum*) permet ainsi de combiner les avantages du quantique, notamment une plus grande puissance de calcul, **avec des infrastructures informatiques traditionnelles**. La multiplication des expérimentations au sein des entreprises va conduire à l'émergence de nombreux cas d'usage, le quantique pouvant alors proposer **des améliorations aux solutions existantes de façon incrémentale**. Certains segments comme les capteurs ou la cryptographie semblent par ailleurs plus avancés et donc permettre une commercialisation plus rapide des solutions quantiques.

L'incertitude quant aux technologies qui parviendront à s'imposer incite en outre à rester agnostique. Chacune d'elles pouvant s'avérer plus performante que les autres pour une problématique particulière, il convient de **rester agile en fonction des avancées scientifiques**. Se focaliser sur une seule technologie peut se montrer payant grâce au gain de spécialisation, mais aussi plus risqué.

Trouver le modèle économique adéquat pour se positionner

Une multitude d'opportunités s'offrent aux nouveaux entrants dans le quantique. **La diversité des segments, des technologies habilitantes et des clients futurs** potentiellement concernés représente une chance pour se positionner de façon différenciante. La vente d'ordinateurs quantiques semble aujourd'hui **un segment risqué tant la concurrence y sera rude**, en particulier venant d'acteurs de taille conséquente. Développant leurs propres technologies ou agissant **potentiellement en tant qu'intégrateurs** de solutions globales, ils disposent également d'un réseau de clients établis et d'une force commerciale importante. **Le coût élevé de telles machines** réduit par ailleurs la clientèle potentielle. Dans ce domaine, l'externalisation des capacités conduit à une logique de "quantique en tant que service". La spécialisation des technologies et des machines peut ici aboutir à **une spécialisation des offreurs de solutions quantiques cloud** : l'absence d'ordinateurs quantiques universels limite mécaniquement la clientèle pouvant être ciblée.

Les acteurs émergents du quantique peuvent par ailleurs se développer par le biais d'**une stratégie de sous-traitance pour le compte d'autres entreprises** du quantique. En amont, ces dernières ont besoin de pièces industrielles ou de services spécifiques, issus de technologies telles que la cryogénie ou la photonique. En aval, des applications de modélisation ou autres solutions logicielles peuvent être **intégrées dans des offres globales**, en partenariat avec des acteurs disposant de la puissance de calcul nécessaire.

Au niveau des plateformes, les grands groupes du numérique se sont positionnés et agglomèrent les offres des différents acteurs du quantique. **Déjà présents voire dominants** dans les solutions cloud classiques, ils voient dans la distribution des offres quantiques un relais de croissance additionnel évident.

Encore relativement peu investi mais également peu financé, **le segment du logiciel spécialisé** présente par ailleurs de nombreuses opportunités pour les nouveaux entrants.

UN SECTEUR EN PHASE DE R&D AUX PROMESSES COLOSSALES

Une révolution attendue dans de nombreux domaines

Des applications variées...

Thématique peu connue du grand public, le quantique a fait momentanément irruption dans l'actualité fin 2022 avec l'obtention du prix Nobel de physique par le Français Alain Aspect. Ce domaine de recherche et ses déclinaisons en informatique et en cryptographie présente pourtant **un potentiel technologique gigantesque**, parfois qualifié de révolutionnaire. L'application de principes de la physique quantique dans le monde informatique pourrait en effet aboutir à **des bouleversements dans une multitude de domaines**, de l'environnement à la santé en passant par les communications et l'assurance. La création d'ordinateurs quantiques, **des milliards de milliards de fois plus puissants que les machines actuelles**, permettrait une vitesse de calcul sans commune mesure avec les capacités disponibles aujourd'hui. Avec le développement de logiciels dédiés, ces technologies pourraient permettre de concevoir de nouveaux médicaments molécule par molécule, d'établir des communications instantanées et intraquables ou encore de modéliser des systèmes complexes afin de les optimiser ou de prédire les dysfonctionnements. L'informatique quantique génère également **son lot d'inquiétudes, en particulier au sujet de la cybersécurité**. "Un ordinateur quantique sera en capacité demain de casser nos algorithmes de cryptographie à clé publique", alertait fin 2022 le dirigeant de la start-up CryptoNext Security, Florent Grosmaître, dans les colonnes d'*IT for Business*. "Or, cette cryptographie est partout : que ce soit sur un site web sécurisé, pour réaliser un paiement, pour utiliser une messagerie de type Whatsapp ou Signal (...). L'impact de la menace quantique va entraîner **une véritable révolution de la cybersécurité**."

...mais encore lointaines

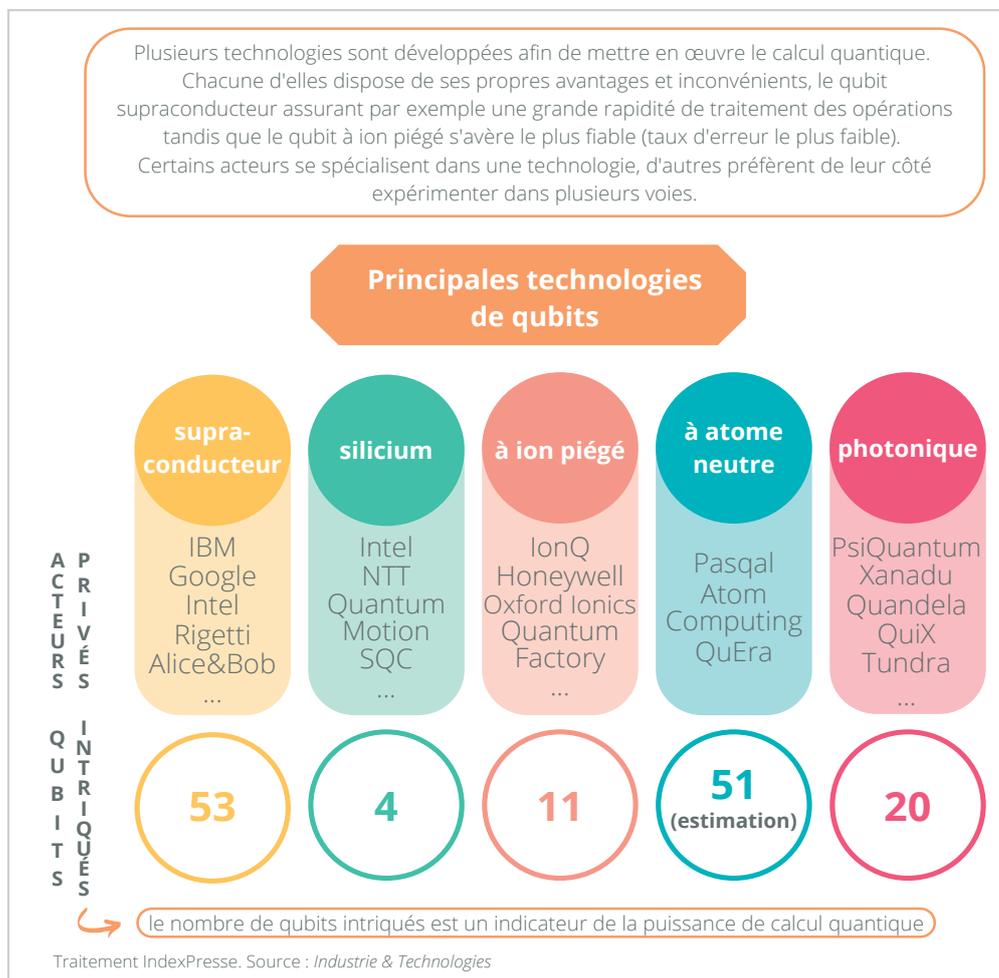
La recherche en informatique quantique date du début des années 1980, avec les premiers prototypes développés à l'aube du XXI^{ème} siècle. L'accélération actuelle du secteur tient à **la possibilité de parvenir à créer des machines à usage industriel**. D'ici la fin de la décennie, des ordinateurs quantiques pourraient ainsi être mis en service, tandis que **des solutions basées sur des logiciels ou des capteurs sont déjà proposées ou en voie de l'être** par certains acteurs. Le segment de la cryptographie s'avère quant à lui plus avancé dans le domaine et s'intéresse au post-quantique. **L'accroissement de la puissance de calcul nécessaire pour atteindre la "suprématie quantique"**, soit la supériorité de cette technologie sur toute machine recourant à l'informatique classique, se révèle toutefois **extrêmement complexe à mettre en œuvre**. La nécessité de maintenir la machine à une température proche du zéro absolu (- 273°C), la décohérence (perte de la caractéristique quantique et risque d'erreur de calcul accru) et sa survenue rapide demeurent **des obstacles majeurs à la réalisation rapide d'une technologie quantique fiable** et appliquée à l'échelle industrielle. Les entreprises positionnées dans le secteur ou utilisatrices de ces solutions ont pour l'instant recours à **une version hybride, baptisée NISQ (noisy intermediate-scale quantum)**. Basée sur une combinaison du quantique et de l'informatique classique, elle permet de répondre à des besoins encore modestes mais **accélère et rend plus progressive la diffusion des innovations** dans le domaine. Le développement d'ordinateurs quantiques universels reste pour l'instant hors d'atteinte pour des besoins nécessitant une puissance conséquente, et **la spécialisation des machines** semble demeurer la règle.

Un marché encore difficile à évaluer

Du fait de son caractère encore émergent, le marché de l'informatique quantique reste complexe à mesurer. La définition même de son périmètre s'avère périlleuse, compte tenu des multiples applications potentielles non-déterminées. Certains cabinets d'études de marché ont toutefois donné des ordres de grandeur, Hyperion Research estimant ainsi le marché mondial à 320 millions de dollars en 2020. Ce dernier devrait atteindre 830 millions à l'horizon 2024. Pour Marketandmarkets, le marché s'élevait à 470 millions de dollars en 2021 et pourrait se hisser à 1,7 milliard en 2026.



Plusieurs technologies en lice pour créer les ordinateurs quantiques



Des enjeux majeurs de souveraineté poussent les États à investir massivement

Le quantique, un domaine hautement stratégique

Identifiée comme cruciale par un certain nombre d'États, la maîtrise de la technologie quantique fait l'objet d'une concurrence mondiale tant ses enjeux semblent considérables.

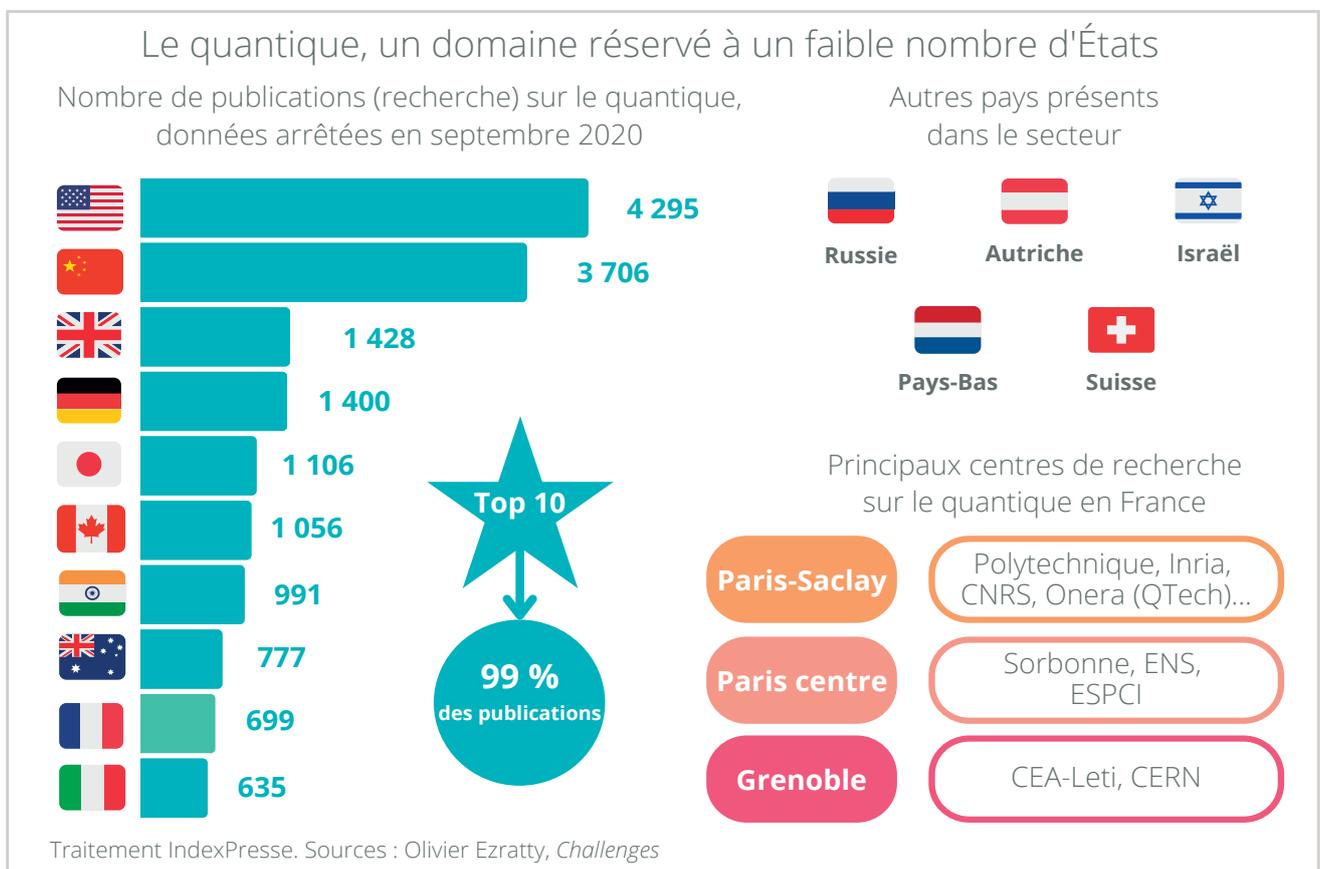
- **Un bouleversement dans les questions sécuritaires**

La capacité de la cryptographie quantique à déchiffrer les systèmes actuels de protection des données représente une menace majeure en termes de cybersécurité. Le quantique peut en outre permettre d'effectuer des communications

quasi-intraçables et impossible à espionner sans être détecté. Ces différentes caractéristiques pourraient offrir un avantage militaire décisif à une puissance disposant de la technologie quantique. À l'inverse, ne pas détenir de capacités dans le domaine constituerait un réel danger pour les intérêts fondamentaux du pays.

- **Le risque d'un déclassement économique**

Les États n'ayant pas développé de capacités quantiques suffisantes pourraient se voir dépasser sur le plan économique par les puissances maîtrisant ce domaine. "Si un pays est exclu de cette technologie, sa compétitivité sera fortement pénalisée", soulignait mi-2021 dans *Chal-*



UN SECTEUR EN PHASE DE R&D AUX PROMESSES COLOSSALES

lenges l'expert Cyril Allouche, responsable de la R&D technologies quantiques chez Atos. Ce phénomène s'applique également aux acteurs de l'industrie, qui doivent réussir à intégrer la technologie quantique dans leur processus d'innovation. "Si cet ordinateur quantique permet à Tesla de commercialiser avec deux ans d'avance la batterie électrique du futur, c'est fichu pour les constructeurs européens", indiquait Cyril Allouche.

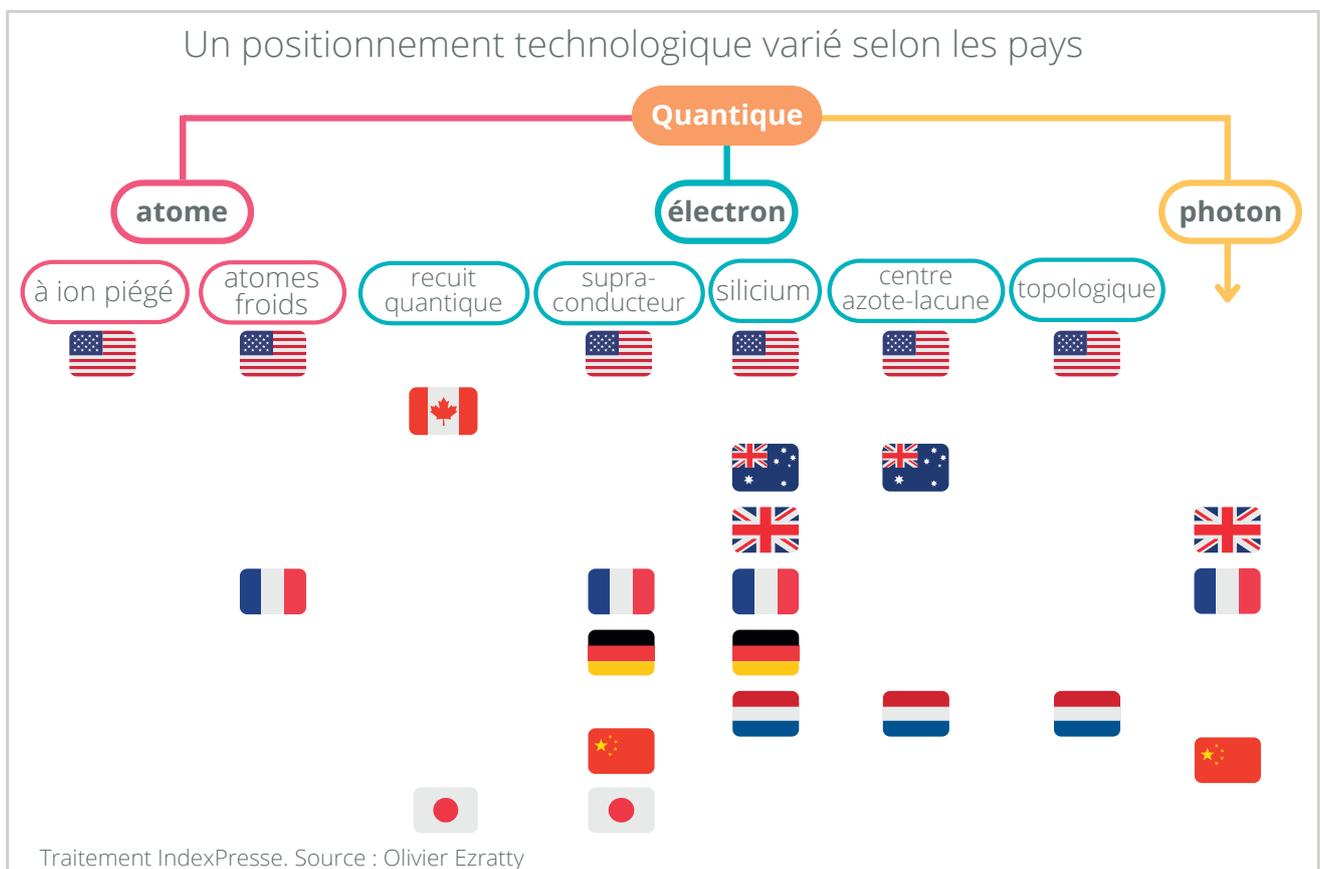
- **Un effort spécifique dans la recherche**

Peu de pays disposent actuellement de centres de recherche, publics ou privés, dédiés au domaine quantique : le magazine *Challenges* en dénombrait une quinzaine en 2021. Parmi eux figurent les grandes puissances économiques ou technologiques comme les États-Unis, la Chine, la Russie, l'Inde ou encore le Japon. Plusieurs États européens (France, Allemagne, Italie...) mènent des recherches en informatique quantique, ainsi que d'autres pays comme l'Australie et Israël.

