



Écosystème quantique en France et dans le monde

Olivier Ezratty¹

L'informatique quantique, au sens large, est un domaine technologique stratégique pour diverses raisons. En cryptographie, la souveraineté des États est en jeu avec la protection des communications sensibles. L'informatique quantique a des applications critiques et pourrait étendre le champ du possible au-delà de ce qui est réalisable aujourd'hui en informatique classique, notamment dans les domaines de la santé, de l'environnement et de l'intelligence artificielle.

En termes de maturité, les cryptographies quantique et post-quantique représentent des domaines plus établis avec des acteurs économiques et des solutions commerciales, même si la normalisation de la cryptographie post-quantique n'est pas encore achevée. Cependant, elle comporte moins d'inconnues scientifiques et techniques que l'informatique quantique.

La faisabilité d'ordinateurs quantiques utiles sur le plan commercial reste une question ouverte. D'importants défis technologiques sont à relever, notamment l'épineuse question du bruit des qubits, de la correction d'erreurs quantiques et des technologies permettant d'augmenter le nombre de qubits physiques de plusieurs ordres de grandeur. L'informatique quantique est donc pleine d'incertitudes scientifiques et technologiques, avant même d'être économiques et commerciales.

Pour l'instant, la recherche est principalement financée par les gouvernements dans la plupart des pays, puis par de très grands acteurs informatiques qui font de

1. Consultant et auteur, notamment des ouvrages de référence « Comprendre l'informatique quantique » (septembre 2020) et sa version actualisée en anglais *Understanding Quantum Technologies* (septembre 2021), diffusés gratuitement en PDF. Il anime aussi deux séries de podcast (*Quantum et Decode Quantum*) avec Fanny Bouton, olivier@oezratty.net.

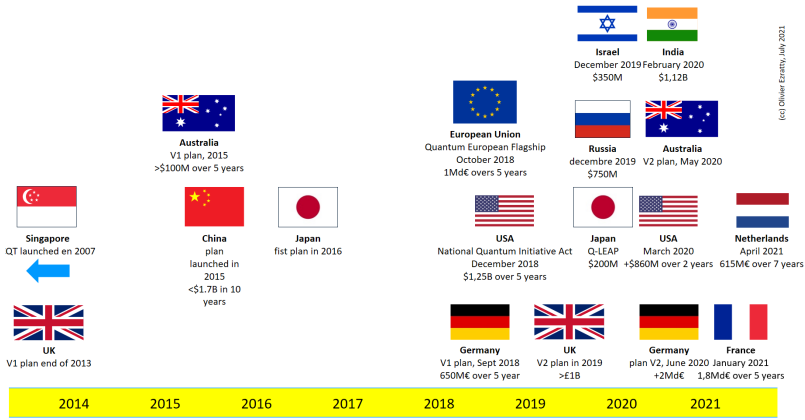












FIGURE 1. Investissements mondiaux en informatique quantique depuis 2014.

nombreux paris technologiques en parallèle (Google , Intel , Microsoft , IBM , Alibaba), et enfin par quelques startups plus ou moins bien financées, principalement en Amérique du Nord (D-Wave, IonQ , Rigetti, PsiQuantum) et, de plus en plus, en Europe (IQM, Pasqal, C12).

Le domaine des logiciels pour ordinateurs quantiques n’en est pour sa part qu’à ses débuts. Les principaux acteurs et startups créant des ordinateurs quantiques ont tous investi dans les logiciels, en commençant par les outils de développement et la création d’algorithmes quantiques valorisant leur matériel. Chacun vise évidemment à créer des plateformes logicielles de premier plan dont certaines sont déjà disponibles dans le cloud, comme celles d’IBM, d’Amazon, de Microsoft et de D-Wave. La plupart de ces acteurs, ainsi qu’Atos, offrent un accès en cloud à des émulateurs quantiques tournant sur des ordinateurs classiques.

Investissements mondiaux

Les États-Unis et la Chine sont évidemment en tête des investissements publics dans les technologies quantiques (cf. figure 4), avec une bonne part qui finance la recherche fondamentale. La répartition de ces investissements, qui comprennent à la fois la cryptographie quantique, les ordinateurs quantiques et les capteurs quantiques, intrigue les autres pays. Les technologies quantiques sont devenues un enjeu géopolitique, presque comme la dissuasion nucléaire. Les pouvoirs publics de ces différents pays se sont mobilisés de manières très différentes sur les technologies quantiques.

