



La stratégie quantique française, un an après

Il y a un an exactement, le 21 janvier 2021, Emmanuel Macron présentait la **stratégie nationale d'accélération quantique** au laboratoire C2N du CNRS et de l'Université Paris Saclay situé à Palaiseau. Il rencontrait à cette occasion les équipes de Quandela, Pasqal, Atos et Thales, ce dernier pour son activité dans les capteurs quantiques et les trois premiers dans le calcul quantique. C'était une première mondiale car jamais un chef d'État ne s'était exprimé de la sorte sur ce sujet.

Le plan annoncé était structuré avec une enveloppe de 1815M€ étalée sur 5 ans dont 1032€ de financements publics nationaux, 238M€ de financements européens et 545M€ de financements privés, ces deux derniers étant des estimations non garanties. Le financement public de 1032M€ correspondait à un triplement de l'effort existant, jusqu'alors concentré principalement sur la recherche fondamentale. Il doit couvrir le cycle complet de l'innovation allant de la recherche fondamentale au développement industriel, startups comprises. De manière très classique, le plan comprend des volets sur le calcul quantique, la métrologie quantique et les télécommunications quantiques. Il traite aussi des technologies habilitantes comme la cryo-électronique, la cryogénie et le câblage ainsi que la cryptographie post-quantique.

Dans le discours politique du Président de la République, la dimension souveraineté des technologies quantiques était un leitmotiv, tout comme l'impérieuse nécessité de développer une approche européenne, seule dimension pertinente face aux USA et à la Chine. Un an après, que s'est-il passé ? Comment le plan a-t-il avancé ? Est-ce que la France et la France dans l'Europe, ont augmenté leurs chances de succès dans les technologies quantiques face aux USA et à la Chine ? Qu'est-ce qui pourrait être amélioré ? C'est ce que nous allons essayer de traiter ici-même. Je vais décrire les composantes du plan, la dimension souveraineté, les initiatives des régions, la communication du plan, ce qui s'est passé dans le reste du monde et enfin l'impact de la "hype quantique" sur le plan.

Un plan qui se met bien en place

Une bonne partie des principales composantes du plan quantiques ont été lancées comme nous allons le voir, et dans un laps de temps assez court au regard du temps administratif habituel. Ainsi, Neil Abroug, le coordinateur de la stratégie quantique rattaché au SGPI, un service qui dépend du Premier Ministre, n'a été **officiellement nommé** que début mai 2021. Voici ce qui a pu être annoncé ou lancé depuis sachant qu'un point détaillé a été publié dans le **compte-rendu** du Conseil des Ministres du jeudi 20 janvier 2022.

Le **PEPR quantique** (Programme d'Équipement Prioritaire de Recherche) a été **formellement lancé** le 22 septembre 2021 à Grenoble par la Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, Frédérique Vidal. Il comprend plusieurs domaines thématiques directement gérés par les grands organismes nationaux de recherche (ONR) que sont le CNRS, le CEA et Inria. Ce plan comprend 150M€ dont la moitié est fléchée sur des thématiques prioritaires comme les qubits solides et à atomes froids ainsi que les logiciels. Le reste doit faire l'objet d'appels à manifestation d'intérêt, comme sur les qubits photons, et relèvera aussi des classiques

appels à projets de l'Agence Nationale de la Recherche. Les crédits ne sont cependant pas toujours arrivés à leurs destinataires ultimes. Cela crée de l'impatience.

Les qubits supraconducteurs, silicium et à base d'atomes froids sont bien servis dans le PEPR, chacun avec d'intéressants choix de différenciation scientifiques et technologiques qui laissent entrevoir des perspectives côté scalabilité et débouchés commerciaux à terme. Les qubits supraconducteurs correspondent surtout aux qubits de chat d'Inria et d'Alice&Bob. Les qubits silicium correspondent à la filière du CEA-Leti et du CNRS à Grenoble. Les atomes froids sont le domaine de l'IOGS (Antoine Browayes) et d'Unistra (Shannon Whitlock, dont nous parlons plus loin dans la rubrique sur les régions). Sont également financées des recherches sur les mémoires quantiques, un point de passage obligé pour le calcul quantique mais aussi pour les télécommunications quantiques.