S'il constitue un indicateur quant aux capacités de recherche du pays, le nombre de publications n'est toutefois pas suffisant. Celles de la Chine et de l'Inde présentent par exemple un faible nombre de citations, en comparaison de celles des pays européens ou des États-Unis. Ces derniers se positionnent par ailleurs dans une grande variété de technologies, alors que certains pays (Chine, Japon, Australie...) se révèlent bien plus spécialisés. Intervenant dans quatre catégories, la France apparaît bien placée en termes de recherche dans le quantique.

- **Des programmes de financement majeurs**

Souhaitant acquérir une maîtrise technologique, voire prendre l'avantage dans le domaine, les États ont engagé des plans d'investissement conséquents dans le secteur. Ces derniers démontrent la volonté politique de s'engager pour le secteur ; leurs montants réels doivent toutefois être considérés avec précaution.



UN SECTEUR EN PHASE DE R&D AUX PROMESSES COLOSSALES

En étalant les dépenses dans le temps, la durée des programmes peut fortement influencer l'envergure des montants effectivement investis, rendant plus complexes les comparaisons entre pays. Les plans dédiés au quantique n'échappent pas en outre aux effets d'annonce et peuvent afficher un budget supérieur à la réalité. D'autres au contraire ne vont pas intégrer certaines dépenses tenues secrètes (dans le domaine militaire notamment), ce qui peut minorer l'investissement réel consenti.

Avec plus de deux milliards de dollars consacrés au quantique (hors fonds privés), les États-Unis semblent les mieux positionnés en termes de financement. "Ils ont très vite identifié le quantique comme une technologie duale, à la fois militaire et civile, ce qui leur a permis de débloquer des fonds de la Darpa [agence d'innovation de défense américaine]", expliquait en 2021 la députée Paula Forteza, à l'origine d'un rapport parlementaire sur le sujet. La Chine, le Royaume-Uni ou encore la France font également partie des pays soutenant le plus le secteur quantique.

La France et l'Union européenne soutiennent fortement le secteur

Le domaine du quantique bénéficie en Europe et en France de programmes spécifiques, qui se sont accélérés ces dernières années. Il a toutefois été soutenu de façon bien plus précoce, en particulier au sein de plans dédiés aux technologies émergentes et à la *deeptech* (innovation radicale).

- **L'UE se mobilise en faveur du quantique**

Un plan d'investissement de 550 millions d'euros avait été lancé en 1999 par l'Union. Baptisé FET (*future & emerging technologies*), il était destiné aux technologies les plus novatrices.

En 2018, l'UE a mis en place un programme spécifiquement destiné au quantique : le Quantum Flagship. Doté d'un milliard d'euros, il doit s'étaler sur une période de dix ans. Une première tranche de 135 millions d'euros avait été allouée lors de son lancement, finançant une vingtaine de projets.

De multiples plans de financement du quantique lancés par les États



Traitement IndexPresse. Source : Olivier Ezratty

UN SECTEUR EN PHASE DE R&D AUX PROMESSES COLOSSALES

Des fonds de l'initiative Digital Europe, pilotée par la Commission européenne, devraient également financer des projets dans le domaine quantique (réseau de communication, supercalculateur).

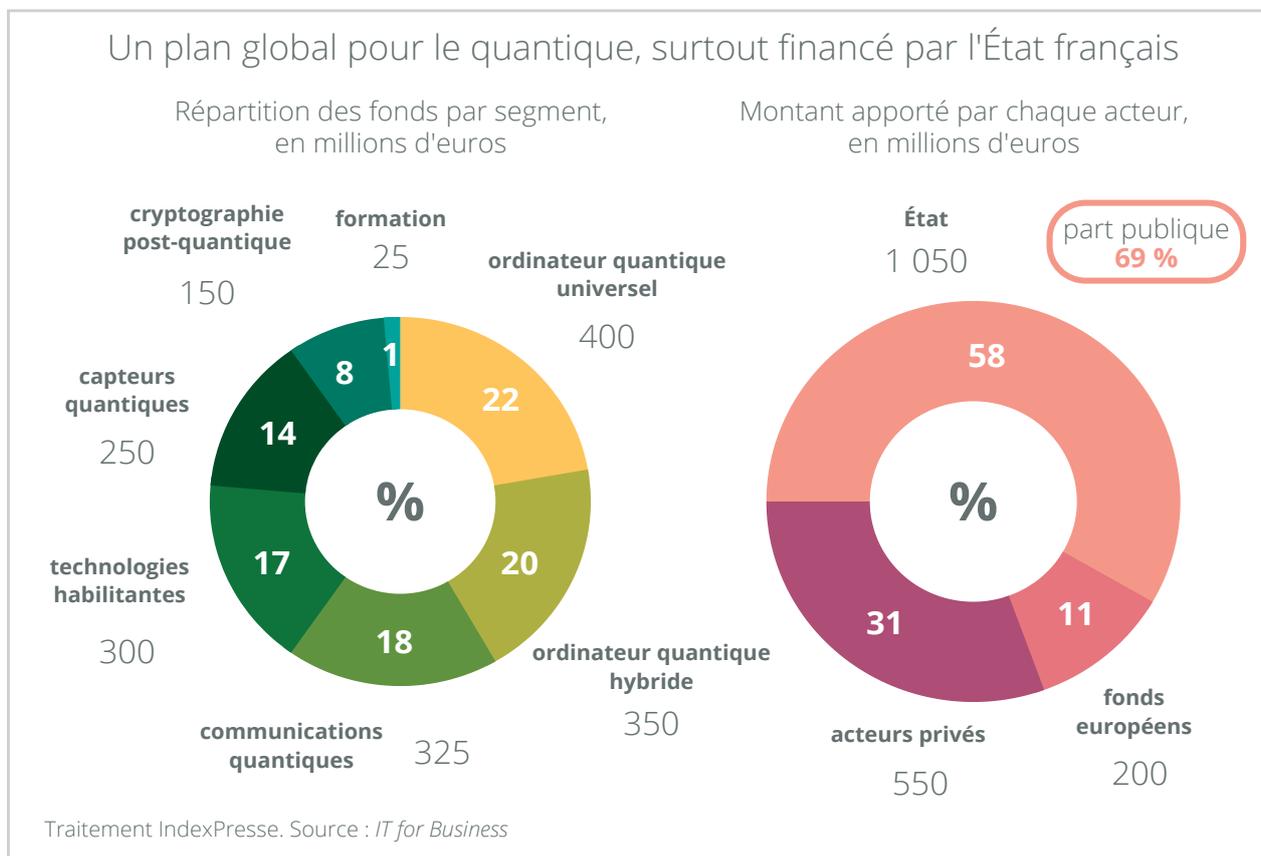
En avril 2021, la Commission européenne a sélectionné le consortium QSAFE (*Quantum Network System Architecture for Europe*), visant à développer la future infrastructure européenne de communication quantique. Réunissant des industriels et des opérateurs télécom tels que Thales, Deutsche Telekom et Telefonica et mené par Airbus, il a rendu une première étude préliminaire fin 2021 pour la mise en place de ce réseau.

- **Un plan français salué par la filière**

Début 2021, la France a annoncé un programme de soutien au secteur du quantique doté de 1,8 milliard d'euros, dont un peu plus d'un milliard versé par l'État et 200 millions d'euros issus de crédits européens. Prévu pour une durée de cinq ans, il hisse l'effort financier public à 200 mil-

lions d'euros par an, plaçant la France en troisième position au niveau mondial dans ce domaine d'après *Industrie & Technologies*. Si son report de six mois du fait de la pandémie de Covid-19 a été regretté (le plan était prêt depuis mai 2020), son envergure a satisfait la filière hexagonale. Le plan quantique soutient ainsi l'ensemble des technologies développées dans le secteur, et apporte également des financements aux technologies habilitantes. Ces dernières, telles que les lasers, la cryogénie ou les isotopes stables, sont nécessaires à la mise en œuvre des technologies quantiques. Un volet dédié à la formation fait aussi partie du plan gouvernemental. Son objectif s'avère en outre de renforcer les liens entre le monde de la recherche, les industriels établis et les acteurs émergents (start-up).

Considéré comme particulièrement sensible, le secteur fait par ailleurs l'objet d'un suivi attentif. L'État pourrait ainsi intervenir si nécessaire via le décret sur le contrôle des investissements étrangers "pour s'assurer que [les acteurs français] ne sont pas rachetés par des acteurs étrangers".



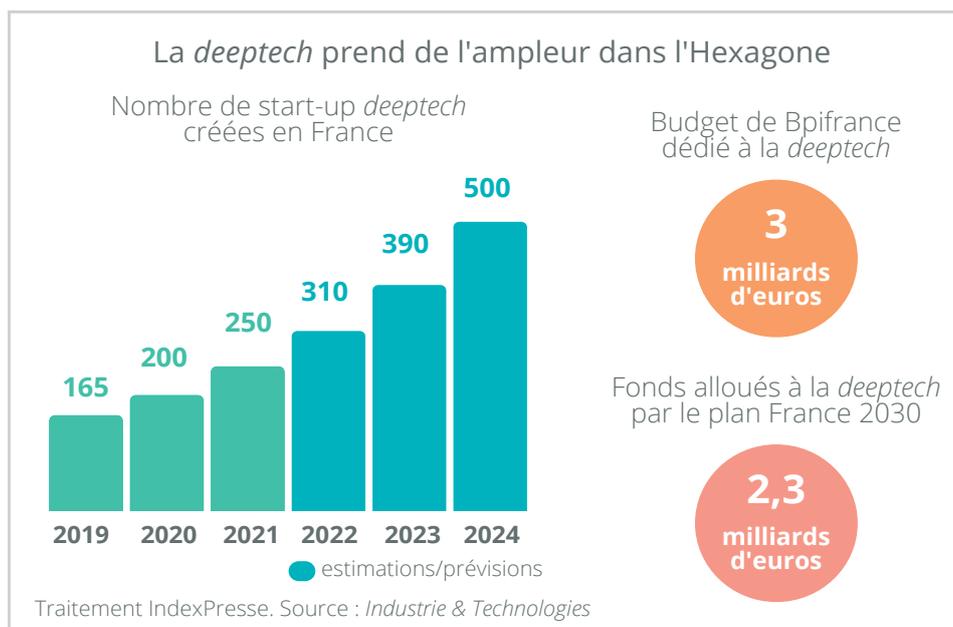
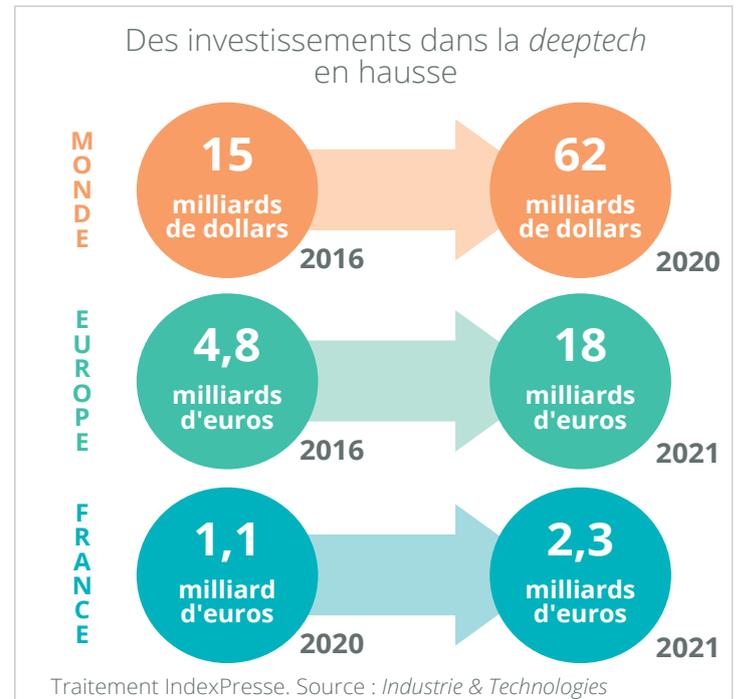
UN SECTEUR EN PHASE DE R&D AUX PROMESSES COLOSSALES

La France a par ailleurs soutenu le secteur quantique dans le cadre plus général de la *deeptech*. Rassemblant un grand nombre de secteurs, elle est définie selon trois points par le directeur général délégué à l'innovation du CNRS, Jean-Luc Moullet :

- un lien étroit avec la recherche fondamentale
- une technologie de rupture
- un temps de développement assez long (cinq à sept ans en moyenne).

Depuis 2019, le fonds public Bpifrance dispose d'un budget de 3 milliards d'euros dédié à la *deeptech*. Il vise un objectif de dix licornes (start-up valorisées plus d'un milliard d'euros) à l'horizon 2025. Bpifrance finance environ 90 % des start-up françaises de la *deeptech* et y a investi 569 millions d'euros en 2021, un montant en hausse de 80 % par rapport à 2020.

Dans le cadre du plan France 2030, un objectif d'une centaine de sites industriels *deeptech* supplémentaires par an a été fixé pour l'année 2030. Le pays en comptait 102 fin 2022 d'après Bpifrance. Une enveloppe de 2,3 milliards d'euros a été allouée pour servir cet objectif.



L'écosystème se structure et obtient la confiance des investisseurs privés

Une dynamique entrepreneuriale certaine

Le secteur du quantique se développe simultanément dans plusieurs zones du globe, à commencer par l'Amérique du Nord et l'Europe. La France apparaît comme un État majeur dans le domaine.

- **Un rythme soutenu de créations de start-up**

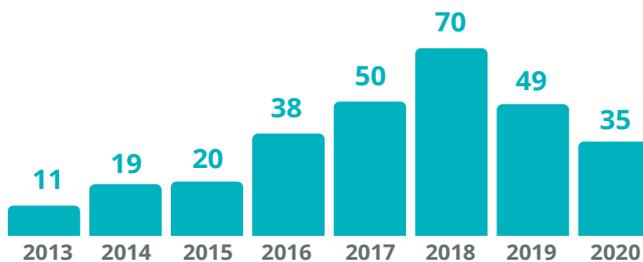
Le nombre de sociétés positionnées dans le quantique s'est fortement accru au niveau mondial à partir de 2014. Le lancement de nouvelles entreprises s'est amplifié avec un doublement du rythme de créations plusieurs années de suite, le tissu entrepreneurial ayant quadruplé de taille entre 2014 et 2020.

- **L'Europe fait jeu égal avec l'Amérique du Nord en nombre d'acteurs**

Prise dans son ensemble, l'Europe dispose d'à peu près autant de sociétés dans le quantique que l'Amérique du Nord. Les États-Unis restent le pays avec le plus d'acteurs dans le secteur, suivis du Royaume-Uni et du Canada. Parmi les pays européens, l'Allemagne et la France font la course en tête. Une spécificité des sociétés européennes du quantique tient dans leur positionnement : elles s'avèrent nombreuses dans les technologies habilitantes, comme les lasers et la cryogénie. Leurs homologues nord-américaines ont davantage ciblé le segment de l'informatique quantique, et sont également plus nombreuses dans les capteurs quantiques.