	COUNTRY	TP	%TP	TC	%TC	CPP	RCI	%ICPEI
1	 USA	4,295	26.4%	108,128	44.8%	25.2	1.7	70%
2	 China	3,706	22.8%	38,611	16.0%	10.4	0.7	44%
3	 UK	1,428	8.8%	32,435	13.4%	22.7	1.5	120%
4	 Germany	1,400	8.6%	38,339	15.9%	27.4	1.9	123%
5	 Japan	1,106	6.8%	20,996	8.7%	19.0	1.3	99%
6	 Canada	1,056	6.5%	23,104	9.6%	21.9	1.5	124%
7	 India	991	6.1%	5,847	2.4%	5.9	0.4	33%
8	 Australia	777	4.8%	20,777	8.6%	26.7	1.8	130%
9	 France	699	4.3%	14,016	5.8%	20.1	1.4	117%
10	 Italy	635	3.9%	10,522	4.4%	16.6	1.1	116%
Total 10 countries		16,093	98.9%	312,775	129,5%	19.4	1.3	83.1%
Total world		16,279		241,536		14.8		

*TP= Total Publication ; TC = Total Citation ; CPP = Citation par Publication = TC/TP ;
RCI = Relative Citation Index ; ICPEI = International Collaboration Publication Extended Index

FIGURE 2. Montant des investissements mondiaux par pays.

La plupart des gouvernements des pays développés ont coordonné les efforts dans le domaine quantique avec des plans allant jusqu'à deux milliards de dollars sur 5 ou 10 ans. Il est cependant difficile de comparer ces investissements entre pays. En cause, la prise en compte ou l'absence de prise en compte des investissements existants, les investissements non divulgués dans l'armée et le renseignement, et l'éventuel embellissement de la mariée comme c'est le cas avec la Chine qui communique souvent des montants agrégeant les technologies quantiques et d'autres technologies comme l'intelligence artificielle.

Une évaluation des publications scientifiques en informatique quantique réalisée par des étudiants de l'Insead en 2018 a montré sans surprise que les USA, le Canada et la Chine sont les premiers pays à publier². Une analyse plus détaillée a été produite par Michel Kurek en septembre 2020 (cf. figure 2) qui a permis de relativiser l'influence des publications chinoises³. En effet, le nombre de citations par publications est très faible en Chine et en Inde, comparé à tous les pays occidentaux. Les

2. <https://www.insead.edu/sites/default/files/assets/dept/centres/gpei/docs/insead-student-quantum-computing-investment-analysis-apr-2018.pdf>.

3. https://www.researchgate.net/publication/350453567_Quantum_Technologies_Patents_Publications_Investissements_Landscape.

investissements importants réalisés par les pays développés dans les technologies quantiques font craindre que la puissance de calcul ne finisse par se concentrer entre les mains de quelques-uns, voire d'un seul pays ou d'une seule entreprise. Je ne le crois pas, du moins pas dans la phase initiale de développement de ces technologies. Les connaissances sur le sujet sont très distribuées, tout comme les technologies habilitantes et les matériaux stratégiques. Je situerais plutôt le risque de concentration dans une deuxième phase de maturation de ce marché, qui verra un marché initialement fragmenté avec de nombreux acteurs se concentrer par consolidation comme c'est généralement le cas dans le numérique. Elle le fera probablement pour des raisons plus macro-économiques que scientifiques ou technologiques, par des économies d'échelle et la « plateformesisation » des offres. Cela explique pourquoi il est nécessaire de surveiller simultanément le matériel, les outils de développement et les applications logicielles de l'informatique quantique.

Une fois les principales hypothèses scientifiques et technologiques levées, le succès de chaque entreprise et pays dépendra des facteurs clés de succès classiques des écosystèmes technologiques : rapidité d'exécution, qualité des équipes, niveau de financement, marketing, communication, vente et promotion des plateformes technologiques adoptées par un maximum d'acteurs et à l'échelle mondiale. C'est là que des approches souverainistes combinant le protectionnisme des acteurs clés tout en assurant une ouverture commerciale maximale sur le monde pour leur permettre de réaliser des économies d'échelle devront être soigneusement adaptées.

La figure 3 montre quels pays maîtrisent le mieux les différentes technologies de calcul quantique par type de qubit. Globalement, nous avons un bon équilibre entre les États-Unis et l'Union européenne, même si les États-Unis ont l'avantage d'avoir de grands fournisseurs informatiques investis dans le domaine des supraconducteurs (Google, IBM), du silicium (Intel), des ions piégés (Honeywell) et des qubits topologiques (Microsoft).

Quels sont les principaux indicateurs de réussite des pays qui investissent dans la course quantique ?

Des cabinets d'analystes vont probablement créer leur propre classements quantiques « de Shanghai » en utilisant des mesures composites : financement public, publications scientifiques, brevets et autres, esprit d'entreprise, nombre de startups, financement des startups, investissements des grandes entreprises, adoption par les entreprises, main-d'œuvre qualifiée, etc. Devinez quoi ? Les États-Unis et la Chine seront probablement classés premiers. Et les petits pays derrière dans un ordre variable. Mais que se passerait-il si l'Europe était consolidée ? Elle serait probablement positionnée entre les USA et la Chine.

