

# DES LABOS DE L'X AU VENTURE CAPITAL, BÂTISSONS UNE INDUSTRIE QUANTIQUE



**CHRISTOPHE JURCZAK (X89)**  
associé fondateur de Quantonation,  
cofondateur de Pasqal,  
trésorier de QuantX

L'auteur retrace son parcours fort peu linéaire, des bancs de l'X au financement en *venture capital*, dans l'émergence de l'industrie quantique et il en tire les leçons. Pour bâtir une industrie quantique, l'hybridation des technologies classique et quantique est aujourd'hui nécessaire. L'Europe doit opérer le financement en *venture capital* du changement d'échelle des entreprises arrivées à maturité. Enfin, c'est en ouvrant les applications quantiques à d'autres domaines de la physique que sera maintenu un dynamisme renouvelé pour le secteur.

**C**'est Jean-Louis Basdevant, professeur de physique à l'X de 1975 à 2005, qui m'a introduit à la physique quantique, comme un grand nombre des camarades de ma génération, et Alain Aspect qui m'a convaincu de faire ma thèse de docteur de l'X sous sa direction dans le secteur, sur la « spectroscopie par corrélations d'intensité d'atomes refroidis par laser », à l'Institut d'optique, soutenue en 1996. Jean Dalibard, maintenant professeur au Collège de France, a été mon directeur de DEA. Enfin un autre professeur du département de physique, le regretté Gilbert Grynberg, m'a offert la possibilité de réaliser un stage postdoctoral sur ce qu'on appelle aujourd'hui la « simulation quantique » dans son équipe au laboratoire Kastler Brossel du département de physique de l'ENS. Des géants... sur un sujet qui a mené

au prix Nobel pour Claude Cohen-Tannoudji, William Phillips et Steven Chu en 1997. Et vingt-six ans plus tard, bien évidemment au prix Nobel 2022 qui vient d'être décerné à Alain Aspect, John Clauser et Anton Zeilinger. Le prix est attribué pour leurs travaux fondamentaux sur l'intrication, auxquels je n'ai pas eu l'honneur de participer. Mais le comité Nobel note aussi : « Leurs résultats ont ouvert la voie à de nouvelles technologies basées sur l'information quantique », à très juste titre, car toute l'industrie du quantique et mon travail aujourd'hui reposent sur ces travaux majeurs très justement finalement récompensés.

## Au lendemain des expériences d'Alain Aspect

Mais à l'époque, à la fin des années 90, pour ceux qui – comme moi – n'avaient pas la vocation académique chevillée au corps, il n'y avait pas vraiment d'option pour trouver un emploi « dans le quantique ». L'option recherche du corps de l'armement – ma filière – orientait vers l'optronique, l'électronique, les matériaux, et il y avait l'équivalent dans les grandes entreprises de défense qui sont devenues Thales et Safran notamment. On pouvait aussi s'orienter vers le tissu des PME et ETI, traditionnellement fort en France en optique et lasers notamment. On était à une décennie à peine des fameuses expériences d'Aspect. Ces expériences, point de départ de la deuxième révolution quantique, démontrèrent que le concept d'intrication – jusqu'alors vu un peu comme un ovni théorique – était en fait consubstantiel de la description quantique de la réalité et qu'on pouvait imaginer en faire un usage pratique pour des applications futures. En 1992, Shor montrait que son algorithme de factorisation donnait lieu à un « gain exponentiel » si jamais on était capable de l'implémenter sur un « ordinateur quantique ». Ekert montrait dans ces années comment l'intrication et la non-localité pouvaient être utilisées pour distribuer des clés cryptographiques avec une sécurité parfaite.