Un écosystème européen et français de taille significative

Créations de start-up et de PME dans le quantique au niveau mondial



≈ 50 % de l'écosystème nord-américain se positionne dans l'informatique quantique

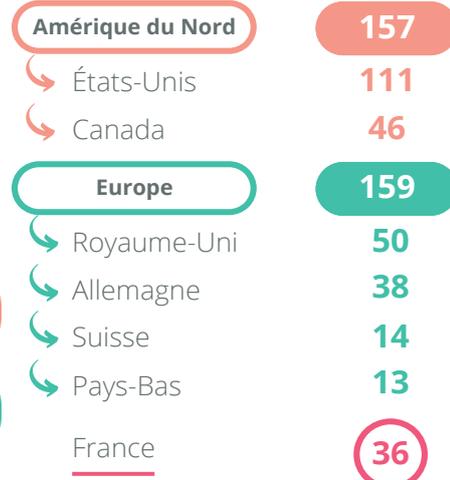
≈ 40 % de l'écosystème européen se positionne dans les technologies habilitantes

entre 2015 et 2021, en France

91 levées de fonds dans l'informatique quantique

17 levées de fonds dans la cryptographie post-quantique

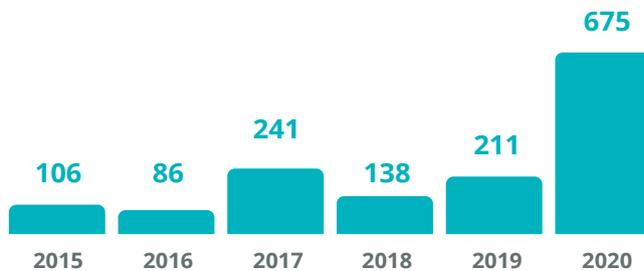
Nombre de start-up et de PME dans le quantique, en août 2021



Traitement IndexPresse. Sources : Industrie & Technologies, Olivier Ezratty

L'accélération des investissements fait émerger un écosystème conséquent

Investissements en capital dans les entreprises du quantique, en millions de dollars

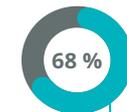


2,8 milliards de dollars

cumul jusqu'en août 2021

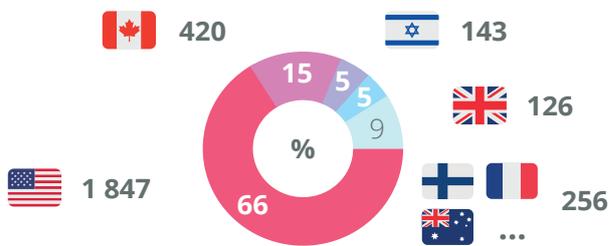
moins de 10 opérations en 2016

plus de 35 opérations en 2020

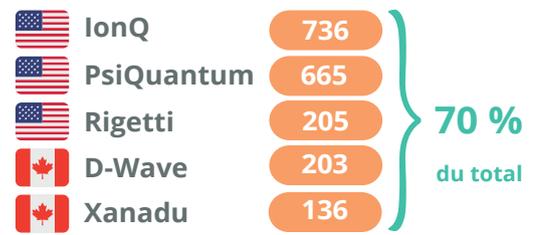


68 % part des fonds alloués au matériel (reste : logiciel) entre 2015 et 2020

Répartition des fonds levés par pays, en millions de dollars (données arrêtées en août 2021)



Principales levées de fonds effectuées jusqu'en août 2021, en millions de dollars



Traitement IndexPresse. Sources : *Industrie & Technologies*, Olivier Ezratty, BCG

Les investisseurs permettent le décollage du marché

Après un démarrage timide, le secteur du quantique parvient à présent à lever des sommes conséquentes auprès des acteurs privés. Le financement se révèle toutefois concentré sur quelques entreprises nord-américaines. Grâce notamment à la qualité de la recherche européenne, les acteurs du Vieux Continent réussissent à se développer avec des financements bien inférieurs.

- **Une accélération récente des levées de fonds**

Le secteur a connu une première vague de financements entre 2015 et 2019, période durant laquelle les montants levés se sont durablement hissés au-delà de 100 millions de dollars par an. Le nombre d'opérations s'est lui aussi fortement accru, passant de moins de 10 en 2015 à une trentaine en 2019.

Les années 2020 et 2021 constituent une seconde phase d'accélération avec une croissance exponentielle des investissements. Ces derniers ont triplé entre 2019 et 2020, et ont au moins doublé en 2021. À l'été, les montants levés dépassaient déjà le cumul des années 2015 à 2020.

En France, plus d'une centaine d'opérations de financement ont été effectuées sur la période 2015-2021, majoritairement dans l'informatique quantique.

- **Des financements inégalement répartis**

Les États-Unis comptent pour les deux tiers des fonds levés par les sociétés du quantique. Cette part monte à plus de 80 % en ajoutant le Canada. La majorité des pays se partagent seulement 9 % des fonds. Cette répartition inégale se manifeste également aux États-Unis, où trois entreprises concentrent 87 % des financements américain du secteur. Avec les deux sociétés canadiennes les mieux financées, elles représentent 70 % du total des fonds levés pour le quantique dans le monde.

Des structures pour favoriser l'émergence de l'écosystème

Le secteur quantique se dote d'organisations spécialisées afin de soutenir la coopération entre les acteurs, leur visibilité auprès des décideurs politiques, ainsi que le financement des jeunes pousses. Certaines d'entre elles ont été créées en France tandis que d'autres présentent un profil européen. Le fonds d'investissement Quantonation, seul fonds français spécialiste du quantique et l'un des rares au niveau mondial, affiche toutefois une envergure internationale avec des participations prises dans une multitude d'entreprises non-françaises. Des initiatives plus anciennes comme les Satt (sociétés d'accélération du transfert de technologies) participent aussi activement au dynamisme du secteur.

- **Quantonation, principal fonds spécialisé dans le quantique au niveau mondial**

Lancé en 2018, Quantonation se présente à la fois comme un fonds d'investissement et comme un start-up studio, pouvant créer de jeunes sociétés avec des entrepreneurs ou des chercheurs. Il est parvenu à l'été 2022 à rassembler 91 millions d'euros, soit le double de l'objectif initial. Il a pu compter sur le soutien du groupe Thales, de la société de capital-risque britannique Draper Esprit ou encore du *family office* Alpha Blue Ocean. Une première marche avait été atteinte avec l'organisation d'un tour de table de 20 millions d'euros par la société d'investissement Audacia, fondée par Charles Beigbeder, également cofondateur de Quantonation. Le fonds est notamment entré au capital de Pasqal, dont le cofondateur, Christophe Jurczak, a aussi participé au lancement de Quantonation. Ce dernier a multiplié les investissements :

- CryptoNext Security (France)
- Quantum Benchmark (Canada)
- Kets Quantum Security (Royaume-Uni)
- Qnami (Suisse)
- Qconnect (États-Unis)
- Qphox (Pays-Bas)...

Quantonation constitue l'un des rares fonds dans le monde spécifiquement positionné sur le quan-

tique. La société canadienne Quantum Valley Investments se focalise elle aussi sur les start-up du quantique. Elle est dotée d'une capacité financière de 100 millions de dollars. D'autres fonds, davantage axés *deeptech*, investissent dans le quantique comme dans d'autres domaines technologiques. C'est notamment le cas de Quantum Ventures, de Summer Capital ou encore de Phys-tech Ventures.

LE LAB QUANTIQUE, UN ORGANISME POUR FÉDÉRER L'ÉCOSYSTÈME FRANÇAIS

Cette association, fondée en 2018 par Quantonation et Bpifrance, vise à promouvoir le quantique et à favoriser les interactions entre le monde de la recherche, l'industrie et la finance. Il produit divers contenus sur le sujet et organise des rencontres entre entrepreneurs du quantique, français et étrangers.

LE RÉSEAU EUROPÉEN QUANTUM COMMUNITY NETWORK

Établi par la Commission européenne, ce réseau fédère de nombreux chercheurs dans le domaine du quantique au niveau du continent. Son objectif est de faciliter la diffusion de l'information et l'articulation entre les initiatives nationales et les projets européens.

LA FÉDÉRATION EUROPÉENNE QUANTUM INDUSTRY CONSORTIUM

En coordination avec le Quantum Community Network, un groupement des entreprises privées du quantique a vu le jour en Europe. Cette fédération vise à donner une plus grande visibilité au secteur et à lui conférer une plus grande influence face aux acteurs étrangers. Comptant mi-2021 plus de 250 membres, dont environ deux tiers de start-up et de PME, il rassemble également des grandes entreprises, des fonds et des centres de recherche.

L'OFFRE DE FORMATIONS SE DÉVELOPPE EN FRANCE

Le monde académique s'adapte aux nouveaux besoins dans le quantique avec des cursus dédiés, comme le master ARTEQ de Paris-Saclay, le programme Quantum de l'Université Grenoble Alpes, l'IBM Quantum Hub avec l'université de Montpellier, ainsi que les formations proposées dans de nombreuses universités et grandes écoles (Polytechnique, CentraleSupélec, Télécom ParisTech, EPITA...). L'offre de formation continue progresse également, avec la création d'un programme court (quatre jours) par l'école d'ingénieurs CPE Lyon, et celui d'une centaine de jours de l'Afti-Numérique.

Le secteur s'organise par des rachats et des partenariats entre acteurs

Les rapprochements entre acteurs se multiplient dans le quantique

2019	Pasqal	EDF	algorithmes quantiques pour résoudre des problèmes d'optimisation		
2019	Atos	Total	fourniture d'un simulateur quantique pour applications variées : chimie, nouvelles batteries (filiale Saft)...		
2020	Atos	Total	calcul quantique pour le développement de nouveaux matériaux décarbonés		
2020	Total	Cambridge Quantum Computing	captage, stockage et utilisation du CO2		
2020	Pasqal	Atos	accélérateur quantique pour équiper un système de calcul haute performance (HPC)		
2021	Pasqal	Thales	algorithmes quantiques pour résoudre des problèmes d'optimisation		
2021	Honeywell	Cambridge Quantum Computing	création d'une coentreprise portant sur l'ensemble de la chaîne quantique		
2021	Amazon Web Services	Rigetti	1Qbit	Multiverse Computing	offre commune dans le quantique
2021	iXBlue	Kylia	Muquans	rachat des deux entreprises par iXBlue pour se renforcer dans la photonique	
2022	Pasqal	Qu&Co	rachat par Pasqal de la société néerlandaise Qu&Co, positionnée dans le logiciel quantique		
2022	Pasqal	Crédit Agricole	Multiverse Computing	gestion des risques de portefeuilles d'actions et notation des clients	
2022	Alice&Bob	Thales	ENS	laboratoire "Quantum Computation Structures"	
2022	Alice&Bob	Naval Group	Inria	apprentissage profond quantique	

Traitement IndexPresse.

“Dans le quantique, nous sommes en phase pré-compétitive, ce qui favorise les collaborations en tout genre”, expliquait en septembre 2022 dans *Industrie & Technologies* le spécialiste des technologies émergentes chez BMW Johannes Klepsch. De nombreux partenariats se mettent effectivement en place, que ce soit entre industriels ou grandes entreprises, ou entre ces dernières et des start-up. Outre ces petites structures, souvent issues de laboratoires ou fondées par des chercheurs, le secteur attire les groupes du numérique, les industriels de la défense ainsi qu’une

multitude d'utilisateurs potentiels, dans les transports ou encore la finance. Les collaborations portent en particulier sur la partie logiciel et algorithmique du quantique afin de développer des solutions adaptées à chaque secteur. La fabrication d'ordinateurs quantiques reste le fait d'une poignée d'acteurs, start-up et géants américains de l'informatique et du numérique. Des acquisitions de start-up par d'autres jeunes sociétés ou par des industriels commencent à apparaître, un phénomène qui pourrait s'accélérer dans les prochaines années.

Au manque de personnel qualifié s'ajoutent des défis particuliers pour l'Europe

- **Une pénurie de talents à l'échelle mondiale**

La complexité du quantique, même pour des ingénieurs confirmés, rend difficile le maintien d'un vivier suffisant de compétences pour faire face aux nouveaux besoins du secteur. Le temps de formation de tels spécialistes s'avèrent très long et, s'il est souhaitable que des chercheurs créent leur propre société pour appliquer à l'industrie le fruit de leur travail, il existe un risque de dépeuplement des laboratoires. Or, les innovations du quantique sont issues de dizaines d'années de recherche dans le secteur public.

- **Le risque d'une division européenne**

Dans un premier temps, la multiplication des initiatives dans chaque pays membre se montre souhaitable, selon Neil Abroug, coordinateur de la stratégie française dans le quantique. Il déclarait ainsi à *Challenges* en 2021 : “Il faut des plans nationaux pour faire émerger plusieurs Airbus du quantique. La création d'Airbus est venue de la mise en commun de PME et d'ETI européennes.” Une interrogation persiste toutefois quant à la temporalité d'une telle concentration. Pour le consultant Olivier Ezratty, celle-ci doit être mise en place dans de brefs délais afin d'atteindre une taille critique face à la concurrence étrangère. Il expliquait en 2021 dans *L'Informaticien* : “L'Europe est toujours pénalisée par sa fragmentation culturelle et économique. L'un des enjeux est de

créer rapidement, notamment par consolidation, des acteurs européens de poids à l'échelle mondiale”.

- **Des industriels européens frileux**

Dotée d'une excellente recherche et de nombreuses start-up, l'Europe semble en retrait sur le plan industriel. Trop peu d'entreprises se dotent d'équipes ou lancent des projets dans le quantique, ce qui freine le développement du secteur. Leurs homologues américaines, japonaises ou coréennes se montrent moins rétives au risque et à l'incertitude du long terme : elles constituent ainsi la quasi-totalité des acteurs membres de l'IBM Quantum Network, un réseau rassemblant les industriels intéressés par cette technologie.

- **Un financement centré sur le hardware**

L'argent public comme privé s'est surtout orienté ces dernières années vers le matériel et le calcul quantique, au détriment des autres segments. “C'est paradoxal”, notait en 2022 Christophe Jurczak, cofondateur du fonds Quantonation. “Des start-up avec de belles technos de capteurs ayant des applications immédiates, parfois même des start-up déjà profitables, auront plus de mal à lever des fonds que des start-up beaucoup plus spéculatives positionnées sur le calcul.” L'entrepreneur plaide pour un rééquilibrage.

UNE COURSE À LA SUPRÉMATIE QUANTIQUE INITIÉE PAR LES FABRICANTS NORD-AMÉRICAINS

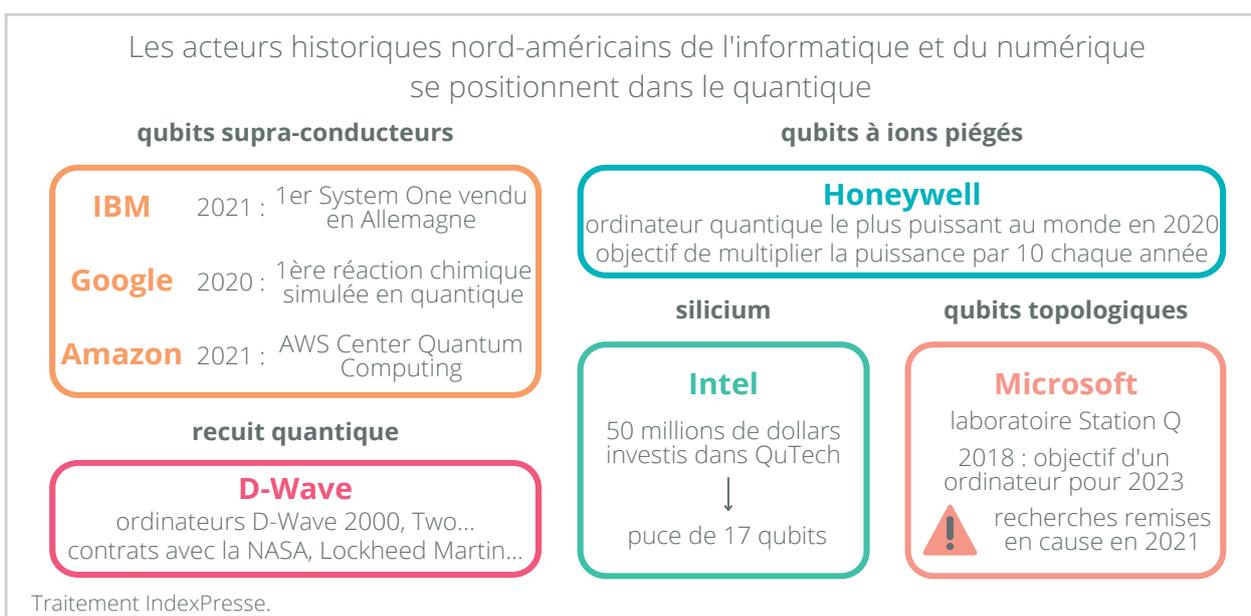
De multiples projets aux résultats incertains, voire controversés

Une compétition technologique autant qu'une bataille d'image

Les grands acteurs du numérique et de l'informatique, en particulier américains, se sont lancés les premiers dans le développement de capacités quantiques. Malgré leur puissance financière, ils ne disposent pas véritablement d'une avance technologique face aux acteurs européens. Chacun cherche toutefois à s'imposer comme la référence du quantique par le biais d'annonces spectaculaires, souvent contestées par leurs concurrents et la communauté scientifique.