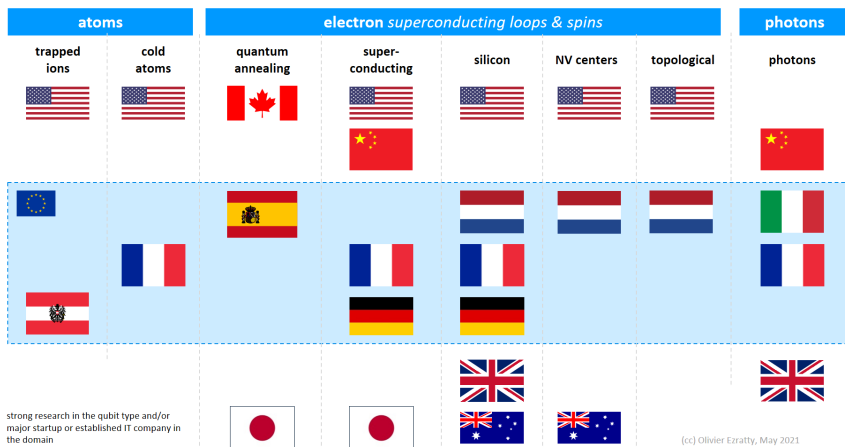


FIGURE 3. Maîtrise des technologies par les pays.

Écosystème entrepreneurial

Les entreprises des technologies quantiques sont à la fois des startups, des PME établies et de grandes entreprises du numérique qui s’y sont lancées dans une approche de diversification.

La cartographie de ces acteurs est un peu plus facile que pour d’autres technologies telles que l’intelligence artificielle, car ils ne sont pas encore très nombreux. On en dénombre aujourd’hui plus de 450 dans le monde avec un peu moins de trois milliards de dollars de levées de fonds depuis leur création ce qui est, somme toute, modeste.

Cet écosystème a commencé à prendre forme avant même que les ordinateurs quantiques ne fonctionnent à petite échelle. Il est fascinant de découvrir des startups qui font des paris à long terme, en particulier dans le domaine du matériel. Les startups logicielles s’appuient sur une infrastructure matérielle encore limitée mais réduisent souvent leurs risques en prenant également en charge les architectures informatiques traditionnelles. Leurs clients sont de grandes entreprises qui testent des algorithmes à petite échelle, souvent sur des calculateurs à recuit quantique de D-Wave et parfois avec IBM qui est très pressant dans ses efforts d’évangélisation quantique. À ce jour, aucune application ne semble avoir été déployée en production. Nous sommes donc dans le domaine de la recherche appliquée et du prototypage à petite échelle au sein des entreprises utilisatrices.

De leur côté, les systèmes de cryptographie quantique sont opérationnels et correspondent à un marché bien distinct, tout comme le marché très fragmenté des capteurs quantiques.

Les startups sont pour la plupart américaines et européennes. L'écosystème logiciel est à suivre de près. Il se développera probablement lorsque le matériel fonctionnera à plus grande échelle, notamment avec les ordinateurs bruités de première génération (*Noisy Intermediate Scale Quantum Computers* ou NISQ) et les simulateurs quantiques.

Les enjeux de nombreuses startups dans ce domaine sont communs avec ceux des deep techs : comment développer de vrais produits avec des économies d'échelle, comment se développer rapidement à l'international, comment ne pas tomber dans des modèles trop « serviciels », et comment résister à ce que certains appellent déjà l'hiver quantique, une période de perte d'intérêt pour le sujet que certains anticipaient en 2020 mais qui n'a finalement pas encore eu lieu. Dans le créneau des technologies habilitantes (sources de photons, cryostats, ultravide, divers capteurs, électronique), les startups et PME concernées s'en sortent bien en touchant des marchés diversifiés, ciblant notamment plusieurs branches différentes de la recherche ou des applications militaires ou aérospatiales.

Investisseurs et startups

Les premiers fonds d'investissement plus ou moins spécialisés dans les technologies quantiques ont déjà vu le jour. Le plus connu est français ! Quantonation est un fonds d'amorçage français créé par Charles Beigbeder et géré par Christophe Jurczak, un physicien et ancien thésard d'Alain Aspect passé ensuite par le secteur privé, notamment aux USA. Ils ont déjà investi dans une douzaine de startups dont Pasqal (France, calculateurs quantiques à base d'atomes froids), Quantum Benchmark (Canada, logiciel), Kets Quantum Security (UK, composants dans la cryptographie quantique), Orca Computing (UK, calcul photonique), CryptoNext Security (France, logiciels de cryptographie post-quantique), Qunnect (États-Unis, répéteurs pour QKD), Quandela (France, source de photons uniques), Qubit Pharma (simulation moléculaire), Qnami (Suisse, métrologie quantique exploitant des centres NV, aussi appelées cavités dans des diamants), Orca Computing (Royaume-Uni, qubits photoniques) et Qphox (Pays-Bas, communications entre ordinateurs quantiques). Il est aujourd'hui le principal animateur de l'écosystème des entreprises quantiques en France avec le Lab Quantique, qui a été créé conjointement avec Bpifrance. Le fait d'avoir un fonds d'amorçage français qui investit aussi à l'international est un véritable atout pour la France.