A contrario, les qubits photons sont relativement relégués en arrière-position alors qu'ils sont incontournables dans les télécommunications et la cryptographie quantiques et qu'ils constituent une voie intéressante à creuser dans le calcul quantique à la fois pour le calcul lui-même et parce qu'ils sont un passage obligé pour relier entre eux des processeurs quantiques, l'une des voies clés du "scale-out" du calcul quantique. Nous avons une belle filière dans la recherche en France, celle qui notamment engendré Quandela, les nombreuses technologies habilitantes comme les lasers et quelques autres startups en cours de création. Alors que le PEPR pourrait allouer un maximum de 5M€ aux qubits photons, après un processus de sélection qui ne fait que démarrer, les homologues allemands des chercheurs français ont déjà reçu 65,3M€ de financement via les projets **photonQ** et **PhoQuant**. C'est largement plus que le ratio de 1 à 2 qui différencie le plan quantique français de son équivalent allemand. Est ce que le plan quantique compte sur un financement européen type H2020 ou ERC pour compenser ? Il faudrait espérer que non, car les autres pays en bénéficient aussi.

Côté **formation**, une expérimentation sur Paris, Saclay et Grenoble a été lancée en septembre 2021 avec 3M€. Elle sera étendue à partir de l'année scolaire qui démarre en 2022 avec un budget total sur 5 ans de 61M€. Il s'agit essentiellement d'augmenter l'offre de formation en masters et en doctorats en technologies quantiques dans les Universités et Grandes Écoles du secteur public, allant de la physique à l'informatique quantique sous toutes ses formes. D'autres initiatives ont été lancées indépendamment du plan national comme la mineure de cinquième année que n'anime à l'EPITA depuis septembre de nouveaux cursus et évolutions de cursus existants dans diverses Universités et Grandes Écoles (ARTEQ à Saclay, INSA Lyon et Strasbourg, ENSIERB à Bordeaux, ...). Enfin, le volet formation du plan quantique disposera de financements additionnels liés au plan France 2030, celui-là même qui avait été **annoncé** le 12 octobre 2021 par le Président de la République, juste après une intervention de Maud Vinet (CEA-Leti, 5e minute).

Les **plans de maturation technologique (PMT)** couvriront le développement technologique de filières de qubits les plus prometteuses, qui restent à sélectionner en fonction de jalons scientifiques. Ces financements interviendront plus tard, probablement à partir de 2023.

Le **soutien au déploiement industriel** concerne la cryogénie haute-performance (impliquant bien évidemment au moins Air Liquide), les lignes de production, les isotopes stables et autres technologies habilitantes avec des appels à manifestation d'intérêt et à projets.

La **politique d'achats publics** consiste à faire en sorte que les différents organismes de l'État fassent appel aux industriels et startups européens et français. L'un des exemples est la plateforme de calcul quantique hybride **annoncée** le 4 janvier 2022 à l'Institut d'Optique (IOGS). Dans le cadre d'un cofinancement France et Union Européenne, le GENCI va faire l'acquisition de processeurs quantiques dont le premier sera installé en 2023 au centre de calcul de recherche TGCC opéré par le CEA à Bruyère le Chatel en région parisienne, en liaison avec le supercalculateur Joliot-Curie. L'événement du 4 janvier accueillait aussi des représentants de LUMI (Finlande), Jülich CSC (Allemagne), Atos, AQT (Autriche), IQM (Finlande, ces trois derniers *ci-dessous* animé

par Fanny Bouton), avec des keynotes de Iordanis Kerenidis sur le quantum machine learning, Elham Kashefi sur l'ingénierie logicielle quantique et Elvira Shishenina sur le hackathon QuantX d'octobre 2021. Côté État, l'événement était clôturé par les interventions, à distance, de Frédérique Vidal, Cédric O (Numérique) et Florence Parly (Ministère des Armées).



Le **volet entrepreneurial** concerne aussi bien les financements d'investissements public dans les startups directs et indirects via Bpifrance que le financement de programmes d'incubation et d'accélération gérés par les sociétés de valorisation de la recherche (SATT) ou par les structures d'accompagnement des grands ONR comme CNRS Innovation ou Inria Studio. Une consultation a été lancée pour ce second volet. Le premier volet avait déjà démarré indépendamment du plan quantique avec les interventions de Bpifrance qui est au capital de Pasqal, Quandela et C12 ainsi que du fonds Innovation Défense de l'Agence Innovation Défense qui est dans le capital de Pasqal et Quandela. Bpifrance intervient aussi en amont via ses programmes I-LAB, I-NOV et aide au développement deeptech qui ont cofinancé des travaux de recherche d'Alice&Bob, C12, Quandela, Qubit Pharmaceuticals, CryptoNext Security et Wainvam (capteurs quantiques). D'autres projets entrepreneuriaux quantiques doivent voir le jour en 2022 qui devraient pouvoir bénéficier des mêmes sources de financements.