- Des avancées à relativiser, souvent sans applications concrètes

La société canadienne D-Wave, fondée en 1999, s'est montrée pionnière dans le domaine avec la création d'un ordinateur quantique de 16, puis 28 qubits en 2007. Cette annonce est suivie du développement du système D-Wave en 2011, présenté comme le premier ordinateur quantique commercial. La société évoque en outre plusieurs avancées technologiques : puce de 128 qubits en 2009, franchissement des 1000 qubits en 2015... Le caractère quantique de ces développements a parfois été mis en doute, de



UNE COURSE À LA SUPRÉMATIE QUANTIQUE INITIÉE PAR LES FABRICANTS NORD-AMÉRICAINS

même que la réalisation effective des objectifs annoncés. Dans un souhait affiché de protéger ses innovations, D-Wave a maintenu une certaine opacité sur ses expérimentations. L'ordinateur D-Wave Two, fruit d'une collaboration avec la NASA, a ainsi parfois raté des tests cherchant à montrer sa supériorité sur un ordinateur classique. Google a de son côté annoncé en 2019 avoir atteint la suprématie quantique avec son ordinateur Sycamore, ce qui a rapidement été contesté par son concurrent IBM. Ce dernier a montré que le calcul effectué par Sycamore pouvait être réalisé en quelques jours par son supercalculateur Summit, basé sur l'informatique classique. Google affirmait alors que le calcul effectué par Sycamore nécessitait 10 000 ans pour une machine non-quantique.

• La difficile comparaison des performances

Les acteurs sont engagés dans une course au nombre de qubits, cherchant à montrer l'augmentation de la puissance de calcul de leurs ordinateurs. Ce critère n'est en réalité qu'un paramètre parmi d'autres, certaines entreprises à l'instar d'IBM et de Honeywell, préfèrent ainsi utiliser le volume quantique. Cet indicateur prend en considération une vingtaine de paramètres mais ne peut être calculé qu'a posteriori. La diversité des technologies et des cas d'usage complexifient encore la situation, certaines pouvant être plus adaptées pour des problèmes spécifiques. Ce manque d'outils de mesure généralisables favorise les annonces de résultats potentiellement intéressants d'un point de vue scientifique, mais sans application industrielle avérée.

LA CHINE AUSSI DANS LA COURSE À LA PUISSANCE QUANTIQUE

Des acteurs du numérique chinois comme Alibaba et Baidu ont ouvert leurs propres centres de recherche sur le quantique. Certains groupes comme Huawei et Tencent ont quant à eux lancé des offres cloud dans le domaine. Des chercheurs chinois ont par ailleurs créé en 2020 le Jiuzhang, un système ayant effectué en 4 minutes un calcul nécessitant 2,5 milliards d'années pour le plus puissant supercalculateur chinois. Basé sur la photonique, le système n'est cependant pas un ordinateur et ne peut être programmé pour la réalisation d'autres problèmes.

Des budgets compliqués à estimer

Les investissements consentis par les grands groupes dans le domaine du quantique font l'objet d'une grande discrétion. Certains ordres de grandeur peuvent être identifiés au niveau des contrats : l'ordinateur D-Wave Two a ainsi coûté 15 millions de dollars, tandis que la start-up Rigetti a décroché en 2020 un contrat de près de 9 millions de dollars pour le développement d'un ordinateur quantique. Les financements sont en revanche connus lors des levées de fonds, surtout réalisées par de jeunes acteurs comme IonQ ou PsiQuantum, et atteignent des centaines de millions de dollars. Malgré l'antériorité des investissements et les sommes considérables dépensées, le tissu industriel et entrepreneurial n'a pas pour l'instant pris davantage sur le plan technologique. Aucun des acteurs ne souhaite se désengager tant les enjeux semblent décisifs.

Des offres lancées sur la partie logicielle

Outre le développement d'ordinateurs quantiques, les groupes du numérique se positionnent au niveau des logiciels, tant pour s'implanter sur l'ensemble de la chaîne de valeur que pour faire émerger des solutions commerciales opérationnelles. Plusieurs de ces acteurs, tels qu'IBM, Amazon, Microsoft ou encore D-Wave, disposent d'offres dédiées dans le cloud. Cette voie semble particulièrement adaptée pour Amazon, leader dans les services cloud avec sa filiale Amazon Web Services (AWS). De son côté, Microsoft développe avec le cabinet KPMG des algorithmes "d'optimisation d'inspiration quantique" (QIO). Utilisés sur des appareils classiques, ils permettent de bénéficier en partie des avantages du quantique sans attendre la création effective d'ordinateurs quantiques.

Google, IBM, Honeywell : trois stratégies pour se positionner dans le quantique

Parmi les groupes américains lancés sur le marché, Google, IBM et Honeywell apparaissent comme les leaders. Chacun a choisi une voie différente pour se positionner.

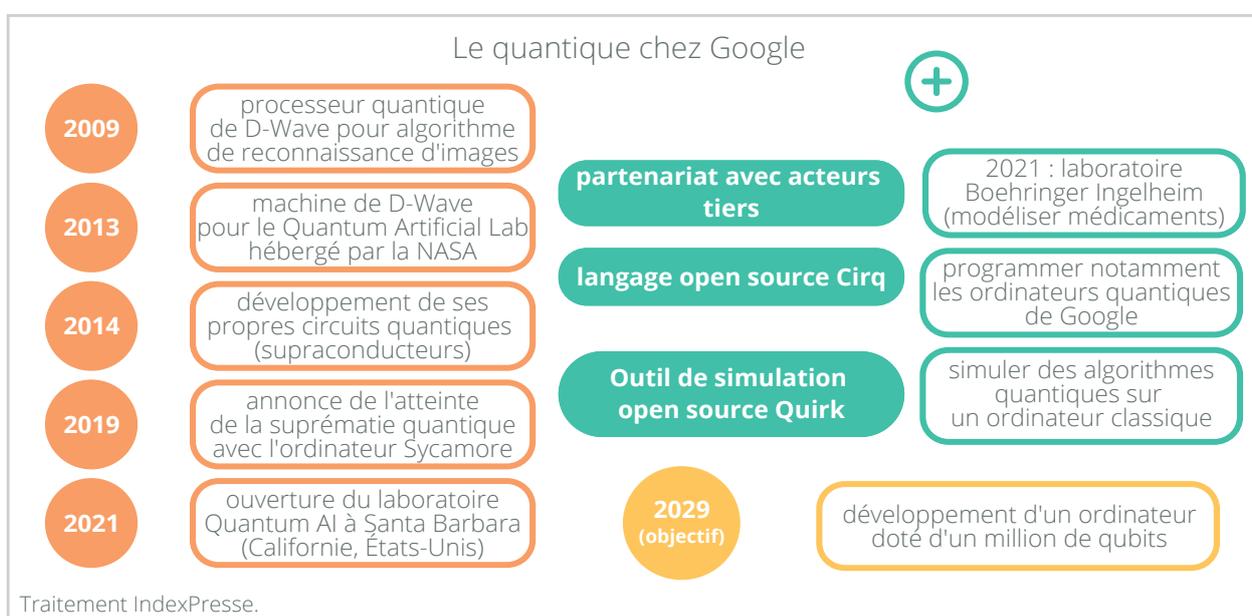
Google s'est d'abord fourni en machines auprès du canadien D-Wave afin de réaliser des expérimentations, notamment en quantique partiel (NISQ). Considérant les limites de ces outils, il a préféré par la suite développer ses propres ordinateurs, en particulier le Sycamore en 2019. Cette même année, il annonçait avoir atteint la suprématie quantique. Le groupe affiche une forte ambition avec une croissance exponentielle du nombre de qubits intriqués dans les prochaines années.

De son côté, **IBM** présente lui aussi des ambitions considérables dans l'augmentation numérique de qubits de ses ordinateurs. Il se distingue toutefois avec de multiples lancements de processeurs de

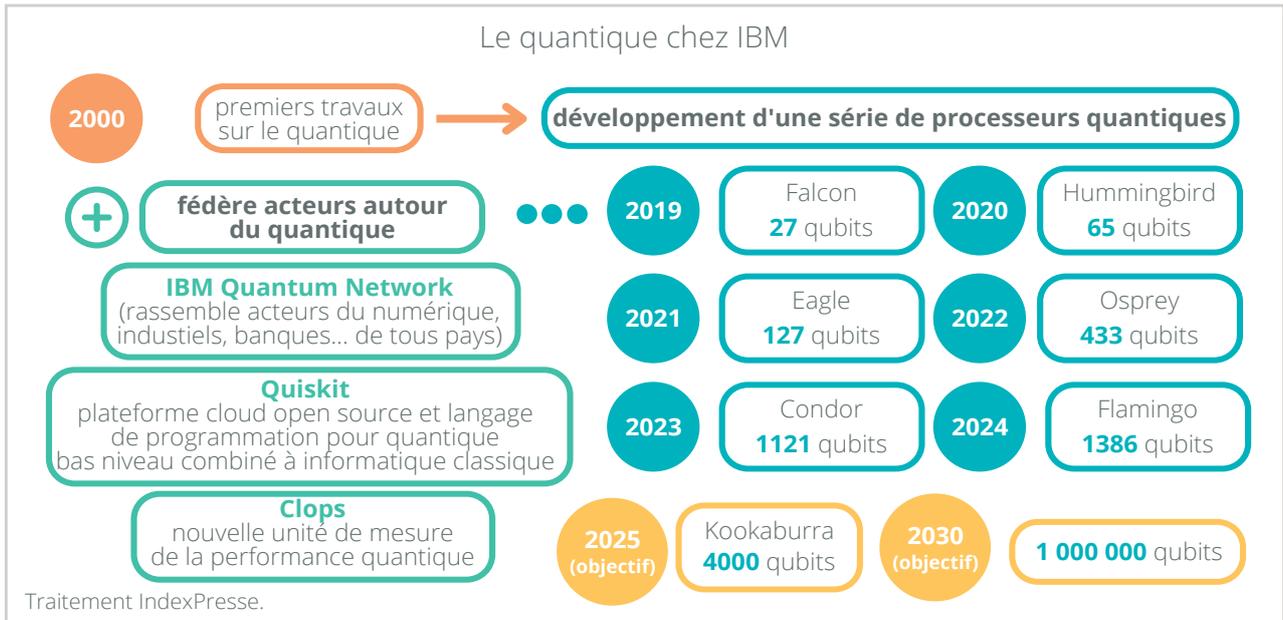
plus en plus puissants, ce qui lui permet d'afficher des progrès constants en la matière. Le groupe cherche en outre à fédérer une large communauté quantique autour de ses outils, notamment avec son langage en *open source* Qiskit et sa plateforme d'élaboration d'algorithmes quantiques, elle aussi libre d'accès.

Quant à **Honeywell**, il a opté à la différence de ses concurrents pour la technologie des ions piégés, Google et IBM ayant misé sur les supraconducteurs. Plutôt que de chercher à augmenter de façon exponentielle le nombre de qubits, le groupe met l'accent sur le volume quantique. Il mise ainsi davantage sur la performance et la fiabilité de ses qubits, affichant un nombre de qubits plus faibles sur ses ordinateurs. Signe de ses ambitions, Honeywell a par ailleurs annoncé des objectifs d'accroissement de puissance quantique vertigineux.

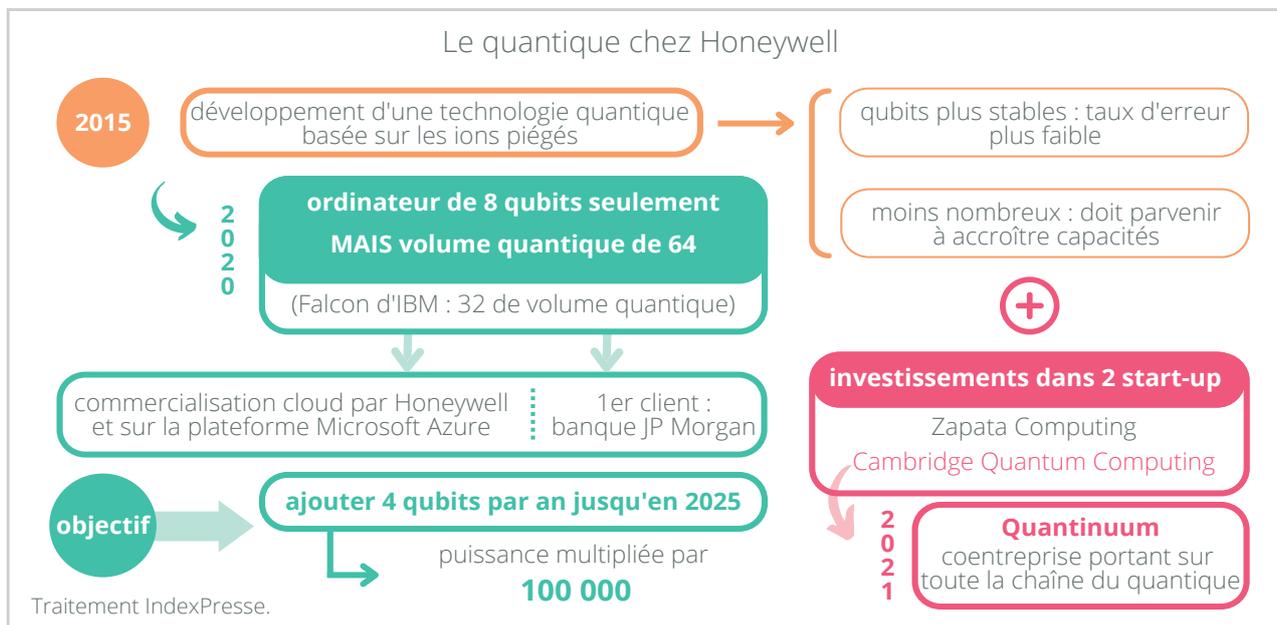
Une approche progressive mêlant NISQ et machines de D-Wave avec Google



IBM mise sur des lancements réguliers de processeurs et une forte évangelisation du marché



Honeywell se différencie en préférant les ions piégés et la fiabilité à l'augmentation numérique des qubits



Des start-up américaines et canadiennes aux moyens financiers considérables

Quelques jeunes sociétés nord-américaines se sont fortement positionnées dans le quantique notamment grâce à un financement particulièrement élevé. Les start-up américaines IonQ, Rigetti et PsiQuantum ainsi que la société canadienne Xanadu ont chacune rassemblé plusieurs centaines de millions de dollars.

Le développement de ces start-up s'appuie sur la mise en place de partenariats dans une variété de domaines. Leur haute technologie nécessite du matériel de pointe et des puces très fines, tandis que la commercialisation passe par les plateformes cloud. Certains investisseurs devraient également compter parmi leurs futurs clients.

FOCUS START-UP

IONQ DÉVELOPPE LA TECHNOLOGIE DES IONS PIÉGÉS

- Date de création : 2015
- Deux ordinateurs disponibles : Harmony (11 qubits), Aria (23 qubits)
- Un système configurable : Forte (32 qubits)
- Plateforme IonQ Quantum Cloud
- Disponible aussi via Google Cloud, Microsoft Azure et Amazon Braket
- A affirmé avoir atteint en 2020 un volume quantique de quatre millions avec un ordinateur de 32 qubits
- Contrat de 13,4 millions de dollars fin 2022 avec l'US Air Force

RIGETTI MISE SUR LES QUBITS SUPRACONDUCTEURS

- Date de création : 2013
- Fab-1 : propre usine de fabrication de puces pour ordinateurs quantiques, agrandie fin 2022 (+ 1 500 m²)
- Processeur Ankaa de 84 qubits prévu pour 2023, et Lyra (336 qubits) fin 2023
- Plateforme Quantum Cloud Services et accès sur Microsoft Azure Quantum
- Fin 2022 : partenariats avec le spécialiste de la cryogénie Bluefors et avec Nvidia (processeurs hybrides pour la modélisation climatique).

PSIQUANTUM ET XANADU ONT FAIT LE CHOIX DE LA PHOTONIQUE

• Date de création

PsiQuantum (2016) Xanadu (2016)

PsiQuantum s'est lancée dans le secteur en visant directement la fabrication d'un ordinateur quantique universel, sans passer par la phase intermédiaire du NISQ. La société vise un objectif d'un million de qubits.

Xanadu a de son côté développé le Borealis, un ordinateur dont les capacités sont accessibles via le service cloud de la société ainsi qu'Amazon Braket, plateforme cloud du géant du e-commerce.

• Partenariats

PsiQuantum s'est associé à GlobalFoundries, fabricant majeur de puces électroniques, afin d'obtenir des composants à très haute performance.

Xanadu a mis en place un partenariat avec le groupe Volkswagen fin 2022, portant notamment sur la modélisation de batteries de nouvelles générations. Le constructeur automobile a par ailleurs investi dans Xanadu, qui a effectué une levée de fonds de 100 millions de

GROUPES DU NUMÉRIQUE ET INDUSTRIELS FRANÇAIS INVESTISSENT LE SECTEUR

Un tissu d'entreprises hexagonales présentes dans une variété de segments

La France dispose d'ores et déjà de nombreuses PME et grandes entreprises dans le secteur du quantique ainsi que dans les technologies habilitantes (cryogénie, lasers, isotopes stables...).