Quantum Valley Investments (QVI) est un fonds d'investissement canadien de 100 millions de dollars, levé en 2013, dédié aux technologies quantiques. Leurs fondateurs avaient investi en 1984 dans Blackberry/RIM. Ils ne divulguent pas leurs



FIGURE 4. Répartition des investissements par pays.

investissements, sauf dans ISARA Corporation, dont une partie sont des *spin-offs* du laboratoire de recherche canadien *Institute for Quantum Computing* de l'université de Waterloo en Ontario.

D'autres fonds investissent dans les technologies quantiques mais sont moins spécialisés : Quantum Ventures (USA), Summer Capital (Pays-Bas) qui a investi dans Horizon Quantum Computing, Rigetti et Turing, Phystech Ventures, créé par des Russes dans la Silicon Valley et ayant déjà investi dans IDQ et Nano-Meta, Parkwalk Advisors (UK) qui a investi dans Phasecraft, Quantum Motion Technologies, Riverlane, nu quantum, nu nano et Oxford Quantum Circuits et SpeedInvest (Autriche) qui a investi dans QPhox (Pays-Bas) et Kets (UK).

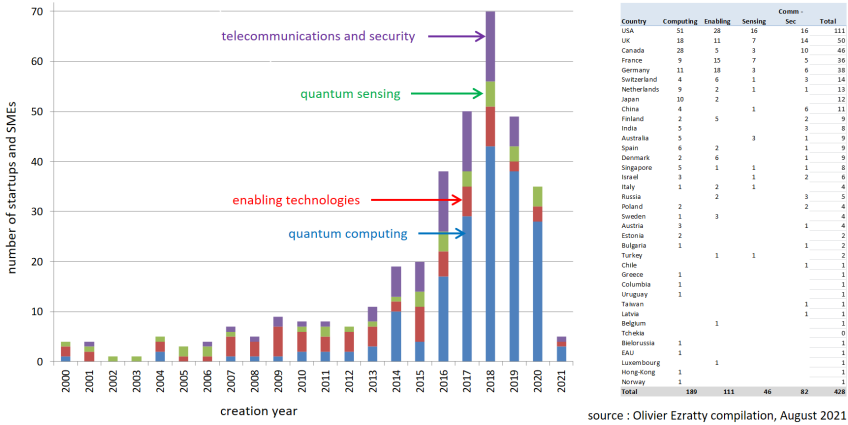
Les investissements dans les startups ont commencé à décoller dans le monde entier à partir de 2016⁴. Bon nombre des startups du domaine ne sont pas encore dans la forme « pure » du modèle startupien, c'est-à-dire qu'elles sont loin d'avoir un modèle ou même, juste un produit. Il s'agit souvent soit de petites entreprises industrielles ciblant des marchés de niche à très faible volume, soit de startups où le risque scientifique et technologique est encore très élevé avant de pouvoir vendre quoi que ce soit. C'est souvent une combinaison des deux. Elles peuvent alors se financer avec de la recherche contractuelle et divers services de conseil pour de grandes entreprises ou des institutions publiques, en plus de levées de fonds capitalistiques classiques.

Sur la figure 5, on peut voir le nombre de créations de startups par an et sur la partie gauche de la figure 6 une ventilation par pays.

Le diagramme de droite de la figure 6 contient une répartition différente par pays qui met en évidence les financements les plus importants. Comme d'habitude, nous constatons un écart de financement important entre l'Amérique du Nord et l'Europe. L'une des raisons est que les startups européennes ont été créées plus tard⁵. L'autre raison est bien sûr un accès différent au capital. Et 70 % du financement mondial

4. <https://medium.com/speedinvest/european-seed-investment-quantum-applications-aalf107a76ee>.

5. <https://medium.com/le-lab-quantique/new-record-looms-in-vc-funding-of-quantum-startups-484b82541004> et <https://medium.com/uvc-partners-news/the-european-quantum-computing-startup-landscape-a115ffe84ad8>.



source : Olivier Ezratty compilation, August 2021

FIGURE 5. Nombre de créations de startups par an.