Les **financements européens** couvrent les financements sur appels à projets comme les différents niveaux des subventions ERC, H2020, de l'European Quantum Flagship ainsi que la plateforme de calcul quantique hybride. Sur 2021, la moisson quantique française des **ERC Starting Grants** a été plutôt bonne. Le pays arrive en première position dans les ERC de cette catégorie finançant des chercheurs ayant de 2 à 7 ans d'expérience après leur doctorat avec 7 projets financés, soit environ 10M€ de subventions (vs 4 projets en Allemagne). Il s'agit d'Audrey Bienfait (CNRS, ENS Lyon), Philippe Campagne-Ibarcq (Inria), Jacopo De Nardis (Université Cergy), Anais Dréau (CNRS, Laboratoire Charles Coulomb), Igor Ferrier-Barbut (CNRS, IOGS), Emmanuel Flurin (CEA) et Romain Geneaux (CEA). Sur 2021, il y avait en tout 413 chercheurs financés par ce programme en Europe et dans les pays associés (UK, Israël, Suisse).

Country	All ERC Starting Grants	ERC SG in physics & engineering	ERC SG in quantum physics
Germany	72	30	2
France	53	28	7
UK	46	16	2
The Netherlands	44	16	4

En 2018, Eleni Diamanti du CNRS LIP6 avait obtenu un ERC Starting Grant pour le projet QUSCO qui vise notamment à obtenir un avantage quantique dans la communication entre processeurs quantiques avec des photons. De son côté, Pascale Senellart (C2N) avait obtenu un Starting Grant en 2011 pour ses sources de photons uniques et indistingables qui sont à l'origine de la création de Quandela en 2017. Cela illustre bien la

dimension long terme de tous ces financements publics dans la recherche fondamentale.

Les trois autres types d'ERC soumis en 2021 (Consolidator, Advanced, Synergy) seront annoncés courant 2022. Le dernier ERC Synergy Grant français dans le quantique me semble être le projet QuCube piloté par Maud Vinet (CEA-Leti), Tristan Meunier (CNRS Institut Néel) et Silvano de Franceschi (CEA-IRIG), qui avait obtenu 14M€ de financement sur 6 ans en octobre 2018. Il complète le projet du flagship européen QLSI piloté par cette même équipe avec 14M€ dont un peu plus de 3M€ pour les laboratoires de recherche français. Le Flagship comprend aussi le projet <NE|AS|QC> sur les logiciels quantiques, qui est piloté par Atos et était lancé en 2020, et doté de 4,7M€. Et quelques autres pilotés notamment par **Thales** ou dans les atomes froids, avec l'**IOGS** (équipe d'Antoine Browaeys). En pratique, le Quantum Flagship Européen "à un milliard" lancé en octobre 2018 est maintenant intégré dans les divers programmes de financement H2020. Cela concerne par exemple le projet **Phoquising** lancé en 2020, doté de 3,3M€, et auquel participent Pascale Senellart (C2N) ainsi qu'Elham Kashefi (CNRS LIP6) et Marc Kaplan (VeriQloud).

Pour ce qui est des **financements privés** prévus dans la stratégie quantique nationale à raison de plus de 100M€ par an, on les retrouve matérialisés en 2021 dans les belles levées de fonds de **Pasqal** (avril 2021, 25M€), **C12** (juin 2021, 10M€) et **Quandela** (novembre 2021, 15M€) qui font appel à un mix de bpifrance, de fonds d'investissement (comme Quantonation, le principal fonds d'investissement dédié aux startups du quantique dans le monde, Omnes, Brega, Elaia Partners, 360Capital, ...) et de corporate venture (Airbus, Total, ...). Cela fait la moitié du compte sachant que ces montants pourraient évoluer à la hausse les années à venir et qu'ils comprennent aussi les investissements industriels, non inventoriés, comme ceux d'Air Liquide, Orano, Thales et Atos, sans compter la R&D interne des grandes entreprises utilisatrices. Cette dernière est cependant encore très modeste à l'heure actuelle.