- Le spécialiste du numérique Atos s'est lancé dès 2016 dans le quantique, et se positionne notamment dans la partie logicielle et les accélérateurs quantiques.
- Le groupe de défense et d'électronique Thales apparaît également comme un acteur majeur dans le domaine. Il développe en particulier des capteurs quantiques (segment le plus mature du marché) et des systèmes de communications quantiques.
- L'écosystème français s'avère en outre important dans la cybersécurité, qui constitue un des principaux domaines d'application du quantique. Outre les grands groupes, la France comptait 150 start-up dans la cybersécurité en 2021. Le secteur bénéficie d'un plan gouvernemental d'un milliard d'euros.
- Le groupe Air Liquide s'est renforcé dans la cryogénie en 2020 avec l'acquisition de la société CryoConcept, créée en 2001 par le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique).
- Le spécialiste du nucléaire Orano a ouvert en 2021 un laboratoire d'isotopes stables sur le site de la centrale du Tricastin (Drôme). L'investissement de 15 millions d'euros devrait permettre une production à partir de septembre 2023.
- Le groupe de haute technologie iXBlue a procédé en 2021 à l'acquisition des sociétés Kyla et Muquans afin de renforcer ces capacités dans la photonique. L'Hexagone compte d'autres spécialistes dans le domaine des lasers comme Azurlight Systems.
- L'entreprise de câblage Radiall livre depuis 2017 des équipements à l'industrie quantique, notamment divers connecteurs spécifiques (micro-ondes, cryogéniques, non-magnétiques...).

Autres sociétés françaises présentes dans la filière quantique

Capteurs

Orolia

Syrlinks

Photonique

Aurea

Lytid

Lumibird

GLOphotonics

Spark Lasers

Silentsys

Solutions pour semi-conducteurs

Plassys Bestek

Riber

Traitement IndexPresse.



Atos se positionne dans les services et les supercalculateurs hybrides

Une focalisation sur la partie plateforme et logicielle

Lancé sur le marché du quantique depuis 2016, le groupe Atos a décidé de ne pas s'engager dans le développement d'ordinateurs quantiques. Il a préféré se concentrer sur les usages et concurrencer les grands acteurs américains du numérique avec sa propre plateforme quantique. Atos se focalise en particulier sur trois éléments :

- les logiciels ;
- les émulateurs (simulateurs) ;
- les accélérateurs.

Dans une logique hybride et graduelle, le groupe cherche à faire bénéficier à ses clients des avantages du quantique, sans attendre le dévelop-

pement d'ordinateurs quantiques puissants. Les architectures hybrides permettent d'accélérer la vitesse de calcul des supercalculateurs classiques, tandis que les simulateurs d'ordinateurs quantiques constituent un moyen d'expérimenter les usages potentiels de tels instruments.

Atos prévoit la commercialisation de capacités d'accélération NISQ pour 2023, visant des applications dans la chimie et dans l'optimisation combinatoire. Il mise sur des algorithmes post-quantique renforcés pour son offre de cybersécurité.

Le groupe français a par ailleurs ouvert un centre de R&D quantique aux Clayes-sous-Bois, en Île-de-France, mi-2021. Le laboratoire se spécialise dans les questions liées au réchauffement climatique.



Des initiatives et des partenariats pour se renforcer dans le domaine

- Atos s'est associé à Total en 2019 dans le but d'employer le quantique pour des applications en chimie et en électronique. Cette collaboration a été étendue en 2020, en particulier dans le développement de matériaux décarbonés et dans le captage de CO₂.
- Le groupe a également noué un accord en 2020 avec la start-up Pasqal dans le calcul haute performance. Les deux partenaires cherchent à développer un accélérateur quantique en s'appuyant sur les travaux de Pasqal dans les atomes neutres.
- Depuis 2020, Atos coordonne le projet européen Neasqc (*Next applications for Quantum Computing*), qui vise à identifier des cas d'usage dans l'industrie et dans la finance. Focalisé sur le NISQ et donc sur des applications viables à court terme, le programme fixe également comme objectifs le développement d'outils open source, d'une communauté dédiée, de logiciels et de référentiels (indicateurs, unités de mesure...) pour le matériel quantique.
- Dans cette logique de fédération des acteurs, Atos a développé la plateforme open source myQLM en 2019. Dérivée de son simulateur QLM, elle a pour but de faciliter la diffusion du quantique auprès de programmeurs, de chercheurs ou même d'étudiants.
- Face à la difficulté de comparer les performances des technologies entre elles et la diversité des méthodes d'évaluation, toutes contestées (nombre de qubits, volume quantique...), Atos a inventé en 2020 le Q-Score. Ce dernier se présente comme une unité de mesure universelle, applicable à tous les ordinateurs quantiques.
- En 2021, le groupe Atos a ouvert un centre quantique au Brésil en partenariat avec l'institut de recherche et d'éducation Senai Cimatec. Équipé d'une QLM, le nouveau Latin America Quantum Computing Center s'adresse aux entreprises.
- Le groupe fait également partie des partenaires du CEA-Leti dans le développement de sa technologie quantique basée sur le silicium. Celle-ci devrait pouvoir être utilisée dans l'industrie dans le courant de la décennie 2025-2035.

Thales renforce sa place de spécialiste des capteurs et de la cryptographie

Le groupe d'électronique et de défense Thales cherche à consolider ses positions sur ses marchés traditionnels en y implémentant les technologies quantiques. Il se focalise ainsi sur les questions de cybersécurité et de cryptographie, et sur les capteurs quantiques. L'industriel considère que ce domaine technologique devrait impacter les deux tiers de son activité. En 2021, une centaine d'ingénieurs et de chercheurs du groupe travaillaient sur ces problématiques, des effectifs amenés à augmenter. Thales dispose de plusieurs centres de recherche dédiés au quantique :

- son propre laboratoire au sein de son centre de Saclay (Essonne), sur le campus de l'École polytechnique ;
- l'unité mixte de physique 137, un laboratoire commun avec le CNRS dirigé par le prix Nobel de physique 2007 Albert Fert ;
- le nouveau laboratoire Quantum Computation Structures, fondé en 2022 en partenariat avec la start-up Alice&Bob et l'École Normale Supérieure (ENS). Ce centre vise notamment à intégrer plus fortement les approches matériel et logiciel dans le développement de solutions quantiques.

Le groupe est par ailleurs impliqué dans plusieurs consortiums en Europe et aux États-Unis dans la mise en place d'infrastructures quantiques et dans la définition de standards algorithmiques en cryptographie.

GROUPES DU NUMÉRIQUE ET INDUSTRIELS FRANÇAIS INVESTISSENT LE SECTEUR

Thales s'appuie sur plusieurs technologies quantiques pour innover dans les capteurs et en cryptographie

Capteurs

supraconducteurs

↳ capter les basses fréquences

centres azote-lacune

↳ détecter les champs magnétiques de faible intensité

antennes quantiques ultra-miniaturisées (jusqu'à un million de fois plus petites)

défense → drones

santé → appareils IRM

atomes froids



centrales inertielle quantiques

↳ plus précises que centrales classiques

défense → mouvement des sous-marins

aviation → atterrissage d'urgence sans GPS

ions terre-rare

↳ analyse des spectres de radiofréquences
optimisation des réseaux / renseignement

Communications

développer des clés de chiffrement inviolables

- réseaux terrestres
- réseaux satellitaires

US NIST (National Institute of Standards and Technologies)

- Falcon : algorithme développé par Thales et IBM
- sélectionné en 2022 pour définir un standard en cryptographie post-quantique

Projet EuroQCI (Quantum Communications Infrastructure)

↳ intégrer des systèmes quantiques dans les réseaux terrestres et spatiaux européens d'ici 2027

→ [définir l'architecture du réseau avec l'université de Nice
développer la partie spatiale au sein de l'Institut quantique

plusieurs partenariats

ID Quantique + ISARA Corp.

2019

cryptographie

SpeQtral

2022

communications quantiques satellitaires

Traitement IndexPresse.

ATOS ET THALES, PARTENAIRES DE L'INSTITUT QUANTIQUE OCCITAN

Terre d'industrie et de numérique, la région Occitanie a fondé début 2021 un centre dévolu à la recherche dans le domaine quantique. Cet institut rassemble une multitude de partenaires installés dans la région, dont les groupes Atos et Thales. D'autres entreprises, comme Airbus et IBM, ont également intégré l'organisme, de même que des acteurs institutionnels tels que le CNES, le CNRS ou encore l'école ISAE-SupAéro. La plupart des membres de l'Institut quantique sont des laboratoires situés à Toulouse ou à Montpellier. Ce dernier s'est fixé trois objectifs : renforcer l'innovation technologique, promouvoir le quantique et la connaissance des avancées auprès des industriels afin de favoriser les transferts de technologies, et former les étudiants et les ingénieurs aux métiers relatifs au quantique.

De nombreux secteurs s'intéressent au quantique et conçoivent des cas d'usage

Les potentialités offertes par le quantique commencent à être explorées chez les éventuels futurs clients des acteurs du secteur. Dans la banque, l'énergie ou les transports, les entreprises mettent en place des expérimentations afin de déterminer des cas d'usage pertinents dans leur domaine d'activité. Ces derniers portent en particulier sur les problématiques d'optimisation,

l'informatique quantique permettant d'obtenir des probabilités et non pas des résultats exacts. Chaque technologie quantique peut en outre se montrer appropriée pour résoudre des problèmes spécifiques, et doit être comparée avec les approches classiques de type HPC (supercalculateurs), tant en termes de performances que d'investissement financier.

FOCUS GRANDS GROUPES

EDF ET LE QUANTIQUE AU SERVICE DES QUESTIONS ÉNERGÉTIQUES

L'énergéticien français s'implique dans diverses initiatives pour faire émerger des applications concrètes des technologies quantiques. S'intéressant à plusieurs d'entre elles, il a notamment noué en 2019 un partenariat avec la start-up Pasqal pour tester l'intérêt des atomes neutres dans l'optimisation de la recharge des véhicules électriques. EDF souhaite aussi modéliser la résistance de ces barrages hydroélectriques grâce au quantique. Le groupe a participé par ailleurs, via sa filiale de R&D, au projet européen PASQuanS (Programmable atomic large-scale quantum simulation). Celui-ci visait à mener des recherches dans le but de développer des simulateurs quantiques de nouvelle génération, ayant des applications industrielles directes.

DES ESSAIS DANS LE TRANSPORT CHEZ LA SNCF ET NAVAL GROUP

Le groupe de transport évalue les possibilités du quantique en matière de gestion du réseau et des moyens de transport. "Nous cherchons une approche intégrée plutôt que séquentielle pour mieux planifier nos ressources – réseau, rames, conducteurs – et pour optimiser les plans de transport", expliquait François Ramond, responsable de la modélisation à la SNCF, lors d'une conférence en 2021.

L'industriel de défense Naval Group s'intéresse quant à lui à divers usages et technologies quantiques : communications, capteurs, informatique... L'optimisation en temps réel du trajet d'un navire de surface ou d'un sous-marin fait notamment partie des domaines sur lesquels Naval Group porte son attention.

CRÉDIT AGRICOLE EXPÉRIMENTE LE QUANTIQUE POUR LA GESTION FINANCIÈRE

En 2021, la banque a signé deux contrats (projets Feynman et Grossmann) avec respectivement Pasqal et Multiverse Computing, start-up espagnole spécialiste du quantique pour la finance. Le Crédit Agricole a ainsi pu tester l'usage du quantique dans les calculs de valorisation de portefeuille et d'anticipation de la dégradation du score de crédit des clients (aussi appelée "problème des anges déchus"). Satisfait des résultats de ces expérimentations, le groupe bancaire envisage de lancer d'autres projets dans le domaine. "Nous explorons des pistes de collaborations avec d'autres fournisseurs de technologies quantiques, pour d'autres cas d'usage", indiquait fin 2022 dans *Industrie & Technologies* le directeur adjoint des solutions de financement chez Crédit Agricole Corporate and Investment Bank, Ali El Hamidi. "Il se peut que nous choissions d'industrialiser la solution fondée sur les réseaux de tenseurs de Multiverse".

LES START-UP FRANÇAISES CHERCHENT À GRANDIR

Un riche écosystème de jeunes pousses, dépendant de la recherche

Une trentaine de start-up françaises actives

“Je découvre une nouvelle start-up dans le quantique tous les mois”, constate Neil Abroug, coordinateur de la stratégie quantique française, en septembre 2022. Le secteur attire en effet un nombre croissant de nouvelles entreprises depuis la fin des années 2010. Selon les chiffres relayés par *L'Usine Nouvelle* et *Le Monde*, **une trentaine de start-up hexagonales, généralement des deeptechs, évoluent désormais sur le marché du quantique.** Elles se positionnent sur des segments variés : ordinateurs quantiques, technologies habilitantes nécessaires au développement de solutions quantiques (lasers, cryostats, etc.), logiciels et applications concrètes (algorithmes, cybersécurité, etc.)... Le plan quantique national prévoit qu'**une centaine de jeunes sociétés seront actives à horizon 2027.**

Celles-ci profitent de la nouvelle dynamique entourant le quantique, entre plans nationaux d'investissement, soutien des grands groupes de l'informatique et du numérique, et prise de conscience des enjeux entourant cette technologie. “C'est **un secteur stratégique, de souveraineté nationale et d'indépendance**”, indique Robert Marino, PDG de la start-up Qubit Pharmaceuticals.

Un équilibre à trouver entre recherche et entrepreneuriat

Ces start-up émergent souvent de laboratoires de recherche, qui ont permis de développer et

d'affiner durant plusieurs années les systèmes utilisés. “Le quantique est **un écosystème deeptech, avec une forte intensité capitalistique et des cycles extrêmement longs,** qui s'appuie sur le monde de la recherche fondamentale”, confirme Adrien Muller, directeur de participation chez Bpifrance. L'apparition d'applications concrètes permet désormais à une nouvelle génération de chercheurs-entrepreneurs de **sortir le quantique des laboratoires pour l'amener sur le terrain.** “Entre aujourd'hui et le moment où on a lancé Muquans, c'est le jour et la nuit. Industrialiser des technologies quantiques suscitait un certain scepticisme, voire l'hilarité chez des collègues, des entrepreneurs, des investisseurs. On a tenu bon et les tutelles de nos laboratoires et la banque Oséo nous ont soutenus pour une levée de fonds de 1,7 million d'euros. Aujourd'hui, c'est plus facile de lever des fonds pour un jeune entrepreneur”, détaille Bruno Desruelle, cofondateur de la start-up Muquans.

L'enjeu consiste donc à **profiter de cet équilibre entre recherche et entrepreneuriat sans le rompre.** Les questionnements entourant le déclin de la recherche française apparaissent au premier plan. “Dans quatre à cinq ans, les chercheurs et les maîtres de conférences pourraient venir à manquer. **La recherche fondamentale nécessaire au saut technologique suivant ne sera pas effectuée**”, avertit Pascal Senellart, directrice de recherche au CNRS, en septembre 2022 dans *L'Usine Nouvelle*. La revue rappelle que l'explosion des start-up d'intelligence artificielle avait engendré le départ de nombreux chercheurs français vers le privé, pénalisant ainsi le domaine académique et, in fine, l'ensemble de l'écosystème.

Le hardware attise l'innovation

Ordinateurs, équipements quantiques et technologies connexes représentent un champ d'action privilégié pour les start-up. "Lorsque nous avons créé Quandela, en 2017, nous étions l'une des premières start-up du quantique en France. Depuis, absolument tout a changé. Il y a de plus en plus d'entreprises qui se lancent, et depuis le Covid, l'idée de **faire du hardware, de mettre en place ses propres ateliers d'assemblage en France, trouve un accueil beaucoup plus favorable auprès des investisseurs**. L'autre nouveauté est que **les grands groupes sont prêts à investir** pour se former à cette technologie et développer des usages", décrit Valérian Giesz, cofondateur de la start-up Quandela, en septembre 2022. La concurrence internationale n'effraie pas les jeunes pousses tricolores, qui valorisent même leurs avancées vis-à-vis des géants du numérique. "Nous sommes **les seuls à affronter les Gafa sur l'ordinateur quantique**. Nous avons même six mois d'avance sur Google et deux à trois ans sur Amazon", affirme Théau Péronin, cofondateur d'Alice & Bob, en octobre 2022.

- **Se démarquer dans la course à l'ordinateur quantique**

Décrits par *Le Monde* comme le "Graal du domaine", l'ordinateur quantique et ses qubits suscitent l'attention de nombreuses start-up. Chacune adopte une technique spécifique, créant ainsi les conditions d'**une véritable course à la R&D** : qubits reposant sur des atomes neutres froids pour Pasqal, qubits supraconducteurs dits "de Schrödinger" pour Alice & Bob, qubits formés de nanotubes de carbone pour C12 Quantum Electronics... En 2022, Qcosmos a rejoint la compétition. En s'appuyant sur les recherches du CEA et du CNRS, cette nouvelle société veut mettre au point des qubits reposant sur du silicium, "qui apporteront une véritable rupture en termes de performances et d'intégration", annonce Maud Vinet, directrice du programme quantique au CEA-Leti. "**L'essor des technologies de qubits reste l'apanage des start-up en France**", selon *L'Usine Nouvelle*, en septembre 2022.

Des techniques variées chez les start-up françaises de l'ordinateur quantique

Alice & Bob

Qubits supraconducteurs dits "de Schrödinger"

C12 Quantum Electronics

Qubits formés de nanotubes de carbone

Pasqal

Qubits à base d'atomes neutres froids

Qcosmos

Qubits reposant sur du silicium

Quandela

Qubits photoniques

Traitement IndexPresse. Source : *L'Usine Nouvelle*

Afin de valider leur modèle et en attendant la commercialisation de machines complètes, plusieurs de ces sociétés mettent leurs processeurs à disposition de clients souhaitant effectuer des calculs quantiques. "**Nous vendons du temps de calcul accessible via le cloud**", résume Georges-Olivier Raymond, CEO de Pasqal.