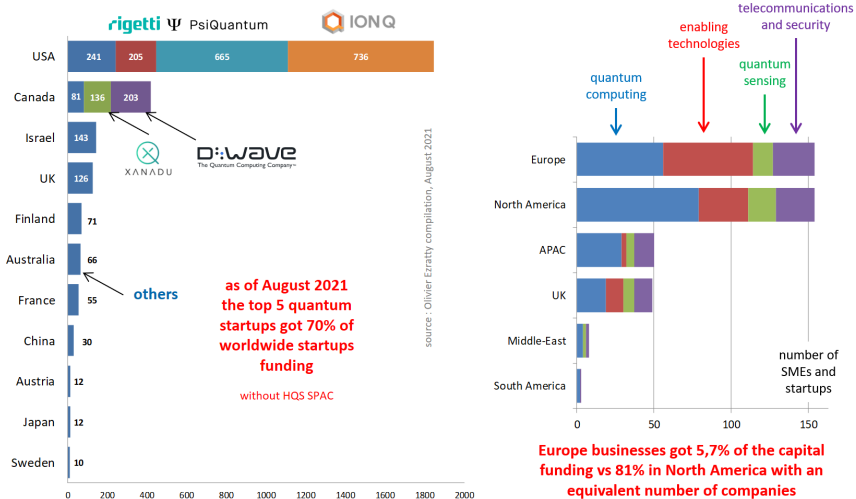


FIGURE 6. Nombre de créations de startups par an.

des startups est allé aux cinq premières startups que sont IonQ, PsiQuantum, Rigetti, D-Wave et Xanadu, toutes originaires des États-Unis et du Canada, alors que l'Europe compte un nombre équivalent d'entreprises par rapport à l'Amérique du Nord. S'il y a autant de startups et de petites entreprises quantiques en Europe continentale

qu'en Amérique du Nord, leur financement par capitaux propres visibles ne représente que 5,7 % du financement mondial, alors que les entreprises nord-américaines en ont obtenu 81 %. Et cela n'inclut pas les investissements d'IBM, Google, Intel et Honeywell.

Investissements par pays

Dans ce qui suit, nous allons faire le tour de la situation dans quelques pays. Tous ne peuvent pas être mentionnés, comme le Canada, l'Australie, l'Autriche, la Suisse, les Pays-Bas et le Japon, qui sont aussi tous très actifs dans les technologies quantiques.

USA

Comme dans tous les domaines du numérique, les USA dominent le paysage des technologies quantiques. Leur plan quantique national, le *National Quantum Initiative Act*, a été lancé fin 2018 avec un financement de 1,2 milliard de dollars sur cinq ans, complétés par une rallonge de 860 millions de dollars allouée en mars 2020 sur deux ans. Cette recherche finance les laboratoires de recherche publics et privés civils des universités via le Département de l'énergie (vague équivalent du CEA français), la *National Science Foundation* (équivalent de l'ANR) et le NIST (équivalent du LNE). Ce plan a donné lieu à la création de huit centres de recherche quantique bâtis sur l'existant des universités ou des organismes de recherche fédéraux (cf. figure 7) : trois *Quantum Leap Challenge Institutes* financés par la NSF et cinq centres de recherche intégrés dans des laboratoires du Département de l'énergie (Lawrence Livermore, Oak Ridge, Sandia Labs...). Le tout est complété par des financements non documentés liés à la défense et au renseignement.

Le pays se distingue aussi par les investissements significatifs des grands acteurs du privé que sont IBM, Google, Amazon, Rigetti dans les qubits supraconducteurs, d'IonQ et Honeywell dans les ions piégés, par un écosystème de plus d'une centaine d'entreprises de toutes tailles, par son rôle dans la standardisation de la cryptographie post-quantique via l'initiative associée du NIST lancée en 2016.

Royaume Uni

C'est le pays de l'Union Européenne (à l'époque) qui s'est engagé le premier et le plus activement dans les technologies quantiques, et ce, dès 2013, avec un plan de cinq ans renouvelé en 2019. Le pays a investi plus de 1,2 milliard de livres sterling en huit ans dans le secteur, financements privés compris. Le gouvernement britannique avait dès le départ souligné l'importance de la valorisation industrielle de la recherche. Le plan a conduit à la création de quatre hubs quantiques thématiques pilotés par des universités : Birmingham (capteurs quantiques), Glasgow (imagerie), Oxford (calcul, cryptographie) et York (communications). En 2019, le pays lançait

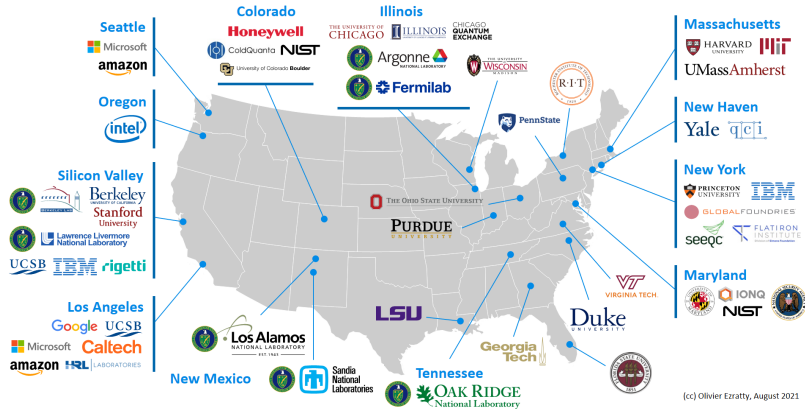


FIGURE 7. Investissements quantiques aux USA.

la création d'un centre de calcul quantique dédié, le *National Quantum Computing Center*.