## La société d'investissement Quantonation Ventures

Mais tout cela était fort théorique et après ma thèse je connus un début de carrière très épanouissant à la DGA – en optronique puis dans la conception du futur système de force aéroterrestre sous la direction d'Yves Demay (X77), de Jean-Bernard Pene (X74) et de Vincent Imbert (X76) – avant de bifurquer vers les énergies renouvelables, dans le public puis le privé, en Europe et aux États-Unis. J'étais loin d'imaginer que trente ans plus tard je contribuerais à créer une toute nouvelle industrie qui, pour en revenir à mon histoire personnelle et à un point dont je suis très fier, donnerait la possibilité à des étudiants physiciens – docteurs, ingénieurs, voire *bachelors* – de trouver un emploi dans le secteur où ils ont choisi de faire leurs études. Avec la société d'investissement Quantonation Ventures que j'ai lancée à Paris avec mes partenaires Olivier Tonneau et Charles Beigbeder, nous avons à travers notre premier fonds Quantonation I doté de 91 M€ – soutenu notamment par BPIFrance, les industriels Thales, BASF et de nombreux *limited partners* privés internationaux – investi depuis 2018 dans 22 sociétés partout dans le monde. Cela fait de nous l'investisseur le plus actif dans le secteur quantique, pas seulement en France ou en Europe, mais au niveau mondial. Nous avons créé à travers ces jeunes pousses plus de 400 emplois, dont la moitié environ pour des physiciens à différents niveaux. Je pense parmi nos camarades à l'exemple de Loïc Henriet (X09), CTO de Pasqal, un des leaders mondiaux du calcul quantique, une société dont Alain Aspect est un des cofondateurs, avec notamment Antoine Browaeys qui est professeur chargé de cours à l'X ; Loïc a rejoint la société juste après son stage postdoctoral en Espagne. Je pense aussi à Théau Peronnin (X12) qui a fondé la start-up Alice&Bob dans la perspective de réaliser un ordinateur universel avec correction d'erreur. Mais il y a

“L'investisseur le plus actif dans le secteur quantique au niveau mondial.”

↓ Un exemple d'analyse des applications du calcul quantique, en matière de mitigation des impacts du changement climatique. Le tableau montre les horizons d'application de l'ordinateur quantique pour des thématiques données en fonction des capacités de la technologie et de l'impact.

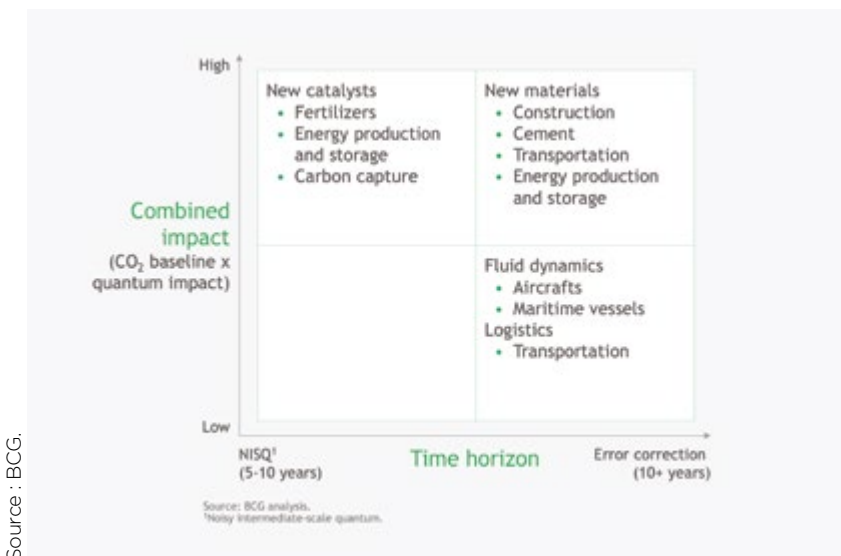
aussi, au-delà de ces start-up, des emplois dans des groupes comme Atos avec Cyril Allouche (X95) et d'autres, Microsoft avec Vivien Londe (X11) ou BMW où notre camarade Elvira Shishenina (X11) est responsable du quantique. Cette communauté active de polytechniciens se retrouve au sein du groupe QuantX.