- **Des opportunités à saisir du côté des technologies habilitantes**

Pour stabiliser et traiter l'information quantique, des technologies spécifiques, dites habilitantes, sont nécessaires. Certaines entreprises ont fait le choix de se positionner sur ce segment pour **s'imposer comme les partenaires des développeurs d'ordinateurs quantiques**. WeLinQ

propose par exemple des interconnexions pour les processeurs ainsi que des équipements de mémoire quantique. LightOn développe des processeurs optiques destinés au calcul quantique, tandis que Silent Waves produit des amplificateurs de signaux micro-ondes. Quandela était initialement centrée sur cette approche avec ses “fontaines à photons”, puis s’est lancé dans son propre projet d’ordinateur quantique grâce à des qubits photoniques. Les cryostats, des équipements de froid extrême nécessaires au fonctionnement des technologies quantiques, font aussi l’objet d’innovations. CryoConcept, rachetée par Air Liquide en 2020, et My Cryo Firm, membre de plusieurs consortiums européens de développement d’applications, se concentrent sur ces dispositifs.

LE PARI RATÉ DE MICROSOFT DANS LA BATAILLE TECHNOLOGIQUE

L’ordinateur quantique reste un domaine dans lequel la recherche progresse rapidement et où aucune technologie ne s’est définitivement imposée. Microsoft en a fait les frais. À partir de 2012, le groupe américain décide de suivre les travaux d’un physicien néerlandais sur le fermion de Majorana, une quasi-particule susceptible de créer des qubits topologiques très fiables. Mais en 2021, les recherches s’arrêtent, faute de résultats probants. Leo Kouwenhoven, le physicien à l’origine du projet, doit même retirer sa publication de la revue scientifique *Nature*, aucun autre chercheur n’ayant réussi à reproduire ses observations.

FOCUS START-UP

Alice & Bob en quête du qubit parfait

Créer un qubit infallible : telle est l’ambition d’Alice & Bob, start-up française née en 2020. Cette dernière veut bâtir un ordinateur quantique reposant sur des qubits supraconducteurs, dits “de Schrödinger, qui ont “une durée de vie stable 300 fois supérieure aux autres”, expose Théau Peronnin, cofondateur de la société. “Ils apportent une solution autonome et intégrée au problème central de la correction des erreurs”. Cette approche unique permet à Alice & Bob de rivaliser avec les géants américains en matière de fiabilité. “Eux cherchent à augmenter le nombre de qubits pour corriger les éventuelles erreurs, alors que nous cherchons à créer un qubit idéal, sans erreur, avant d’en associer plusieurs”, explique Théau Peronnin. En 2022, l’entreprise est parvenue à multiplier par 100 000 le temps de vie d’un qubit, atteignant huit minutes, “une première mondiale”.

Cette même année, Alice & Bob a levé 27 millions d’euros auprès de Bpifrance et des fonds Elaia et Supernova Invest. Elle avait déjà récolté 3 millions d’euros deux ans plus tôt. Ce nouvel apport doit lui permettre de poursuivre sa feuille de route afin de mettre au point un premier qubit logique, sans erreur et capable de mener à bien des calculs, dès 2023. “Même Google et Amazon n’y arrivent pas”, note *Les Échos*. Afin de tenir ses objectifs, la start-up prévoit de doubler ses effectifs d’ici la fin 2023, pour compter plus de 70 salariés dans ses rangs. Un centre de prototypage regroupant les technologies de pointe nécessaires au calcul quantique doit aussi voir le jour à Paris.

Alice & Bob souhaite enfin renforcer ses liens avec l’écosystème industriel et professionnel, en nouant davantage de collaborations avec des entreprises susceptibles de développer des projets quantiques. “Les utilisateurs doivent se familiariser dès maintenant aux nouveaux usages du quantique, tous les pans de l’économie seront touchés”, anticipe Théau Péronnin.

Anticiper sur le software et ses multiples débouchés

S'ils ne représentent que 23 % des investissements réalisés dans le secteur quantique, selon les chiffres relayés par *L'Usine Nouvelle*, les logiciels s'avèrent indispensables à cette technologie. "Avoir des qubits ne fait pas un processeur. Il faut inventer les commandes élémentaires de la machine pour les contrôler et transmettre les informations", rappelle Sébastien Bardin, responsable du logiciel quantique au CEA-List. Bien que primordial, **ce segment s'avère pour l'instant moins prisé que le matériel**. "En Europe, il n'y a pas beaucoup d'acteurs dans le logiciel quantique", confirmait Georges-Olivier Raymond, CEO de Pasqal, début 2022. Cela s'explique en partie par **le manque de disponibilité du hardware** : les ordinateurs quantiques étant encore en cours d'élaboration, la R&D logicielle se base sur de la théorie et de la conception sur mesure, difficile à tester en conditions réelles. Détenir des logiciels déjà prêts à l'emploi représentera cependant **un avantage majeur lorsque la technologie sera au point**. "Nous n'avons pas encore le hardware adapté, mais nous optimisons les ressources nécessaires pour arriver le plus tôt possible à un avantage quantique concret", assure Jordanis Kerrenidis, directeur technique de la start-up américaine QC-Wave.

Les start-up bénéficient donc d'**opportunités sur ce créneau moins concurrentiel**, en mettant au point au plus tôt les outils qui permettront d'exploiter concrètement les possibilités des machines quantiques.

- **Des algorithmes au service d'une nouvelle informatique**

Souvent issus de la recherche et basés sur des machines "idéales", les algorithmes indiquent à un ordinateur quantique les instructions à suivre pour effectuer une tâche. L'enjeu consiste à adapter ces algorithmes aux appareils actuels, selon les particularités de chacun, leurs limites, et les usages concrets qui vont en découler. Il s'agit

également de **poser les bases d'une nouvelle informatique, en commençant à imaginer des langages de programmation adaptés au quantique** et aisés à manipuler. "Il n'est déjà pas simple de passer de l'informatique classique à l'informatique quantique, il ne faut pas que le langage de programmation soit une difficulté supplémentaire", insiste Robert Marino, PDG de la start-up Qubit Pharmaceuticals. À terme, le but est de parvenir à **développer un langage capable de s'adresser à toutes les technologies de qubit**.

- **Faciliter l'implantation du quantique dans les entreprises**

Le volet software constitue également la clé de voûte de l'implantation du quantique dans le monde professionnel. "Toutes les entreprises n'auront pas les moyens de s'offrir un chief quantum officer", rappelle *L'Usine Nouvelle* : il est donc indispensable que **les solutions logicielles jouent le rôle de facilitateur entre l'utilisateur et la technologie quantique**. "Ce sont des traducteurs. Les algorithmes aident les entreprises à apprivoiser le quantique en faisant des preuves de concept", indique Robert Marino.

Cette démocratisation paraît d'autant plus cruciale qu'**une pénurie de talents se profile déjà dans le secteur**, ce qui complique les recrutements. D'après Laurent Guiraud, de la start-up ColibriITD, il faudrait dix ans pour former un expert de l'informatique quantique. C'est notamment pour cette raison qu'il a créé sa société, spécialisée dans le développement de logiciels quantiques, afin que "toutes les entreprises, petites et grandes, profitent de la révolution quantique, qui ne doit pas être réservée à un petit groupe d'acteurs".

- **Mettre au point des solutions pour des secteurs spécifiques**

Certaines jeunes pousses se concentrent déjà sur des algorithmes dédiés à une activité

précise. La start-up franco-américaine QuantFi est par exemple centrée sur la finance, en façonnant des algorithmes quantiques adaptés aux problématiques et aux besoins de l'industrie financière (gestion des risques, détection des tendances, etc.). **La santé représente un axe prometteur** : Qubit Pharmaceuticals et Aqemia s'y positionnent pour faciliter la découverte de médicaments. Cette dernière a levé 30 millions d'euros en octobre 2022. Elle a "reformulé une théorie quantique pour l'adapter à la mécanique statistique", afin de réduire le temps de recherche concernant l'affinité moléculaire entre un candidat médicament et une cible thérapeutique. Elle

collabore déjà avec plusieurs grands laboratoires, dont Sanofi, Servier ou Janssen.

En parallèle, d'autres sociétés font le choix de se positionner sur des segments plus larges, à l'image de Prevision.io. Cette start-up tricolore, spécialisée dans la gestion de l'intelligence artificielle, travaille depuis 2019 sur des modules dédiés aux algorithmes quantiques, afin de **mêler IA et quantique au sein d'une approche globale**. Elle a été rachetée en 2022 par le groupe américain Density, qui propose des matériels et logiciels pour mesurer, analyser et optimiser l'espace physique.

FOCUS START-UP

Qubit Pharmaceuticals, un logiciel pour trouver de nouveaux médicaments

Grâce au calcul quantique, Qubit Pharmaceuticals veut diviser par deux le temps de sélection d'un candidat médicament, tout en divisant par dix les investissements nécessaires. La start-up française, fondée en 2020, développe des logiciels allant dans ce sens, comprenant un moteur de dynamique moléculaire, un modèle physique de prédiction du comportement des molécules dans leur milieu, et un outil de visualisation pour faciliter la compréhension des interactions moléculaires. Ils permettent de "prédire en quelques heures seulement l'efficacité d'une molécule, alors qu'il fallait un ou deux ans de calcul auparavant pour obtenir la même précision", indique Jean-Philip Piquemal, directeur scientifique de Qubit Pharmaceuticals.

Ces logiciels fonctionnent pour le moment sur des calculateurs traditionnels mais sont amenés à investir le quantique à l'horizon 2025. Les travaux d'adaptation des algorithmes ont déjà débuté. "Nous parions sur le fait que les plateformes quantiques nous apporteront bien un avantage. [...] Il faut travailler avec chaque fabricant pour savoir comment implémenter le code, qubit par qubit. [...] À terme, nous pourrions envisager de faire le jumeau numérique de protéines, voire de molécules", explique Robert Marino, PDG de la société.

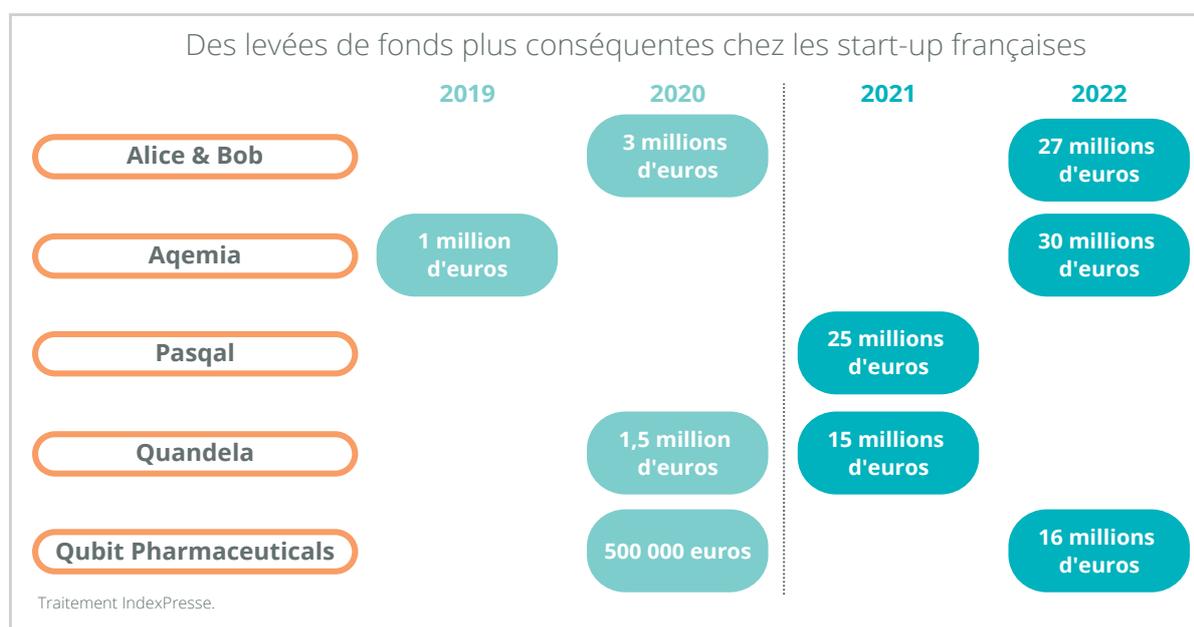
Qubit Pharmaceuticals est hébergée par la pépinière Paris Santé Cochin. Selon *La Tribune*, l'entreprise a également signé plusieurs collaborations de long terme pour assurer son développement technologique. Elle va travailler avec la start-up française Pasqal, les groupes américains Nvidia et Amazon Web Services, ainsi qu'avec l'université de Sherbrooke, au Canada. Les universités du Texas et de Washington ont aussi participé à l'élaboration des algorithmes.

En juin 2022, la start-up a conclu une levée de fonds de 16 millions d'euros auprès de Quantonation, XAnge, Omnes Capital et d'Octave Klaba, le fondateur d'OVHcloud, qui soutient la société. Quantonation avait déjà apporté 500 000 euros à Qubit Pharmaceuticals peu de temps après sa création. Cette augmentation de capital va servir à enrichir le portefeuille de candidats médicaments et lancé des programmes de recherche sur le cancer, l'inflammation et le Covid-19. "Chacun représente un investissement de 1,5 à 4 millions sur trois ans", précise Robert Marino. Les effectifs de la jeune pousse, à Paris et dans son bureau de Boston, vont également doubler pour atteindre une quarantaine d'employés.

LA CRYPTOGRAPHIE POST-QUANTIQUE, UNE BRANCHE D'AVENIR

Capables de casser les clés de cryptage actuelles, les ordinateurs quantiques engendrent de nouveaux défis en matière de cybersécurité. Le NIST, *National Institute of Standards and Technology*, organisme dépendant du département du commerce américain, travaille depuis 2016 sur les algorithmes post-quantiques qui serviront de futurs standards au sein des solutions de sécurité informatique. La start-up française CryptoNext Security a rejoint la "compétition" lancée pour déterminer les algorithmes les plus sûrs. Récompensée par le prix de l'innovation aux Assises de la cybersécurité 2022, elle illustre la dynamique entourant la cryptographie quantique. D'autres start-up françaises se spécialisent dans ce domaine, comme VeriQloud. De jeunes pousses de la cybersécurité étendent également leurs solutions aux problématiques quantiques, telles que CryptoExperts ou Secure-IC. Cette dernière a levé 20 millions d'euros et a racheté l'activité sécurité du groupe belge Silex Insight en 2022, afin de "répondre aux défis actuels et futurs, tels que la révolution de la cryptographie post-quantique".

À la recherche de financements plus conséquents



- De nécessaires levées de fonds massives pour rester dans la course

Au sein d'un secteur où les applications commerciales restent encore souvent éloignées, le financement s'impose comme en enjeu

crucial afin que les start-up puissent poursuivre sereinement leur R&D sans obligation de résultats à court terme. "Nous devons porter un message de vérité, sur le risque que ça ne marche pas, tout en étant enthousiastes", prévient Neil Abroug,

coordinateur de la stratégie quantique française. Or, les sociétés françaises paraissent moins bien dotées que leurs concurrentes étrangères. "On est structuré pour brûler 10 millions d'euros par an, alors que nos compétiteurs anglo-saxons sont organisés pour des sommes 10 à 30 fois supérieures", souligne Théau Peronnin, président et cofondateur de la start-up Alice & Bob. Des augmentations de capital d'un niveau supérieur semblent indispensables pour que les start-up tricolores puissent tenir leurs promesses.

- **Une tendance à la hausse**

Si les levées de fonds n'atteignent pas encore les montants en circulation aux États-Unis, elles se

montrent cependant plus fournies depuis 2021. Trois start-up ont récolté entre 8 et 16 millions d'euros (C12 Quantum Electronics, Quandela, Qubit Pharmaceuticals), et trois autres ont franchi la barre des 25 millions d'euros (Pasqal, Alice & Bob, Aqemia).

Cette tendance est amenée à se poursuivre avec l'engouement croissant des fonds – publics et privés – et des grands groupes pour le quantique. Audacia, société d'investissement française à l'origine du fonds spécialisé Quantonation, prévoit par exemple de lancer un deuxième dispositif de financement capable d'accompagner chaque start-up à hauteur de 10 à 50 millions d'euros.

Pasqal "veut lever des centaines de millions d'euros"

Cofondée en 2019 par le prix Nobel de physique Alain Aspect, Pasqal affiche clairement ses ambitions en 2022 : la start-up veut "passer à la vitesse supérieure et rivaliser avec ses concurrents américains" en levant plusieurs centaines de millions d'euros, pour poursuivre le développement de son ordinateur quantique, basé sur des processeurs à atomes neutres froids manipulés par laser. Elle compte atteindre les 100 qubits dès 2023. Depuis sa création, la société n'a effectué qu'une seule levée de fonds à hauteur de 25 millions d'euros en 2021. Elle a notamment convaincu Innovation Défense, le fonds du ministère des Armées, qui a effectué son premier investissement auprès d'elle. Pasqal peine néanmoins à trouver des investisseurs assez patients pour financer des projets dont les applications ne seront effectives qu'à moyen terme. "La pépite française n'aura sans doute d'autre choix que de se tourner vers des fonds américains et/ou asiatiques pour compléter l'apport des investisseurs européens", note *L'Usine Digitale* en octobre 2022.