Le plan a porté ses fruits, faisant du pays le second au monde par la densité de son écosystème entrepreneurial quantique. On y trouve une masse critique de startups dans les capteurs quantiques (M Squared, Cerca, Oxford HighQ), ainsi que dans la cryptographie quantique (Kets), dans les technologies de calcul quantique comme avec Orca Computing dans les photons, Oxford Quantum Technologies dans les qubits supraconducteurs, Oxford Ionics et Universal Quantum dans les ions piégés ou Quantum Motion dans les qubits à spin d'électrons. Leur tissu industriel dans les technologies habilitantes est aussi bien développé avec Oxford Instrument (cryogénie), Oxford Ionics, Kelvin, etc.

Allemagne

L'Allemagne a lancé son premier plan quantique en septembre 2018 avec 650 millions d'euros à la clé. Il a été complété par un plan de deux milliards d'euros lancé en juin 2020 dans le cadre des plans de relance économiques liés à la pandémie covid-19. Ce plan comprend le déploiement dans le pays de deux ordinateurs quantiques NISQ ainsi que celui d'un réseau gouvernemental de distribution de clés quantiques.

La recherche publique allemande est très active autour des technologies quantiques. Ils investissent dans les qubits supraconducteurs, les spins d'électrons et les ions piégés. Ce sont des Allemands qui pilotent le plus grand nombre de projets de l'*European Quantum Flagship* avec cinq projets.

Les entreprises du secteur sont plutôt focalisées sur les technologies habilitantes comme les lasers, les logiciels ainsi que la cybersécurité et les capteurs quantiques. Ils n'ont quasiment pas de startups établies dans l'informatique quantique, ce qui

explique indirectement pourquoi ils ont accueilli un laboratoire de recherche du finlandais IQM et un ordinateur quantique d'IBM installé près de Stuttgart et géré avec le concours du Fraunhofer Institute.

L'une des forces de l'Allemagne est l'engagement de ses grands industriels dans l'évaluation des technologies quantiques. Cela a même abouti à la création, en juin 2021, de *Quantum Technology and Application Consortium* (QUTAC) avec comme membres fondateurs BASF, BMW, Boehringer Ingelheim, Bosch, Infineon, Merck, SAP, Siemens et Volkswagen.

Chine

La Chine impressionne beaucoup avec ses investissements dans les *deep techs*. Son premier plan quantique gouvernemental structuré a été lancé en 2015. En pratique, le pays a investi un peu moins de deux milliards de dollars en une dizaine d'années ; ce qui est moins impressionnant que certains montants relayés comme 10 milliards ou 30 milliards de dollars qui englobaient en général d'autres secteurs technologiques que le quantique tels que celui de l'intelligence artificielle.

La recherche est notamment coordonnée par Jian-Wei Pan de l'USTC (*University of Science and Technology of China*) et de la *Chinese Science Academy* (CAS). Le pays a lancé la construction d'un laboratoire de recherche géant à Hefei, mais qui couvre aussi l'intelligence artificielle.

Du côté scientifique et technologique, le pays se distingue par un fort investissement dans la distribution de clés quantiques avec un réseau établi de 2000 km reliant Beijing à Shanghai, en cours d'extension à d'autres villes avec plus de 30 000 km en tout. Ils ont aussi testé la distribution de clés quantiques par satellite en 2017. C'est impressionnant mais n'a pas de grand intérêt pratique car le débit de la transmission est extrêmement faible, de l'ordre d'un seul bit par seconde.

Dans les qubits, les équipes de recherche chinoises ont atteint des records en photonique avec des prouesses d'échantillonnage de bosons, des expériences de mélanges aléatoires de photons qui permettent de plastronner avec des avantages quantiques qui n'en sont pas vraiment car ces systèmes ne sont pas du tout programmables.

Des équipes chinoises ont aussi publié quelques travaux intéressants dans les qubits supraconducteurs, avec des circuits de 66 qubits dont seulement 56 sont opérationnels. Mais la technologie présentée en 2021 reprenait quasiment à l'identique, sans l'améliorer, celle de Google Sycamore de 2019.