## L'ordinateur quantique et les communications quantiques

Grâce aux efforts sans relâche des chercheurs académiques sur près de vingt-cinq ans – en France au CEA, au CNRS et à l'Inria notamment – nous sommes parvenus à comprendre et, en conséquence, contrôler des phénomènes physiques qui ont un impact sur le « monde réel », selon une expression du Prix Nobel Frank Wilczek dans un article visionnaire de 2016 qui a été une profonde source d'inspiration pour moi (« Physics in 100 years » *Physics Today*, 69, 4, 32) dans mon retour vers la physique quantique à travers l'investissement dans l'innovation. Et, après les premiers investissements privés à partir de 2015-2016, soit par des grands groupes notamment IBM et Google, soit par les start-up émergentes du quantique, concomitants avec des financements publics importants pour la recherche et l'innovation, on a commencé à imaginer et à implémenter des applications de ces technologies, notamment pour les ordinateurs quantiques. Certes, il existait des applications bien plus tôt – je pense aux horloges atomiques ou aux gravimètres développés par le pionnier français Muquans fondé par mon voisin de table optique Bruno Desruelle (lui aussi en thèse avec Alain Aspect !) – mais dans des niches relativement étroites. L'ordinateur quantique et les communications quantiques font entrevoir des marchés beaucoup plus massifs à moyen-long terme, et ce changement d'échelle est fondamental pour des investisseurs en *venture capital* tels que Quantonation.

## Des phénomènes difficiles à maîtriser encore

L'analyse synthétisée sur la figure 1 ci-contre, présentée par notre camarade Jean-François Bobier (X96) lors d'un événement conjoint Quantonation – Boston Consulting Group à Boston il y a quelques mois, est une bonne illustration des progrès réalisés dans l'analyse de l'impact potentiel de ces technologies, qui pourrait être massif à terme. Il était impensable de produire une telle analyse il y deux ou trois ans, mais les progrès conjoints sur la *hardware* et les *softwares* applicatifs permettent de les envisager. C'est le dialogue serré entre toutes les parties, les fameuses « preuves de concept » réalisées à petite échelle, qui alimente ce type d'analyse. À défaut, on risque de tomber dans le *hype* qui peut être très dommageable pour toute l'industrie, en particulier quand il s'agit de climat, avec le reproche de *greenwashing* qui peut être mérité. Mon expérience est que ce sont ceux qui refusent le dialogue et portent des



→ approches dogmatiques – qu'ils soient industriels, investisseurs ou chercheurs – qui sont le plus souvent victimes d'une vision décalée des réalités de la physique et des attentes des utilisateurs. Il ne faut jamais perdre de vue que tout ce secteur repose sur des phénomènes difficiles à maîtriser encore, nous sommes au début de l'aventure et la prospective est un art difficile, pour le quantique au même titre que pour les autres « technologies profondes ». Pensons aux prédictions sur la *blockchain* ou la voiture autonome.

### L'informatique quantique et les applications financières réelles

Les applications potentielles du calcul quantique sont variées, en finance notamment où des approches computationnelles très sophistiquées sont déjà appliquées par l'industrie. Une des entreprises qui s'est le plus impliquée dans l'analyse des usages potentiels de l'ordinateur quantique est Crédit Agricole Corporate and Investment Bank. CACIB s'est associé à deux leaders, Pasqal (*hardware*) et Multiverse Computing (*software*), pour utiliser l'informatique quantique dans des applications financières réelles sur les marchés de capitaux et la gestion des risques. Des preuves de concept de grande ampleur sont en cours, avant un éventuel passage en production.

### L'hybridation des technologies classique et quantique

Une autre évolution récente qui me semble fondamentale, car porteuse de résultats à court terme, est la réalisation que l'hybridation des technologies – classique et quantique – est nécessaire. On ne vivra pas « le grand soir quantique », mais les technologies quantiques vont progressivement prendre une place dans l'arsenal des technologies au service de la satisfaction des besoins de nos sociétés. Un exemple illustré sur la figure 2 ci-dessus est l'application d'imagerie quantique de processeurs par la start-up américaine Euclid, dans laquelle Quantonation a investi. Les applications sont multiples, je citerai la cybersécurité avec l'identification de chevaux de Troie *hardware*, que des acteurs malintentionnés auraient pu implanter lors de la fabrication, ou le contrôle de défauts de processeurs en usine. Il s'agit d'une technologie d'imagerie combinant un senseur quantique, reposant sur la sensibilité d'échantillons à température ambiante de diamant synthétique dans lesquels on plante des défauts qui jouent le rôle de spins uniques très sensibles aux champs magnétiques à l'échelle nanométrique, et une technique d'analyse du signal extrêmement sophistiquée reposant sur des réseaux de neurones « inspirés de la physique ». On combine du quantique et de l'apprentissage profond, une tendance de fond.