Pasqal valorise pourtant son approche par atomes neutres lui permettant d'obtenir des "qubits parfaits", plus fiables que ceux de Google ou IBM. Pour convaincre de l'intérêt de ses travaux en attendant la commercialisation de son ordinateur quantique, la start-up multiplie les partenariats débouchant sur des usages concrets. Elle collabore ainsi avec EDF pour optimiser l'alimentation des bornes de recharge des véhicules électriques ; avec BMW pour étudier la déformation des matériaux ; avec le Crédit agricole dans le cadre de la gestion des risques des portefeuilles financiers. Pasqal propose aussi son offre quantique dans le cloud, pour que ses processeurs deviennent accessibles à des clients externes. Elle a signé deux partenariats, avec Atos en 2020 et Microsoft en 2022, pour déployer cette technologie.

Début 2022, l'entreprise a également acté sa fusion avec Qu&Co, une start-up néerlandaise active dans le logiciel quantique, qui compte parmi ses clients Airbus, Siemens ou Johnson & Johnson. Les deux entités misent sur leur complémentarité, hardware pour Pasqal et software pour Qu&Co, pour se démarquer et lutter plus efficacement contre la concurrence. "S'il n'y a pas une consolidation en Europe, on risque de se faire racheter les uns après les autres par les Américains", estime Georges-Olivier Raymond, CEO de Pasqal.

Amorcer la monétisation en investissant le monde professionnel

Les technologies quantiques s'inscrivent sur le temps long et le retour sur l'investissement dans les start-up n'aura pas lieu avant plusieurs années. Si les fonds amassés par le secteur s'affichent en croissance, cette situation fait tout de même craindre à Valérian Giesz, cofondateur Quandela, un "hiver quantique", soit "une période de désillusion après un emballement des investissements". Afin d'éviter cet effet néfaste et de pérenniser la dynamique, les jeunes sociétés doivent **commencer à diffuser leurs solutions sur le terrain et à cerner les enjeux économiques de leurs innovations**. "Des applications monétisables conçues en France commencent déjà à apparaître", assure le *Journal du Net* en septembre 2022. L'enjeu est double : **démontrer la pertinence des technologies quantiques auprès des clients** grâce à des utilisations concrètes, et réfléchir aux business models amenés à structurer l'activité.

- **Opter pour le quantique externalisé via le cloud**

Pour répondre aux besoins de clients déjà intéressés par le calcul quantique, certaines start-up s'appuient sur une logique d'externalisation de leurs machines. C'est notamment le cas de Pasqal et Quandela, dont **les processeurs quantiques peuvent être exploités dans le cloud**. Le paiement s'effectue à l'heure ou selon le nombre d'opérations réalisées. "Une manière de générer des revenus en attendant que le calculateur soit assez mature pour être vendu et installé chez des industriels. Et de donner accès à cette technologie – jamais rendue accessible en ligne – au plus grand nombre", détaille *L'Usine Nouvelle*. Les centres de calcul intensif représentent une cible privilégiée, mais d'autres prospects se montrent aussi concernés. Parmi ses clients, Pasqal compte par exemple le Crédit agricole ou Aramco, la compagnie nationale saoudienne d'hydrocarbures. Cette externalisation constitue un moyen pertinent pour **conquérir un nouveau**

public et le fidéliser au plus vite, en le familiarisant avec l'environnement logiciel et le langage de programmation propre à chaque machine.

- **Débuter la commercialisation de son offre quantique**

D'autres jeunes sociétés ont déployé leur offre quantique dans leur catalogue de vente, comme CryptoNext Security, spécialiste de la cybersécurité. "Nous disposons d'une solution déjà prête qui repose sur un ensemble d'outils logiciels de cryptographie post-quantique. Il permet aux organisations de **migrer leurs infrastructures vers des solutions hybrides résistantes au quantique**", explique Florent Grosmaître, CEO de la société. Celle-ci a implémenté ses outils chez Thales, ainsi que chez plusieurs acteurs du secteur de la défense et des banques, dans le cadre de projets pilotes européens et américains.

De son côté, Prevision.io, spécialisée dans la gestion de l'intelligence artificielle, a intégré une couche logicielle dédiée aux matériels quantiques dans sa gamme cloud, **alors que sa R&D poursuit ses travaux sur cette problématique**. En matière de hardware, WAINVAM-E, une start-up fabriquant des capteurs quantiques et des appareils métrologiques, a débuté la vente de ces derniers à l'automne 2021, notamment auprès des laboratoires de recherche.

- **S'engager dans des projets auprès d'industriels**

Pour déployer des usages concrets, éprouver ses technologies et séduire de potentiels partenaires, prendre part à des projets industriels représente une piste à explorer. C12 Quantum Electronics, qui travaille sur l'ordinateur quantique, a ainsi signé un contrat de développement avec le CNRS, Atos et Artelys, un spécialiste de solutions d'optimisation et de modélisation, pour mettre au point un coprocesseur quantique. "L'approche

collaborative prend tout son sens pour les développements de technologies complexes, comme les technologies quantiques. Seul un consortium a la capacité de développer en parallèle l'ensemble des couches d'un accélérateur quantique", estime Pierre Desjardins, cofondateur de C12 Quantum Electronics.

Pour Aqemia, editrice d'une plateforme de recherche pharmaceutique combinant intelligence

artificielle et quantique, un accord avait été passé avec Sanofi en 2020 afin de faire avancer la recherche de traitements contre le Covid-19. "C'est un jalon important car il s'agit de **notre premier contrat commercial avec un leader mondial** de la recherche de médicaments", se félicitait alors Maximilien Levesque, cofondateur de la start-up.

FOCUS START-UP

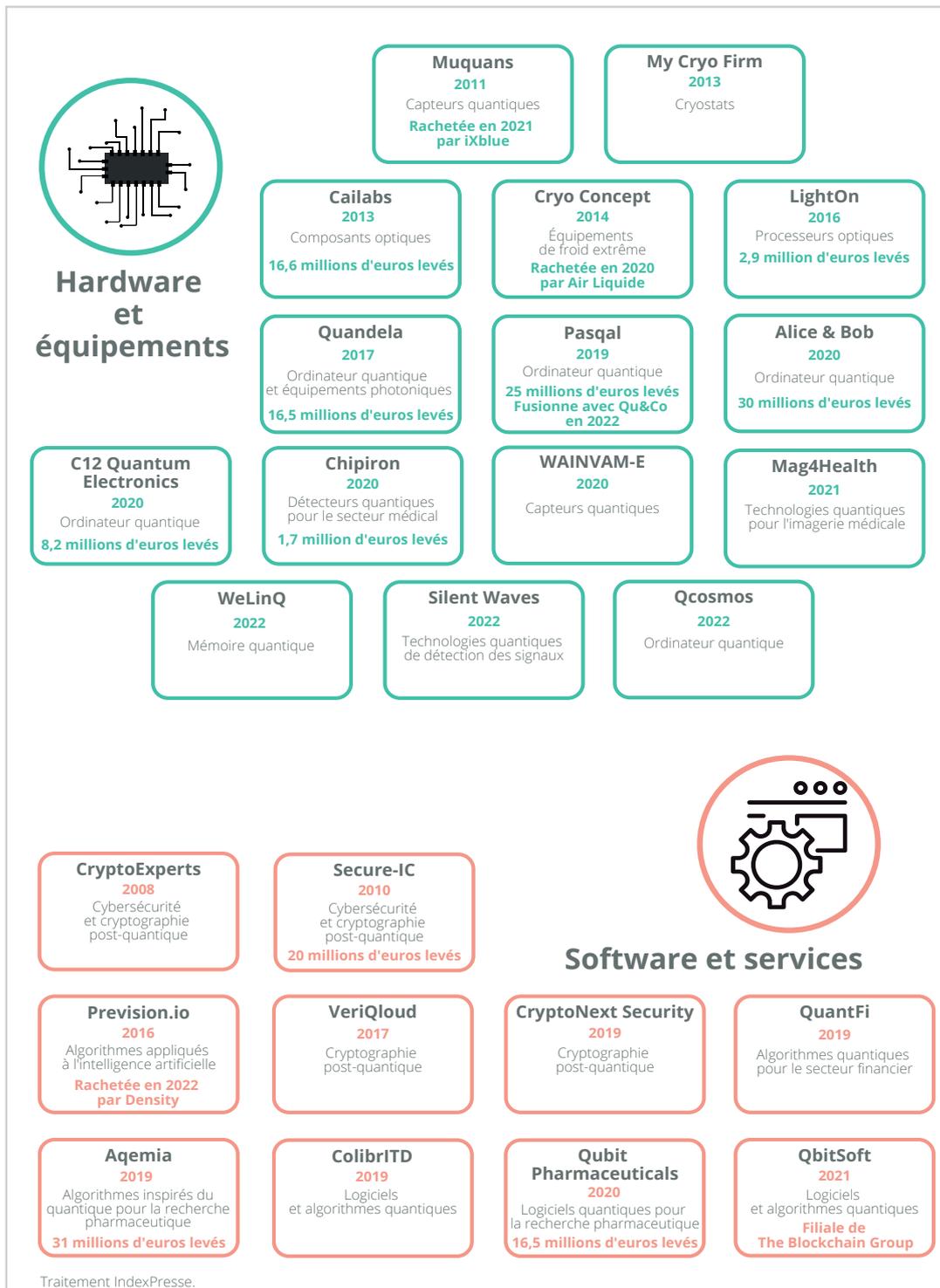
Quandela multiplie les projets, les produits et les débouchés

Une collaboration avec EDF pour modéliser des systèmes physiques à partir de l'informatique quantique ; une autre en compagnie de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales, afin de modéliser l'intérieur des champs de combustion pour les propulseurs des fusées ; une troisième chez une filiale d'Airbus, pour développer des matériaux plus légers et solides pour l'aviation. En parallèle, un partenariat avec OVHcloud pour héberger en open source son logiciel d'élaboration et d'exécution d'algorithmes quantiques, utilisé par des clients comme BMW. Quandela compte donc de nombreux projets en lien avec le monde professionnel. La start-up française née en 2017 s'impose comme l'une des plus avancées sur cet aspect.

Elle proposait initialement des générateurs de photons, vendus à des laboratoires académiques, puis s'est diversifiée vers la construction de son propre ordinateur quantique basé sur sa technologie photonique. Quandela a lancé deux premières machines dans le cloud à l'été 2022, accessibles pour 2 000 euros de l'heure. Ce déploiement n'empêche pas la start-up de rester fidèle à sa "stratégie de briques technologiques modulaires", dicit *L'Usine Nouvelle* : elle compte ajouter de nouveaux produits à son catalogue à l'avenir, comme un générateur de nombres aléatoires fondé sur l'intrication de plusieurs photons – service utile dans la cybersécurité, la simulation ou l'apprentissage machine – et une puce photonique capable de faire tourner des algorithmes quantiques variationnels. Cette multitude d'activités permet à Quandela de recenser plus de 1500 utilisateurs de ses technologies en 2022. L'année précédente, elle avait généré un chiffre d'affaires de 1 million d'euros.

Ses ambitions ont été confirmées par une deuxième levée de fonds conclue fin 2021, à hauteur de 15 millions d'euros. Quandela avait déjà récolté 1,5 million d'euros en 2020. La société va ainsi pouvoir continuer ses travaux sur son ordinateur quantique tout en maintenant son approche multi-segments. "Nous recrutons autant sur le côté hardware que sur le digital et les algorithmes", précise Valérian Giesz, cofondateur.

FORCES EN PRÉSENCE : LES START-UP FRANÇAISES ACTIVES DANS LE QUANTIQUE



LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
Air Liquide	Spécialiste des gaz industriels	France
Airbus	Constructeur aéronautique	Europe
Alibaba	Groupe du numérique	Chine
Alice & Bob	Start-up du domaine quantique	France
Alpha Blue Ocean	Fonds d'investissement	France
Amazon	Groupe du numérique	États-Unis
Aqemia	Start-up du domaine quantique	France
Aramco	Exploitant d'hydrocarbures	Arabie Saoudite
Artelys	Spécialiste de solutions d'optimisation et de modélisation	France
Atos	Groupe du numérique	France
Audacia	Fonds d'investissement	France
Aurea	Entreprise spécialisée dans la photonique	France
Azuright Systems	Entreprise spécialisée dans la photonique	France
Baidu	Groupe du numérique	Chine
Bayer	Groupe de l'industrie chimique	Allemagne
Bluefors	Spécialiste de la cryogénie	États-Unis
BMW	Constructeur automobile	Allemagne
C12 Quantum Electronics	Start-up du domaine quantique	France
Cailabs	Start-up du domaine quantique	France
Cambridge Quantum Computing	Start-up du domaine quantique	Royaume-Uni
Chipiron	Start-up du domaine quantique	France
ColibrITD	Start-up du domaine quantique	France
Crédit Agricole	Groupe bancaire	France
CryoConcept	Spécialiste de la cryogénie	France
CryptoExperts	Start-up de la cybersécurité et du quantique	France
CryptoNext Security	Start-up du domaine quantique	France
Density	Spécialiste de la mesure, de l'analyse et de l'optimisation de l'espace physique	États-Unis
Deutsche Telekom	Opérateur télécom	Allemagne
Draper Esprit	Fonds d'investissement	Royaume-Uni
D-Wave	Entreprise du secteur quantique	Canada
EDF	Énergéticien	France
Elaia	Fonds d'investissement	France
GlobalFoundries	Fabricant de semi-conducteurs	États-Unis
GLOphotonics	Entreprise spécialisée dans la photonique	France
Google	Groupe du numérique	États-Unis
Honeywell	Groupe d'ingénierie	États-Unis
Huawei	Groupe du numérique	Chine
Hyperion Research	Cabinet d'études de marché	États-Unis
IBM	Groupe du numérique	États-Unis
ID Quantique	Société spécialisée dans le secteur quantique	Suisse
Innovation Défense	Fonds d'investissement	France
Intel	Spécialiste de l'électronique	États-Unis
IonQ	Start-up du domaine quantique	États-Unis
ISARA Corp	Start-up du domaine quantique	Canada
iXblue	Groupe d'ingénierie	France
Janssen	Laboratoire pharmaceutique	Belgique
Johnson & Johnson	Laboratoire pharmaceutique	États-Unis
JP Morgan Chase	Groupe bancaire	États-Unis
Kets Quantum Security	Start-up du domaine quantique	Royaume-Uni
KPMG	Cabinet de conseil	États-Unis
Kylia	Entreprise spécialisée dans les composants optiques	France
LightOn	Start-up du domaine quantique	France
Lumibird	Entreprise spécialisée dans la photonique	France
Lytid	Entreprise spécialisée dans la photonique	France
Mag4Health	Start-up du domaine quantique	France
Marketsandmarkets	Cabinet d'études de marché	États-Unis
Microsoft	Groupe du numérique	États-Unis
Multiverse Computing	Start-up du domaine quantique	Espagne
Muquans	Start-up du domaine quantique	France

LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
My Cryo Firm	Start-up du domaine quantique	France
Naval Group	Groupe de défense	France
Nvidia	Fabricant de processeurs, cartes et puces graphiques	États-Unis
Omnes Capital	Gestionnaire d'actifs et de patrimoine	France
Orano	Entreprise spécialisée dans le nucléaire	France
Oroliia	Spécialiste des capteurs	France
Oséo	Société de financement	France
OVHcloud	Entreprise de services technologiques	France
Pasqal	Start-up du domaine quantique	France
Phystech Ventures	Fonds d'investissement	États-Unis
Plassys Bestek	Entreprise spécialisée dans les solutions pour semi-conducteurs	France
Prevision.io	Start-up de l'intelligence artificielle et du quantique	France
PsiQuantum	Start-up du domaine quantique	États-Unis
QbitSoft	Start-up du domaine quantique	France
Qcosmos	Start-up du domaine quantique	France
QC-Wave	Start-up du domaine quantique	États-Unis
Qnami	Start-up du domaine quantique	Suisse
Qphox	Start-up du domaine quantique	Pays-Bas
Qu&Co	Start-up du domaine quantique	Pays-Bas
Quandela	Start-up du domaine quantique	France
QuantFi	Start-up du domaine quantique	France / États-Unis
Quantonation	Fonds d'investissement	France
Quantum Benchmark	Start-up du domaine quantique	Canada
Quantum Valley Investments	Fonds d'investissement	Canada
Quantum Ventures	Fonds d'investissement	États-Unis
Qubit Pharmaceuticals	Start-up du domaine quantique	France
Qunnect	Start-up du domaine quantique	États-Unis
Radiall	Entreprise spécialisée dans les câblages	France
Riber	Entreprise spécialisée dans les solutions pour semi-conducteurs	France
Rigetti	Start-up du domaine quantique	États-Unis
Sanofi	Laboratoire pharmaceutique	France
Secure-IC	Start-up de la cybersécurité et du quantique	France
Servier	Laboratoire pharmaceutique	France
Siemens	Groupe d'ingénierie et de fabrication d'équipements divers	Allemagne
Silent Waves	Start-up du domaine quantique	France
Silentsys	Entreprise spécialisée dans la photonique	France
Silex Insight	Fournisseur de blocs d'IP pour la sécurité embarquée	Belgique
SNCF	Groupe de transport	France
Spark Lasers	Entreprise spécialisée dans la photonique	France
SpeQtral	Start-up du domaine quantique	Singapour
Summer Capital	Fonds d'investissement	Pays-Bas
Supernova Invest	Fonds d'investissement	France
Syrlinks	Spécialiste des capteurs	France
Telefonica	Opérateur télécom	Italie
Tencent	Groupe du numérique	Chine
Tesla	Constructeur automobile	États-Unis
Thales	Groupe d'électronique et de défense	France
Total	Énergéticien	France
VeriQloud	Start-up du domaine quantique	France
Volkswagen	Constructeur automobile	Allemagne
WAINVAM-E	Start-up du domaine quantique	France
WeLinQ	Start-up du domaine quantique	France
Xanadu	Start-up du domaine quantique	Canada
XAnge	Fonds d'investissement	France
Zapata Computing	Start-up du domaine quantique	États-Unis

Traitement IndexPresse.