Cela correspond à une approche chinoise somme toute traditionnelle : ils étudient les travaux de recherche occidentaux, ils les reproduisent dans leurs laboratoires et les améliorent à la marge. Cela leur permet au fil de l'eau de monter en puissance. Les chercheurs chinois sont de grands déposants de brevets comme nous l'avons déjà vu mais l'influence de ces brevets semble faible à ce stade.

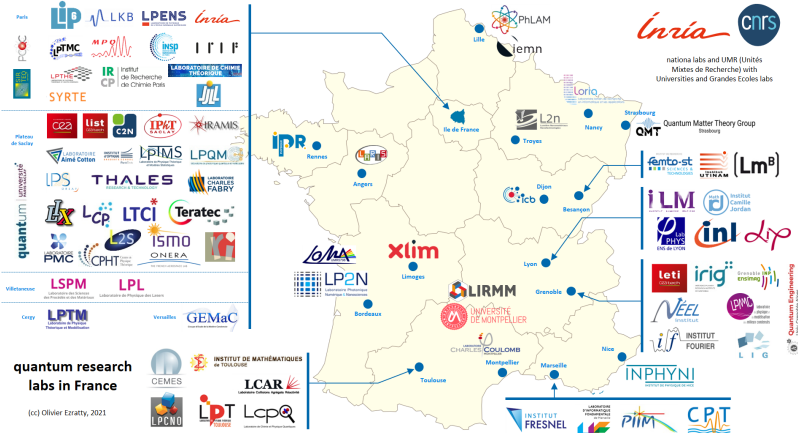


FIGURE 8. Investissements quantiques en France.

Du côté du secteur privé, les grands acteurs locaux du cloud ont lancé des offres d’émulation ou de calcul quantique, comme chez Huawei, Tencent et Baidu.

Leur écosystème de startups est relativement petit avec environ une dizaine d’entreprises identifiables, ceci s’expliquant peut-être par le confort des chercheurs dans les laboratoires qui sont bien financés.

À noter que la Chine, comme l’Asie en général, ne semble pas avoir d’influence notable sur la dimension logicielle du calcul quantique.

France

La France a lancé son plan quantique relativement en retard, en janvier 2021, avec un montant total de 1,8 milliards d’euros dont un milliard d’euros provenant de financements de l’État, le reste venant de l’Europe et du secteur privé. C’est un plan qui finance tout le cycle de l’innovation allant de la recherche fondamentale à la valorisation industrielle. L’accent est notamment mis sur les filières du calcul quantique (atomes froids, supraconducteurs à qubits de chats et spins d’électron). Le plan traite aussi bien à part les technologies habilitantes comme la cryogénie, les lasers et la cryoélectronique. Les capteurs quantiques ne sont pas en reste, tout comme le logiciel où un rattrapage rapide doit être réalisé aussi bien du côté de la recherche que de celui des startups.

La France dispose d’un large éventail d’activités de recherche et d’industrie dans le domaine des technologies quantiques (cf. figure 8). La recherche publique est organisée autour du CNRS, du CEA et d’Inria. Le CNRS fait de la recherche fondamentale en physique, en mathématiques et en algorithmique. Le CEA fait également

de la recherche fondamentale en physique, notamment sur les qubits supraconducteurs, et de la recherche appliquée sur les qubits à spins d'électrons en technologie CMOS ainsi que sur la photonique. Enfin, Inria mène des recherches en informatique quantique, sur la correction d'erreur quantique, la cryptographie et les algorithmes quantiques. De nombreux laboratoires sont des unités mixtes de recherche entre les universités et ces organismes nationaux. Les laboratoires de recherche quantiques sont concentrés en Île de France et à Grenoble, mais d'autres centres régionaux sont actifs comme Toulouse, Montpellier, Marseille, Lyon, Bordeaux, Besançon et Lille.

Du côté des startups et PME, la France compte environ 35 acteurs. Ceux qui planchent sur la création d'ordinateurs quantiques sont Alice&Bob (qubits de chat), C12 (qubits de spins d'électrons de nanotubes de carbone), Pasqal (qubits d'atomes froids) et Quandela (sources de photons uniques et qubits de photons).

Du côté des logiciels, nous avons Qubit Pharmaceuticals (simulations pour les biotechs), QuantFi (finance), VeriQloud (télécommunications quantiques) et Prevision.io (apprentissage automatique quantique), ainsi qu'une série d'entreprises spécialisées dans la cryptographie, principalement en cryptographie post-quantique avec CryptoNext, CryptoExperts, Ravel et Secure-IC. D'ailleurs, un bon nombre de scientifiques français, dont ceux de CryptoNext, ont contribué aux projets finalistes de la consultation du NIST américain sur la standardisation de la cryptographie post-quantique.