### Un secteur en forte croissance

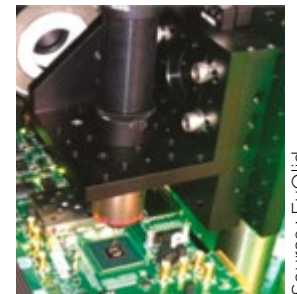
Afin d'illustrer la dynamique du secteur, la figure 3 (ci-contre) montre les montants investis par les fonds de *venture capital*



↑ Exemple de combinaison d'une technologie de *hardware* quantique (microscope magnétométrique à base de centres colorés dans le diamant) et d'une analyse de données sophistiquée de type PINN (*physics-informed neural network*).

À gauche : distribution de champ magnétique.

À droite : microscope à diamant quantique configuré pour la mesure de champ magnétique dans des circuits intégrés.



Source : Euclid.

dans le secteur. La dynamique est spectaculaire, même s'il faut noter que les chiffres absolus sont bien faibles encore par rapport à d'autres secteurs. Les start-up de l'intelligence artificielle ont levé près de 110 G\$ en 2021 ; on est donc loin de la « surchauffe » dont certains se gaussent, au contraire il faut plus de capitaux ! Malgré la crise, on s'attend à une année 2022 record. Et c'est sans compter les financements publics qui sont importants et croissent, car les gouvernements du monde entier sont mobilisés pour placer leur pays dans la course : les États-Unis, la Chine, mais bien sûr aussi la France, qui a son ambitieuse Stratégie nationale sur le quantique mise en place début 2021, et l'Union européenne et ses États membres.

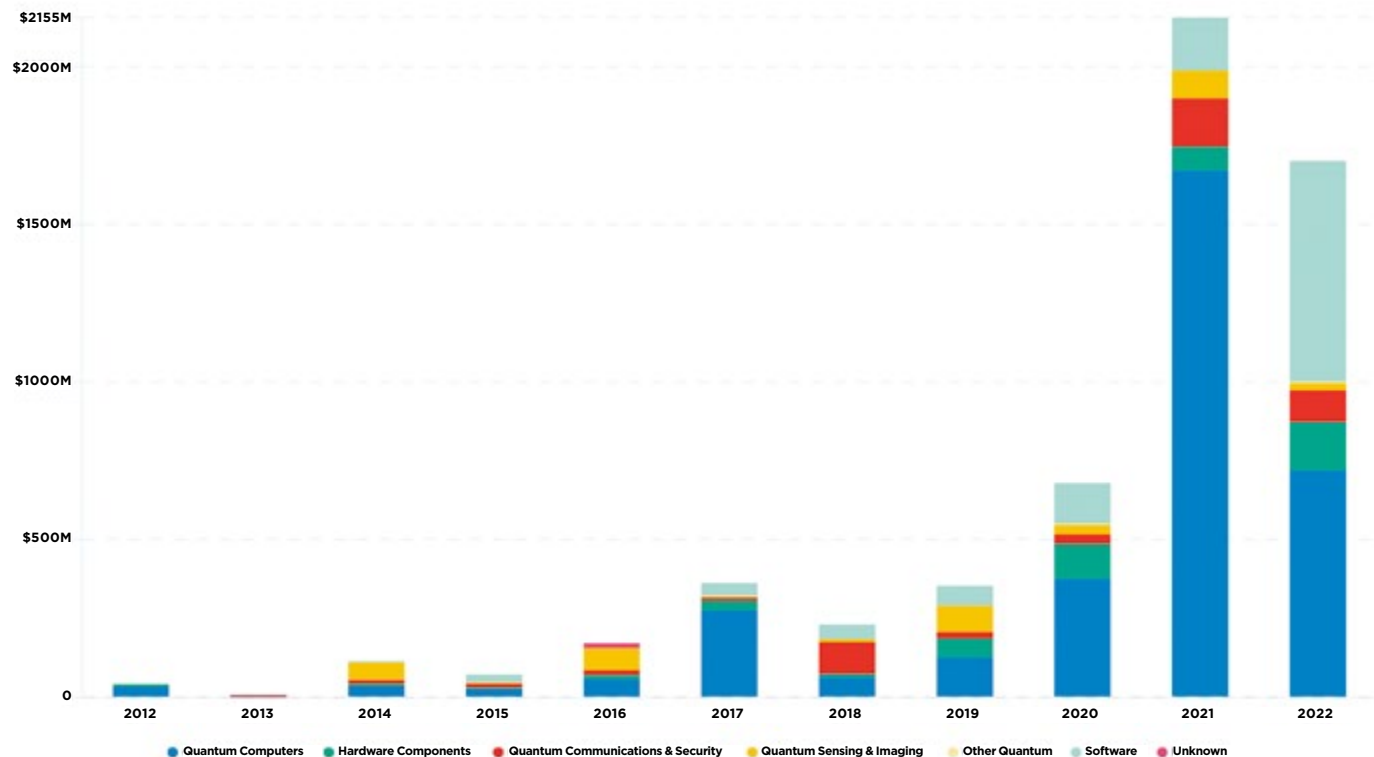
### Permettre le « scale-up » des pionniers