LEXIQUE

- **Cryogénie**

Domaine regroupant l'étude et la production des basses températures, soit celles inférieures à -150°C .

- **Cryostats**

Appareil permettant d'obtenir des températures cryogéniques.

- **Cryptographie**

Discipline axée sur la protection des informations par le biais de clés de chiffrement. Ses objectifs sont la préservation de la confidentialité, de l'authenticité et de l'intégrité des données.

- **Cryptographie post-quantique**

Systèmes cryptographiques prenant en compte la possibilité d'un déchiffrement ou d'une attaque réalisés par un ordinateur quantique.

- **Deeptech**

Technologie profonde. Désigne les technologies fortement liées à la recherche, présentant un temps de développement relativement long et apportant une innovation de rupture.

- **HPC**

High performance calculation. Désigne les supercalculateurs en informatique classique, des ordinateurs affichant une puissance de calcul considérable en s'appuyant sur les propriétés des bits standards.

- **Informatique quantique**

Informatique reposant sur les lois de la mécanique quantique, permettant l'émergence d'ordinateurs plus puissants où les calculs sont effectués à l'échelle atomique.

- **NISQ**

Noisy intermediate-scale quantum. Fait référence à une approche graduelle et souvent hybride du quantique, permettant de profiter de certains de ses avantages de façon incrémentale sur des projets de moyenne envergure.

- **Photonique**

Discipline renvoyant à la maîtrise et à l'utilisation des photons, c'est-à-dire des particules de lumière.

- **Qubit**

Plus petite unité de stockage d'information quantique. Le qubit présente de grandes différences avec le bit de l'informatique classique (valeur différente de 0 ou 1, plusieurs valeurs simultanées, etc.).

- **Recherche fondamentale**

Recherche théorique et expérimentale destinée à acquérir des connaissances sur des faits et phénomènes observables, sans application directe à court terme.

SOURCES UTILISÉES

- Bergounhoux Julien, "Honeywell lance la commercialisation de son ordinateur quantique 'le plus puissant au monde'", *usine-digitale.fr*, 4 mars 2020
- Bivès Arnaud, "Air Liquide s'empare d'un spécialiste de la cryogénie extrême", *boursier.com*, 25 septembre 2020
- Carrière Florian, "L'informatique quantique : prêts pour le grand saut ?", *Wavestone*, 22 octobre 2019
- Chotard Michel, "La technologie quantique avance au pas de course", *L'Informaticien*, avril 2022, p.26-27
- Cimino Valentin, "IBM veut porter ses ordinateurs quantiques à plus de 4000 qubits d'ici 2025", *siecdigital.fr*, 10 novembre 2022
- Clapaud Alain, "CryptoNext Security bascule le chiffrement dans l'ère post-quantique", *IT for Business*, octobre 2022, p.46
- Clapaud Alain, "L'heure du quantique", *L'Informaticien*, juillet-août 2021, p.42-47
- Clapaud Alain, "Que sera la cybersécurité en 2030 ?", *IT for Business*, octobre 2022, p.51-53
- Cooney Michael, "IBM poursuit sa route dans l'informatique quantique", *lemondeinformatique.fr*, 10 novembre 2022
- Corot Léna, "Alice & Bob lève 27 millions d'euros pour développer un ordinateur quantique avec des 'qubits parfaits'", *usine-digitale.fr*, 10 mars 2022
- Corot Léna, "Atos inaugure un centre de R&D sur l'informatique quantique, l'IA et la cybersécurité", *usine-digitale.fr*, 22 avril 2021
- Corot Léna, "Pasqal, la pépite française du quantique, veut lever des centaines de millions d'euros", *usine-digitale.fr*, 14 octobre 2022
- Corot Léna, "Quandela se rapproche d'OVHcloud pour mettre à disposition son ordinateur quantique", *usine-digitale.fr*, 14 juin 2022
- Couto Alexandre, "Les *deeptechs*, puissant moteur d'innovation", *Industrie & Technologies*, septembre 2022, p.28-35
- Dedieu Émilie, "Au QTech de l'Onera, les atomes froids sont au cœur des capteurs", *Industrie & Technologies*, septembre 2022, p.18-19
- Du Guerny Stanislas, "Secure-IC lève 20 millions d'euros pour protéger les objets connectés des cyberattaques", *lesechos.fr*, 20 janvier 2022
- El Hamidi Ali, "Crédit Agricole CIB franchit une étape dans l'exploration de l'informatique quantique", *Revue Banque*, septembre 2021, p.76-77
- Ezratty Olivier, "Écosystème quantique en France et dans le monde", *Société informatique de France*, novembre 2021, p.43-57
- Fassot Frédéric, "Thales Alenia Space expérimente des communications quantiques par satellite avec SpeQtral", *vipress.net*, 20 septembre 2022
- Fontaine Gilles Loubière Paul, "Le quantique tricolore roule des mécaniques", *Challenges*, 13 octobre 2022, p.48-49
- Gros Maryse, "Un consortium privé défend les intérêts du quantique en Europe", *lemondeinformatique.fr*, 19 avril 2021
- Houzelle Chantal, "Aqemia mobilise 30 millions d'euros pour devenir la pharma 3.0", *lesechos.fr*, 19 octobre 2022
- Houzelle Chantal, "Qubit Pharmaceuticals lève 16 millions pour sa technologie de 'drug discovery' quantique", *lesechos.fr*, 10 juin 2022

SOURCES UTILISÉES

- Karayan Raphaële, "Le réseau européen de communications quantiques a son plan de marche", *usine-digitale.fr*, 9 décembre 2021
- Landry Pierre, "Le Plan quantique devrait stimuler les entreprises françaises", *IT for Business*, février 2021, p.16
- Landry Pierre, "Le quantique en phase de qualification dans les entreprises", *IT for Business*, juillet-août 2021, p.18
- Larousserie David, "Une nouvelle vague de start-up françaises déferle dans la technologie quantique", *lemonde.fr*, 17 février 2022
- Lausson Julien, "Intel mobilise 50 millions de dollars pour l'informatique quantique", *numerama.com*, 8 septembre 2015
- Leconte Marc, "Atos : un européen dans la course de l'informatique quantique", *Revue de l'Électricité et de l'Électronique*, 2021, p.15-17
- Leconte Marc, "Informatique quantique : le programme et la stratégie de Google", *Revue de l'Électricité et de l'Électronique*, 2021, p.36-38
- Leconte Marc, "La course d'IBM aux qubits", *Revue de l'Électricité et de l'Électronique*, 2022, p.8-9
- Leconte Marc, "L'informatique quantique : le programme et la stratégie d'IBM", *Revue de l'Électricité et de l'Électronique*, 2021, p.20-24
- Lelièvre Adrien, "Aqemia, le *deeptech* qui a séduit Sanofi", *lesechos.fr*, 17 décembre 2020
- Lelièvre Adrien, "Quantique : Alice & Bob lève 27 millions d'euros", *lesechos.fr*, 11 mars 2022
- Lelièvre Adrien, "Quantique : Pasqal fusionne avec Qu&Co pour conquérir l'Europe", *lesechos.fr*, 11 janvier 2022
- Loubière Paul, "La révolution quantique", *Challenges*, 12 mai 2021, p.56-65
- Loukil Ridha, "Intel fait un bond en avant dans le calcul quantique avec une puce de 17 qubits", *usinouvelle.com*, 11 octobre 2017
- Manens François, "Ordinateur quantique : Amazon met les bouchées doubles pour combler son retard", *latribune.fr*, 28 octobre 2021
- Marcaillou Laurent, "Thales à la pointe des capteurs et des communications quantiques", *lesechos.fr*, 25 mai 2021
- Meddah Hassan, "La cryptographie, déjà à l'ère post-quantique", *L'Usine nouvelle*, juillet-août 2021, p.12-13
- Moragues Manuel, "La seconde révolution quantique s'inscrit dans le balancier entre recherche fondamentale et technologie", *Industrie & Technologies*, mai 2022, p.6-9
- Moragues Manuel Virol Gautier, "Les pépites. Quantique", *L'Usine nouvelle - Cahier spécial*, juin 2021, p.16-17
- Poireault Kevin, "Calcul quantique. La course reste ouverte", *Industrie & Technologies*, février 2021, p.18-33
- Poireault Kevin, "Explorer les usages des premières machines quantiques", *Industrie & Technologies*, septembre 2022, p.44-49
- Poireault Kevin, "Plan quantique. Enfin lancé !", *Industrie & Technologies*, mars 2021, p.10
- Renouard Guillaume, "Les start-up quantiques françaises passent à leur phase commerciale", *journaldunet.com*, 23 septembre 2022
- Rolland Sylvain, "Comment Qubit Pharmaceuticals compte accélérer la découverte de nouveaux médicaments grâce au quantique", *latribune.fr*, 10 juin 2022
- Russell John, "PsiQuantum's Path to 1 million Qubits", *hpcwire.com*, 21 avril 2022

Sacco Laurent, "D-Wave Two, l'ordinateur censément quantique, rate un test", *futura-sciences.com*, 23 juin 2014

Serra Yann, "On a enfin compris à quoi correspondait le volume quantique d'IBM", *lemagit.fr*, 24 septembre 2020

Terrasson Benjamin, "En Chine, un appareil quantique 10 milliards de fois plus rapide que celui de Google", *siecldigital.fr*, 11 décembre 2020

Thouverez Pierre, "Notre façon de prédire l'interaction et l'affinité est unique au monde", *techniques-ingenieur.fr*, 25 janvier 2021

Van der Feer Julien, "Quandela, la start-up qui veut devenir le Nvidia quantique", *beaboss.fr*, 18 janvier 2022

Vialatte Hubert, "La feuille de route d'Atos vers le calcul quantique", *lesechos.fr*, 19 mai 2021

Virol Gautier, "La start-up française Quandela lève 15 millions d'euros pour son ordinateur quantique à photons", *usinenouvelle.com*, 16 novembre 2021

Virol Gautier, "Le logiciel, face cachée du calcul quantique", *L'Usine nouvelle*, janvier 2022, p.86-89

Virol Gautier, "Le silicium, nouvelle voie du calcul quantique", *L'Usine nouvelle*, juillet-août 2022, p.12-13

Virol Gautier, "Pasqal, le pari des atomes froids", *L'Usine nouvelle*, avril 2021, p.16-17

"12 start-up CEA primés lors des concours d'innovation i-Lab et i-Nov", *cea.fr*, 6 juillet 2022

"Atos crée un centre d'informatique quantique au Brésil", *zonebourse.com*, 5 mai 2021

"C12 Quantum : résoudre les problèmes industriels complexes", *Challenges.fr*, 25 mars 2021

"C12 Quantum, Artelys, Atos et le CNRS financés pour le projet Quarbone", *systemic-paris-region.org*, 8 mars 2021

"Comment se former à l'informatique quantique ?", *L'Informaticien*, octobre 2021, p.75-78

"Conception de médicaments accélérée par la physique quantique", *Informations entreprise*, octobre 2021, p.68-69

"Deux levées de fonds en vue pour Wainvam-E", *agence-api.ouest-france.fr*, 16 juin 2022

"IonQ obtient un contrat pour fournir des solutions quantiques au laboratoire de recherche de l'armée de l'air américaine", *i-actu.com*, 30 septembre 2022

"La stratégie quantique française", *Sénat*, 20 janvier 2022

"Laboratoire Qtech, les technologies quantiques appliquées à l'aérospatiale", *Le nouvel Économiste*, 22 avril 2022, p.25

"L'ordinateur quantique de Pasqal arrive sur le cloud de Microsoft", *usinenouvelle.com*, 14 mai 2022

"Orano va produire en France des isotopes stables, forme d'atomes aux multiples applications", *lefigaro.fr*, 11 octobre 2021

"Pasqal, le rêve américain devient réalité", *lesdeeptech.fr*, 12 octobre 2022

"Quantique : le fonds Quantonation boucle un premier closing de 20 millions d'euros", *frenchweb.fr*, 4 mars 2021

"Quantique. Quand les start-up mènent la danse", *Industrie & Technologies*, septembre 2022, p.34-35

"Rigetti Announces New Partnerships, Provides Business Updates at Inaugural Investor Day", *globenewswire*, 16 septembre 2022

"Secure-IC acquiert l'activité de sécurité de Silex Insight pour accélérer sa stratégie 'chip-to-cloud' et développer la prochaine génération de solutions de cybersécurité embarquées", *itespresso.fr*, 3 novembre 2022

"Xanadu Secure \$100 in Series C", *photonics.com*, 14 novembre 2022

La collection IndexPresse *Business Etude*

Comment accéder à des données fiables, pertinentes et surtout synthétisées, alors que l'information n'a jamais été aussi accessible en apparence ?

Voilà une question à laquelle sont confrontés quotidiennement les décideurs dans les entreprises lorsqu'il s'agit de prendre les bonnes décisions.

C'est pourquoi nous avons créé la collection **IndexPresse Business Etude**, des études sectorielles complètes, réalisées à partir des plus grands titres de la presse

économique et professionnelle. En s'appuyant sur des informations fiables et de qualité, les études d'IndexPresse offrent des synthèses analytiques et éclairées sur les secteurs d'activité émergents ou en mutation.

Vous aurez ainsi toutes les clés en main pour accompagner votre réflexion stratégique, en vous appuyant sur l'examen des enjeux de votre marché, afin d'anticiper ses évolutions et valider, ou modifier, votre positionnement dans le jeu concurrentiel.

IndexPresse *Business Etude*

Date de parution - novembre 2022.



Renaud HAMMAMY

renaud.hammany@indexpresse.fr

Auteur

Étude rédigée en collaboration avec Samuel ARNAUD

Les récents progrès dans le domaine quantique, longtemps resté confidentiel, reflètent le potentiel de développement considérable du marché. État, grands groupes du numérique, start-up, centres de recherche : tous se mobilisent pour soutenir la filière française tant les enjeux semblent importants en termes de compétitivité et de sécurité. Alors que la plupart des technologies quantiques n'ont pas encore d'applications concrètes, investisseurs et entreprises s'intéressent au secteur de façon croissante, laissant entrevoir une multitude d'opportunités tant pour les utilisateurs futurs que pour les acteurs émergents.

Quelles sont les principales technologies déployées pour former des qubits ? Le calcul et les ordinateurs quantiques constituent-ils le seul segment de marché ? En quoi le positionnement français varié (supraconducteurs, atomes froids...) représente-t-il un avantage pour la filière ? Dans quelle mesure la maîtrise de technologies comme la photonique ou la cryogénie est-elle nécessaire pour innover dans le quantique ? Quels moyens mettent en œuvre les États pour soutenir le secteur ? Pourquoi l'externalisation des capacités quantiques et les plateformes cloud s'imposent-elles comme un modèle incontournable ? Le manque de spécialistes et d'initiatives au sein des entreprises françaises incarne-t-il le seul défi auquel fait face la filière ?

Cette étude apporte des éléments de réponse et de réflexion pour comprendre les enjeux et les perspectives du secteur, décrypter les modèles de développement à potentiel et identifier les orientations stratégiques pour se positionner dans le jeu concurrentiel.

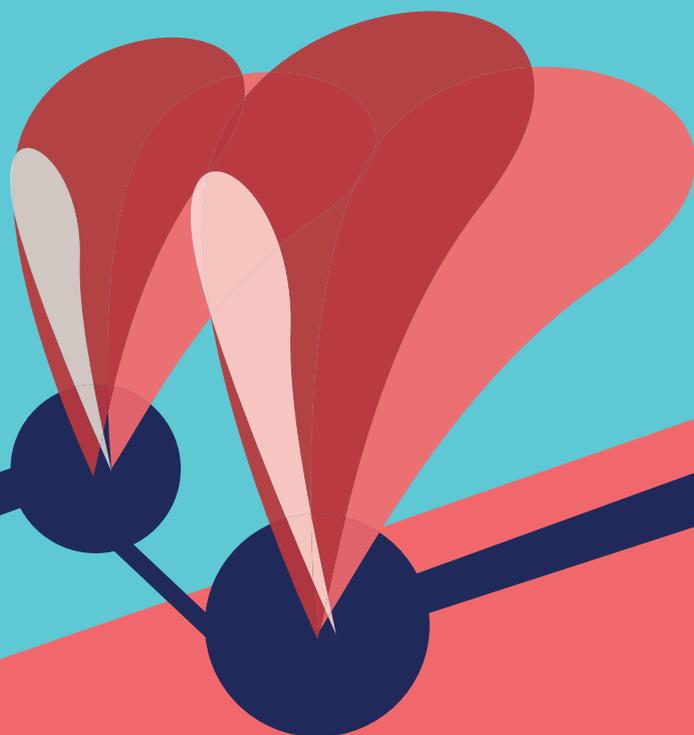


Photo de couverture : ©Siarhei