Dans le domaine des capteurs quantiques, nous avons surtout Muquans (micro-gravimètres, acquis par ixBlue en 2021) et Thales (centres NV, SQUIDS, atomes froids, cryogénie embarquée).

La grande majorité de ces startups ont été créées par des chercheurs et ont gardé des liens avec leurs laboratoires de recherche d'origine. Ainsi, Pascale Senellart, directrice de recherche au CNRS au laboratoire C2N du CNRS et de l'université Paris Saclay est-elle aussi cofondatrice et directrice scientifique de Quandela. De même, Antoine Browayes de l'Institut d'optique est lui directeur de recherche au CNRS et cofondateur de Pasqal.

En plus de Bpifrance et du fonds d'investissement Quantonation, le *Deep Tech Founders* forme des entrepreneurs et chercheurs dans les *deep techs*. C'est un programme international créé par l'équipe de Hello Tomorrow. L'écosystème quantique, côté entreprises, est fédéré par Le Lab Quantique, créé conjointement par Quantonation et Bpifrance. Il organise des rencontres régulières qui réunissent principalement des entrepreneurs des technologies quantiques, français et étrangers. Ces rencontres ont eu lieu sous forme de visioconférences sur Zoom pendant la période de la pandémie de covid-19 en 2020 et 2021.

L'une des spécificités de la France en Europe est qu'on y trouve de grandes entreprises qui ont directement investi dans les technologies quantiques et les technologies habilitantes quantiques (cf. figure 9) : Atos (logiciels, émulateurs, accélérateurs quantiques), Thales (capteurs), Air Liquide (cryogénie), Orano (isotopes), Radiall



FIGURE 9. Grandes entreprises francaises ayant investi dans les technologies quantiques.

(câblage) et un bon nombre dans la photonique (comme ixBlue, Azurlight, Aurea et Cailabs) et même les machines de production de semi-conducteurs avec Plassys Bestek et Riber.

Bien sûr, la France accueille également Atos qui s'est lancé dans l'informatique quantique en 2016 sous la direction de Thierry Breton en créant des outils d'émulation dont un serveur aQML et des outils de développement. Ils prévoient de devenir des intégrateurs d'accélérateurs quantiques et de supercalculateurs classiques pour construire des solutions hybrides.

Dans chaque pays et à l'échelle internationale, l'enjeu clé est dans un premier temps de favoriser les collaborations interdisciplinaires. Les technologies à créer et assembler pour créer un ordinateur quantique sont très nombreuses aussi bien du côté physique et matériel que du côté des outils de développement et du logiciel. Le tout avec une incertitude scientifique qui subsiste sur la capacité de la recherche mondiale à créer des ordinateurs quantiques qui montent en échelle et dépassent réellement les capacités des ordinateurs classiques.

L'enjeu suivant rejoint ceux des autres technologies du numérique et relève plus de la dimension business et marketing. Elle comprend notamment la création d'écosystèmes logiciels et de ce point de vue-là, les USA ont une certaine avance.

Bataille des compétences

Enfin, on ne peut pas parler d'écosystème quantique sans évoquer l'enjeu des compétences. La complexité du domaine est élevée. Sa compréhension n'est pas donnée à tout le monde, y compris chez les ingénieurs. Un bon bagage scientifique est indispensable pour appréhender les concepts de base de la physique quantique et

ceux de l'information quantique. Il faut se remettre aux mathématiques, notamment à l'algèbre linéaire et au calcul matriciel. Les concepts sont souvent contre-intuitifs et plein de faux amis. Les modèles de programmation sont complètement différents du développement logiciel sur ordinateur classique.

Les talents à même de s'approprier le sujet sont rares et ils ne peuvent pas être formés rapidement comme on a pu le faire sur le développement web avec des initiatives telles que Simplon.co ou l'école 42. La pluridisciplinarité et le croisement des compétences seront aussi indispensables. De nombreux pays, dont la France, ont ainsi lancé de nouveaux cursus de formation sur les technologies quantiques et leurs applications. Ils vont s'arracher les talents à la fois du côté de la recherche, qui est mieux financée, que de celui des startups, des grandes entreprises technologiques puis des entreprises utilisatrices.

On peut saluer en France les initiatives lancées à différents endroits : à l'université Paris-Saclay avec son master quantique ARTEQ, à l'université Grenoble Alpes (UGA), dans plein d'universités en région (Strasbourg, Bordeaux, Nancy, Lyon, Nice, ...) ainsi que dans de nombreuses grandes écoles telles que Polytechnique, Télécom Paristech, CentraleSupélec, les Écoles normales supérieures (impliquées depuis longtemps dans la filière), l'INSA Lyon ainsi que l'EPITA.

À chaque nouvelle vague technologique, sa vitesse d'appropriation par les entreprises du côté de l'offre comme de la demande est en effet clé pour en tirer parti de manière compétitive.