Une des explications principales pour la croissance du financement en *venture capital* est que le secteur est mature et que les entreprises arrivent au moment où elles ont besoin de financements à plus de 100 M\$ par tour pour réaliser leur *scale-up* (changement d'échelle). La figure 4 (page suivante) le montre bien : la plupart des entreprises ont été créées dans les années 2017-2019 et arrivent donc en phase d'industrialisation. C'est pour cette raison que Quantonation Ventures a lancé en septembre 2022 son deuxième fonds, le Quantum Opportunity Fund, dédié justement au *scale-up* des start-up du calcul quantique. Ce fonds est focalisé sur l'Europe car c'est un fait avéré qu'il y a très peu de fonds européens capables de placer des tickets d'investissement dans des tours de financement de plus de 100 M€ dans ces phases critiques et, si l'Europe veut préserver une forme de souveraineté technologique, elle doit disposer de ce type d'instrument. Notre fonds a l'ambition de se positionner en investisseur de référence dans ces tours, compte tenu de la compétence que nous avons développée, en poussant les entreprises à formaliser des visions ambitieuses et à raisonner en termes d'impact, pas uniquement de développement technologique. Ma conviction est qu'il n'est pas trop tard pour l'Europe pour être dans la course, les sociétés ont été créées deux à trois ans après leurs concurrents nord-américains, mais le chemin est long et c'est maintenant avec ces tours de financement massifs que les jeux vont se nouer.

## L'EXEMPLE DE LA START-UP QUBIT PHARMACEUTICALS

Un exemple qui m'est cher est celui de la start-up Qubit Pharmaceuticals dirigée par Robert Marino et Jean-Philip Piquemal, une des sociétés du portefeuille Quantonation dont je suis le plus fier et qui est certainement destinée à avoir un impact très important. Son objectif : révolutionner la recherche médicamenteuse par le calcul, rien que ça. Faisant fi de nombreux dogmes admis du *venture capital* quant aux caractéristiques des projets qui ont une chance de succès, nous avons soutenu l'équipe de cinq fondateurs français et américains, tous des pontes académiques dans leurs domaines respectifs, pour les accompagner au fil de quatre années afin de donner corps à leur idée, leur associer un CEO visionnaire capable de porter leur projet, travailler ensemble au modèle de business en le faisant évoluer. Le résultat est une levée de fonds record en amorçage, associant des investisseurs prestigieux, des publications scientifiques qui font référence dans le domaine de la recherche de médicaments contre la Covid et des perspectives de partenariat avec des biotech. La technologie de la société est implémentée sur des cartes graphiques GPU et progressivement le calcul quantique sera intégré à leur *process*, au fur et à mesure que les qubits seront disponibles, ceux de Pasqal, Quandela, IBM ou d'autres sociétés. C'est parce que les fondateurs et les équipes connaissent parfaitement la chimie quantique et les algorithmes classiques permettant de modéliser des molécules de très grande taille dès aujourd'hui qu'ils sont les mieux placés pour imaginer comment un ordinateur quantique va les aider, cela semble évident mais le fait est que nombre d'acteurs du calcul quantique se permettent de pontifier sur les applications en chimie sans avoir cette compétence, avec comme conséquence que leurs annonces tonitruantes ne sont absolument pas pertinentes.