Et les Assemblées qui jouent un rôle de contrôle de l'action du gouvernement ? Sous la houlette de Cédric Villani, l'**OPECST** (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) intégrant des élus du Sénat et de l'Assemblée Nationale organisait une **audition publique** sur la stratégie quantique française le 21 octobre 2021. L'audience durait quatre heures ce qui est pas mal avec les interventions de Neil Abroug (SGPI), Philippe Chomaz (CEA), Pascale Senellart (C2N, Quandela), Georges-Olivier Reymond (Pasqal), Philippe Duluc (Atos), Thierry Debuisschert (Thales), Jean Lautier-Gaud (ixBlue), Sébastien Tanzilli (CNRS, qui y coordonne la recherche quantique), Cédric Oudiette (Airbus), Damien Stehlé (ENS Lyon, spécialiste en PQC) et Henri Gilbert (ANSSI). Il n'est néanmoins pas certain que cela soit suffisant pour les Assemblées pour exercer une quelconque influence sur la conduite d'un tel plan.

Une souveraineté chimérique ou réaliste ?

La souveraineté numérique est devenue un sujet politique marquant en 2021. Elle touche plein de sujets comme pour le cloud, la cybersécurité et les semi-conducteurs. Le cloud est un sujet ambigu, surtout au vu des annonces de Bleu en mai 2021, une offre de cloud "de confiance" concoctée par Orange et Capgemini intégrant des logiciels de Microsoft, puis d'une offre voisine annoncée en octobre 2021 par Thales et exploitant les logiciels de Google. Le "cloud souverain" a laissé la place au "cloud de confiance", permettant aux logiciels américains d'être exploités, les données étant hébergées en France. OVHcloud propose aussi un cloud de confiance labellisé SecNumCloud par l'ANSSI. Le tout s'appuie sur les machines virtuelles de VMware. Et oui, dans la plupart des grandes catégories de logiciels d'infrastructure, les offres leader sont souvent américaines.

Comme les technologies quantiques sont encore balbutiantes, l'Europe et la France espèrent se mettre en ordre de bataille pour éviter la situation de dépendance dans laquelle elles se trouvent dans le numérique classique aussi bien côté processeurs et serveurs (Intel, AMD, Nvidia, HPE, Dell-EMC) que logiciels d'infrastructure clés (Microsoft, Google, Oracle, IBM, Huawei, ...). La souveraineté ne veut pas dire autarcie. Elle est à géométrie variable : il s'agit de produire les technologies clés lorsque c'est possible, avec les avantages industriels et

économiques que cela procure si les économies d'échelle et les exportations le permettent, d'y avoir accès lorsque cela ne l'est pas et que les technologies acquises puissent être déployées en garantissant la sécurité des usagers.

Dans le quantique, la France peut tabler sur plusieurs cartes qui se mettent en place progressivement suffisamment en amont du cycle de l'innovation pour avoir un impact potentiel.

Cela commence avec les **startups** Pasqal, Quandela, C12 et Alice&Bob ainsi qu'avec la filière des qubits silicium de Grenoble (CEA et CNRS) en espérant qu'elles soient bien financées pour se développer à l'échelle internationale et qu'elles puissent créer et préserver une avance technologique face à l'abondante concurrence. En tout cas, chacune de ces startups ou projet a largement de quoi se différencier avec des approches technologiques comme les "qubits de chats" pour Alice&Bob, les qubits photons pour Quandela et l'une des rares filières intégrées dans le monde sur les qubits silicium ou les nanotubes de carbone de C12. Elles s'appuient toutes sur des équipes de recherche émérites issues du CNRS, du CEA et d'Inria. Au-delà des enjeux scientifiques et technologiques de ces projets, elles auront besoin de financements importants et de talents. Et il faudra faire en sorte de pouvoir faire appel aux financements là où ils sont tout en évitant une prise de contrôle par des intérêts étrangers. Ces financements doivent être aussi conditionnés par des avancées scientifiques et technologiques concrètes.

La France pesait environ 3% du PIB mondial en 2021 (*source*). Le gouvernement et la French Tech étaient bien contents de battre des records de financement de startups en 2021 en atteignant 11,6 milliards d'Euros, +115% d'augmentation par rapport à 2020. Surtout grâce aux licornes qui sont maintenant 25. Mais cela ne représentait que 2,1% du financement mondial des startups, évalué à \$621B, lui-même en croissance de +111% (*source*). Comme quoi il faut toujours observer les ratios relatifs plutôt que les valeurs absolues ! C'est d'ailleurs presque exactement ce que pèse le financement des startups du quantique en France par rapport au monde entier ("life to date"), qui est à 2%. L'enjeu économique dans un secteur comme le quantique est d'obtenir une part de marché mondiale supérieure à ces ratios allant de 2% à 3%. Pourquoi pas dans le financement des startups, puis ensuite, dans le chiffre d'affaire des sociétés du secteur, des startups aux grandes entreprises. On n'obtiendra probablement pas celle des USA, mais on peut espérer obtenir un peu plus que 3%, surtout par le biais de consolidations à l'échelle européenne. Cela devrait être un indicateur de réussite de n'importe quel plan stratégique industriel, souverain ou pas.