↓ Investissements annuels en *venture capital* dans les start-up du quantique.



Source : The Quantum Insider (Octobre 2022)

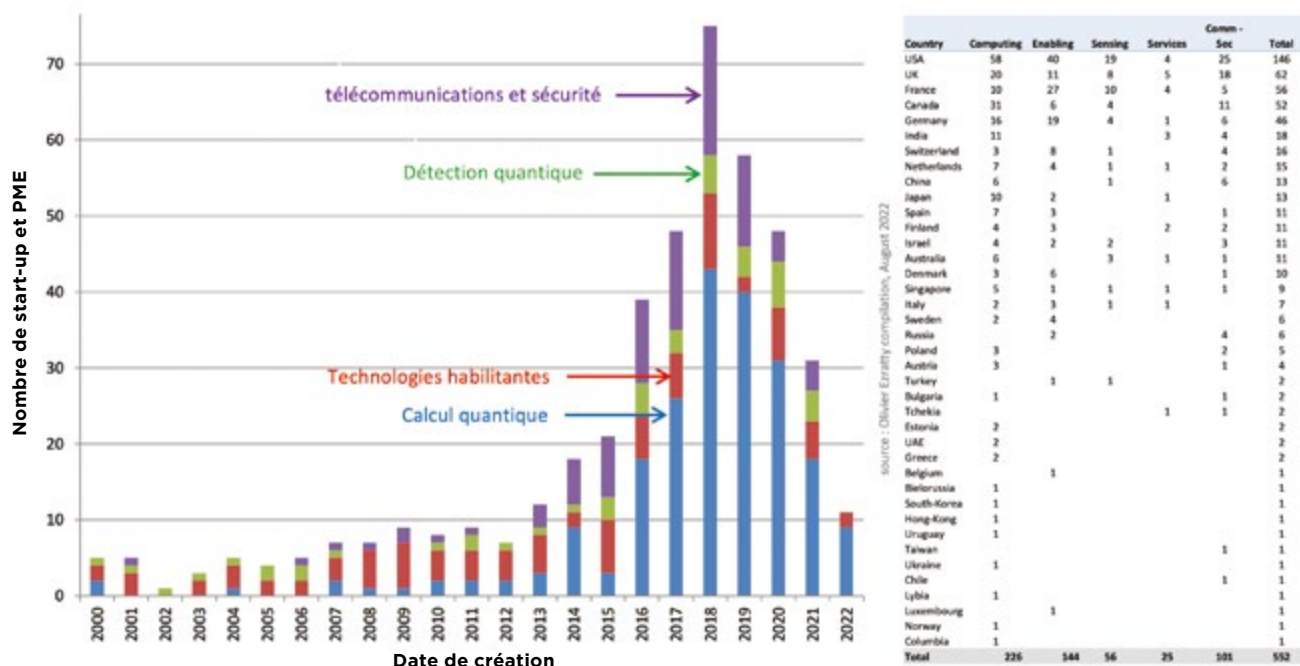
## Un essoufflement des créations d'entreprises ?

Un autre commentaire sur la figure 4 : je suis préoccupé par le fait que le rythme de création d'entreprises a diminué ces trois dernières années. Plusieurs explications à cela, j'en citerai deux. Nous avons clairement vu émerger une première génération de scientifiques-entrepreneurs de talent qui ont porté de beaux projets aujourd'hui en phase de croissance, mais le vivier de talents est limité, on ne peut pas encore bénéficier de l'expérience de fondateurs de nouveaux projets entrepreneuriaux qui seraient issus de la première génération de start-up du quantique (*serial entrepreneurs*) et, si l'on voit un flux de nouveaux projets de qualité d'origine académique en Amérique du Nord (Harvard, University of Chicago...), le renouvellement n'est pas aussi marqué en Europe.