L'approche française est en tout cas plus souveraine que celle de l'Allemagne qui accueille à bras ouverts IBM et D-Wave dans ses laboratoires de recherche. IBM opère dans ses locaux près de Stuttgart une machine de 27 qubits qui en pratique ne sert à rien et est émuloable avec un serveur classique. L'accès à la machine est sous-traité au Fraunhofer Institute. C'est un petit peu comme si Inria avait créé une solution de cloud pour fournir aux chercheurs français un accès à un processeur quantique de Google ou IBM. Vous imaginez le tollé ! Pour sa part, le Jülich Supercomputer Center à Munich vient d'inaugurer un D-Wave Advantage de 5000 qubits à recuit quantique, ce nombre n'étant pas comparable au nombre de qubits des ordinateurs quantiques programmables par portes quantiques comme ceux d'IBM.

Cela se poursuit avec des **partenariats unilatéraux ou multilatéraux**, comme celui avec les Pays-Bas signé par Cédric O à Paris le 1er septembre 2021 et un autre, plus générique sur recherche, intégrant le quantique, signé avec les USA en décembre 2021 par Frédérique Vidal. Le partenariat avec les Pays-Bas couvre la recherche et l'entrepreneuriat. Une concrétisation très en est la fusion "pacifique" entre Pasqal et l'éditeur de logiciels quantiques néerlandais Qu&Co annoncée le 11 janvier 2022, qui contribuera notamment à élargir la présence géographique de Pasqal, surtout en Europe. La consolidation des acteurs est un point de passage obligé si l'on veut créer des acteurs de taille critique en Europe et ils devront s'attaquer au marché US quoi qu'il arrive. C'est très bien compris aux sommets de l'état.

Le plan quantique encourage le développement des technologies habilitantes comme en **photonique** (Azur Laser Systems, ...), dans le **câblage** (Radiall, Atem) et dans la filière de la **cryo-électronique** de contrôle des qubits comprenant des travaux de recherche au CEA-LIST et quelques projets entrepreneuriaux en cours de gestation. Cela a donné lieu à des appels à projets. Ce volet du plan est intéressant car il lui apporte une sorte de “tolérance de pannes”. Faire progresser ces technologies relativement classiques a un intérêt économique même dans le cas hypothétique où la mise au point d’ordinateurs quantiques se heurterait à des obstacles insurmontables.

Le plan quantique accompagnera la filière des **capteurs quantiques** avec des acteurs tels que **Thales**, **ixBlue** (qui a digéré Muquans en 2021), et quelques autres startups (Chipiron, Wainvam, ...), le tout étant supporté par un intérêt significatif de la **DGA** au Ministère des Armées. Cette partie du plan, assez méconnue, est assez critique. En effet, c’est là où le risque scientifique est le plus faible. Autant l’avènement d’ordinateurs quantiques pratiquement utile reste une conjecture, autant les capteurs quantiques fonctionnent déjà et dans des marchés divers qui restent à explorer.

La souveraineté passe aussi par la maîtrise de la production et de l’approvisionnement en **matières premières critiques**. Ainsi, **Orano** annonçait en **mars** et **octobre** 2021 se lancer dans la production d’isotopes rares comme le silicium 28, indispensable pour les qubits silicium de la filière de Grenoble, via une nouvelle unité de production située au Tricastin dans la Drôme. Jusqu’à présent, il fallait s’approvisionner en Russie. De son côté, **Air Liquide** annonçait en décembre 2021 un contrat d’approvisionnement en hélium 3 au Canada avec Laurentis Energy Partners et sur 10 ans. L’hélium 3 est un gaz indispensable pour les cryostats à dilution utilisés dans les processeurs quantiques à base de qubits supraconducteurs et silicium.

Là où le bât blesse, c’est dans le logiciel où la filière française est encore limitée. Nous avons tout juste une demi-douzaine de startups dans le domaine. On peut cependant noter un doublement des effectifs dans le domaine chez **Inria**, dont la filière quantique est coordonnée par Harold Ollivier (quelques dizaines de chercheurs en tout, docs et post-docs compris). Les équipes logicielles quantiques du **CEA-LIST** sont aussi en train de grandir. En attendant, IBM s’impose plutôt bien à l’échelle mondiale avec sa plateforme Qiskit. Or la bataille technologique du quantique sera comme toutes les autres batailles du numérique, une affaire de plateformes logicielles. C’est un énorme point de vigilance. L’un des points forts du plan quantique côté logiciels est la part belle donnée à la cryptographie post-quantique (PQC), qui peut s’appuyer sur une filière de très bon niveau comme en témoignent les nombreuses contributions françaises aux projets retenus par le NIST aux USA.

En rebouclant avant le début de cette partie, la notion de cloud quantique souverain, ou tout du moins “local” aurait tout son sens. Elle prend forme avec la plateforme de calcul hybride qui sera surtout destinée aux chercheurs et dans un cadre d’appels à projet réguliers pour accéder aux ressources du couple supercalculateur et processeur quantique. Il manque juste une offre commerciale provenant d’un ou de plusieurs acteurs du cloud européens ou français. En la matière, plusieurs acteurs du cloud français pourraient jouer un rôle, **OVHcloud** en premier. Ce serait l’occasion de mettre à disposition d’un large public de développeurs les émulateurs d’Atos, les simulateurs quantiques de Pasqal et les autres processeurs quantiques locaux tels que ceux de Quandela. Le cloud s’opère différemment d’une plateforme hybride intégrant un supercalculateur. Cela doit être “à la demande” sans passer par des appels à projets. C’est notamment le besoin de base pour des étudiants de l’enseignement supérieur, puis des développeurs chez les éditeurs de logiciels, les prestataires de services comme Accenture et Capgemini qui ont tous les deux décidé de se lancer dans le calcul quantique et les entreprises. Pour ce faire, il ne faut pas attendre l’arrivée dans plus de 10 ans du calculateur quantique scalable quand les places seront déjà prises. Il faut se lancer dès maintenant !

Les pôles quantiques régionaux se structurent

Pendant que le plan quantique se mettait en route à l'échelle nationale, de nombreuses régions étaient actives pour structurer leurs écosystèmes quantiques respectifs, simplifiant au passage le travail de l'État. Le Rapport Forteza publié en janvier 2020 avait recommandé de structurer et financer les écosystèmes régionaux, à commencer par ceux de Paris, Saclay et Grenoble. La proposition n'avait rien d'original puisque nombre de pays ont adopté le modèle des hubs (USA, UK, Allemagne, ...). Cela n'a pas été directement suivi d'effets dans le plan quantique. Le centralisme jacobin est passé par là. C'est aussi lié à la très compliquée relation entre ces derniers et les Universités qui sont un peu les parents pauvres du plan quantique. L'État semblait aussi refroidi par les lancements des 3IA du plan sur l'intelligence artificielle, les instituts interdisciplinaires sur l'IA qui ont situés à Paris (PRAIRIE), Toulouse (ANITI), Grenoble (MIAI) et Nice (3IA Côte d'Azur) et souhaitait éviter la prolifération de structures nouvelles de recherche. Malgré ça, les hubs quantiques régionaux ont pris forme et/ou se sont développés en se débrouillant, notamment avec l'aide financière des régions et avec les sources de financement disparates du plan quantique national.

Cela a commencé par le **lancement de NaQuiDis (site)** début mars 2021 à Bordeaux. Le hub quantique de la région Nouvelle Aquitaine consolide les projets de recherche en technologies quantiques, en particulier dans les capteurs quantiques, la communication et les technologies habilitantes, en particulier en photonique. Il associe l'Institut d'Optique Graduate School (avec Philippe Bouyer), l'Université de Bordeaux, l'Université de Limoges (laboratoire XLIM), le CNRS, ainsi que le pôle de compétitivité ALPHA – Route des Lasers & des Hyperfréquences et la Région Nouvelle-Aquitaine. Du côté des entreprises, nous avons Muquans, maintenant intégré dans ixBlue ainsi que Azur Light Systems, GLOphotonics et Spark Lasers. NaQuiDis est doté d'un financement de 10M€ sur quatre ans et est dirigé par Audrey Durand.