Une seconde explication à mon avis est que certains ont l'impression que les jeux sont faits et qu'il n'y a plus de place pour de nouvelles initiatives. C'est vrai dans une certaine mesure et, pour certaines technologies notamment pour le calcul quantique, on voit mal comment certains projets peuvent se faire une place quand la science issue des laboratoires associés n'apporte pas un avantage décisif par rapport à la concurrence qui a trois à cinq ans d'avance. Mais il faut faire preuve d'imagination, identifier les applications non encore servies par exemple, et faire →



Source : Olivier Ezratty, Understanding Quantum Technologies 2022



→ porter les efforts sur celles-ci, ce qui réclame une réflexion stratégique initiale plus forte et une vision à long terme bien étayée et ambitieuse. C'est pourquoi Quantonation soutient plusieurs initiatives destinées à faire émerger de nouveaux projets, ce qu'on appelle des *Venture Studios* avec des modalités variées, en France (*Quantum Launchpad* porté par Da Vinci Labs), au Québec (en lien avec la Zone d'innovation quantique de Sherbrooke) ou aux États-Unis (Californie et Maryland).

## Voir plus large

Une autre façon de faire croître le pipeline de possibilités est de voir plus large. Ma motivation initiale à la création de Quantonation était le financement de l'innovation en physique, pas uniquement la physique de la seconde révolution quantique avec intrication et superposition en première place, mais aussi en ce que j'appelle la *deep physics*, la physique avec un pouvoir de disruption important. Un exemple est issu directement de l'article de Frank Wilczek cité plus haut, c'est la start-up Sensorium basée à Nashville aux États-Unis qui développe des matériaux nouveaux, des métamatériaux qui permettent d'optimiser l'interaction entre la lumière et la matière, aux fins de créer des dispositifs dans la bande de l'infrarouge lointain (8-12 μm). L'objectif ultime est d'ouvrir au plus grand nombre la capacité de voir dans cette bande, avec l'accès à de nouvelles données sur notre environnement. « En élargissant considérablement le sensorium humain, nous ouvrirons les portes de la perception et verrons le monde tel qu'il est réellement », dit Wilczek. Pas d'intrication en jeu mais « de la belle physique » avec des applications évidentes. J'ai en tête deux sociétés créées par des camarades qui sont passés par le MIT, Jérôme Michon (X11) fondateur de InSpek en France

↑ Rythme annuel de création de start-up dans le quantique et répartition par pays. La France se place bien dans la course mondiale, l'Union européenne fait jeu égal avec les États-Unis en termes de nombre de sociétés mais est en retrait en matière de financement puisqu'elle collecte 10,8 % du capital levé contre 70 % pour l'Amérique du Nord où les sociétés sont plus matures.

**“La France a son ambitieuse Stratégie nationale sur le quantique mise en place début 2021.”**

et Charles Roques-Carmes (X13) fondateur de Astrahl à Boston, tous deux en photonique avec des applications en chimie et en imagerie médicale, je pense qu'on entendra parler d'eux... Je veux croire que l'engouement pour les technologies quantiques va s'étendre rapidement à d'autres domaines de la physique, c'est comme cela aussi qu'on aura plus de beaux projets qui vont intégrer le portefeuille d'opportunités pour les investisseurs, et aussi plus d'emplois à la clé pour nos jeunes physiciens et polytechniciens.

## Les effets positifs de la crise

Beaucoup à faire et de très belles perspectives donc, de nature à encourager nos jeunes camarades à s'engager dans le secteur des technologies quantiques, dans la recherche publique, la création d'entreprises, l'industrie. Mais on peut légitimement se demander si l'industrie quantique à peine émergente, qui commence à trouver ses applications, ne serait pas destinée à être une des premières victimes de la crise économique. Paul-François Fournier (X89), directeur exécutif de la direction innovation de BPIFrance et grand supporter de l'industrie quantique et des *deep tech* en France, considérait dans une interview récente aux *Échos* que l'écosystème de l'innovation en France était suffisamment mûr et résilient face à la crise, et il ajoutait : « Rappelons aussi aux investisseurs que c'est historiquement dans les bas de cycle que se construisent les meilleurs rendements. » En plus d'une discipline renforcée dans la gestion des ressources des entreprises du secteur, la crise nous force à travailler sur les applications à court terme, sur l'impact de ces technologies pour la société maintenant et pas seulement dans une décennie. C'est un défi que l'industrie doit relever, je suis convaincu que c'est faisable, j'ai esquissé quelques pistes plus haut, travaillons-y ! X