En Occitanie était créé début 2021 l'**Institut Quantique Occitan (site)** associant les universités Toulouse III – Paul Sabatier et de Montpellier, l'INSA, le CNRS et la Région Occitanie. Cela comprend notamment le LIRMM et le laboratoire Charles Coulomb. L'ensemble regroupe environ 200 chercheurs et est financé à hauteur de 10M€. Côté secteur privé, il associe IBM (et sur Q Hub Center de Montpellier lancé en 2018), Atos, Timelink Microsystems, Airbus, Thales Alenia Space, le CNES et le Cerfacs (centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique). Parmi les chercheurs de la région Occitanie, citons Aida Todri-Sanial du LIRMM qui travaille sur les outils de simulation numérique de dispositifs électroniques (CMOS) dans son groupe de recherche QuantUM de l'Université de Montpellier, Anaïs Dréau, chercheuse au laboratoire Charles Coulomb qui depuis fin 2021 préside aussi le GDR IQFA du CNRS (groupement de chercheurs en physique et technologies quantiques), Mikhail Dyakonov du même laboratoire, qui est connu pour son scepticisme concernant le calcul quantique, et le physicien David Guéry-Odelin de l'Université Paul Sabatier – Toulouse 3.

À Strasbourg, la recherche quantique s'est structurée dans le cadre d'**aQCess** («Atomic quantum computing as a service – aQCess»), une plateforme publique en physique quantique pilotée par Guido Pupillo et Shannon Whitlock, chercheurs à l'Institut de science et d'ingénierie supramoléculaires de l'Université de Strasbourg qui sont spécialisés dans les atomes froids. Ce projet financé via un programme EquipEx+, financé dans le cadre du plan quantique, vise à créer un ordinateur quantique "gate-based" à base d'atomes froids. Il sera hébergé dans le Centre Européen des Sciences Quantiques à Strasbourg qui consolidera les laboratoires de recherche quantique de la ville. L'initiative associe cinq instituts de recherche de Strasbourg (Isis, IC, IPCMS, Icube, Irma), un institut à Nancy (LPCT), un institut partenaire à Montpellier (ICGM) et des partenaires internationaux : l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT) en Allemagne, l'Université de Vienne en Autriche, BASF, ainsi que l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke au Canada et le Jülich Supercomputing Center en Allemagne. Le projet couvre aussi bien les aspects physiques et hardware que logiciels, jusqu'aux cas d'usages.

A Grenoble, la **Fédération QuantAlps** a pris forme début 2022. Elle prend la suite de QuEnG (Quantum Engineering Grenoble) et est codirigée par Alexia Auffèves et Anna Minguzzi. Elle regroupe tout l'écosystème

quantique grenoblois avec le CNRS (Institut Néel, LPMMC), le CEA (Leti, LIST, IRIG), l'UGA (Université Grenoble Alpes), Inria et les industriels (Air Liquide, Radiall, Atos, ...). Cela va bien au-delà de la filière des qubits silicium qui est une spécialité locale bien marquée. Quelques startups dans les technologies quantiques grenobloises devraient voir le jour en 2022, à commencer par SilentWave, dans la cryo électronique de lecture des qubits, issue de l'Institut Néel. C'est à partir de ce même institut qu'Alexia Auffèves a lancé en novembre 2021 l'idée d'une initiative internationale sur l'énergétique du calcul quantique ([détails ici](#)).

En Île de France, les choses sont déjà assez bien structurées, notamment avec **PCQC** (codirigé par Eleni Diamanti et Iordanis Kerenidis) qui fédère l'écosystème quantique parisien ainsi que **Quantum Saclay**, lancé en novembre 2019 par Pascale Senellart, et qui est à l'origine de plusieurs initiatives coté formation avec les masters **ARTEQ** (physique et informatique quantique), M2 **QLMN** (physique quantique), M2 **QDCS** (informatique quantique) et Erasmus Mundus **QUARMEN** (QUANTUM Research Master-level Education Network), le tout étant complété par des partenariats industriels pour lancer ces formations. Au niveau de l'ensemble de la région, il faut aussi compter avec **SIRTEQ**, un programme de recherche francilien financé par la région et qui est en cours de renouvellement. La Région finance aussi son programme **Pack quantique** (PAQ) qui, sur trois ans depuis 2020 et doté de 1,5M€, finance des projets d'expérimentation de technologies quantiques associant startups et entreprises utilisatrices.

À part la région AURA, toutes les régions citées ici ont mis au pot pour financer leur écosystème local. Elles jouent bien leur rôle pour dynamiser des bassins d'emplois très qualifiés.

Une communication à améliorer

En périphérie du plan, signalons deux nouvelles sources d'information sur l'actualité, en plus de ce blog et des **podcasts** Quantum et Decode Quantum que Fanny Bouton et moi-même publions régulièrement :

- Une **information hebdomadaire** sur l'actualité quantique en France consolidée par l'Usine Digitale.
- Le lancement de l'émission **Objectif quantique** mensuelle d'une heure animée par Jérôme Colombain, destinée au grand public et diffusée sur 01Net et sur YouTube. Avec comme invités pour la première édition de janvier 2022 : Jacques-Charles Lafoucrière du CEA, Louis Paul Henry de Pasqal et Valérian Giesz de Quandela. L'émission démarre par des explications "101" sur le calcul quantique qui sont fournies par deux journalistes de 01Net, Gilbert Kallenborn et Adrien Branco.

Tout ceci, en attendant que l'État créé un site web – en français et en anglais – sur le suivi du plan quantique comme il en existe aux **USA**, au **Royaume Uni** et aux **Pays-Bas**. Savoir-faire et faire-savoir vont toujours de pair, surtout à l'échelle internationale ! Le site va venir, mais cela aura pris bien trop de temps.

Pendant ce temps-là, dans le monde

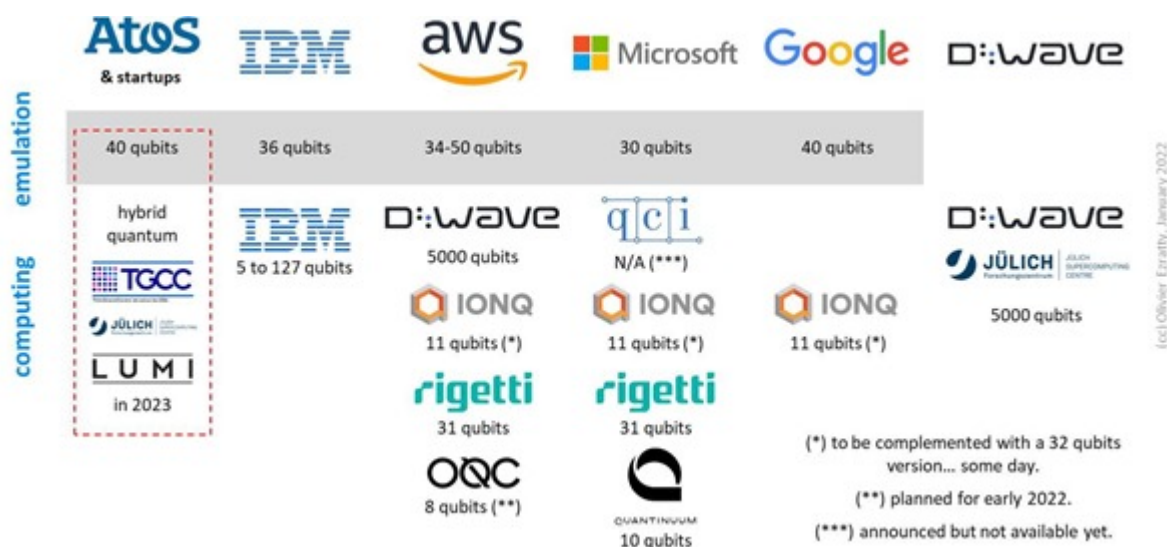
Pendant que la France s'activait, le reste du monde n'était pas au repos, loin s'en faut.

Dans les progrès scientifiques vus d'hélicoptère, on peut citer de nombreuses propositions de codes de correction d'erreur plus efficaces, mais avec des publications très difficiles à interpréter et quelques avancées dans la cryoélectronique de contrôle de qubits supraconducteurs ou à spin d'électrons, notamment avec la puce HorseRidge 2 d'Intel. Une autre tendance clé est l'émergence du thème du "scale-out" du calcul quantique par la connexion photonique entre processeurs quantiques. Elle a vu la création de QphoX (Pays-Bas) et de Photoniq (Israël) en 2021. IonQ et IBM ont aussi annoncé que leurs plans de scale-out passeraient par là, à partir de 1121 qubits pour ce qui concerne IBM. Cette voie pour créer des ordinateurs quantiques scalable est aussi incertaine et complexe que le "scale-in" classique consistant à augmenter inexorablement le nombre de

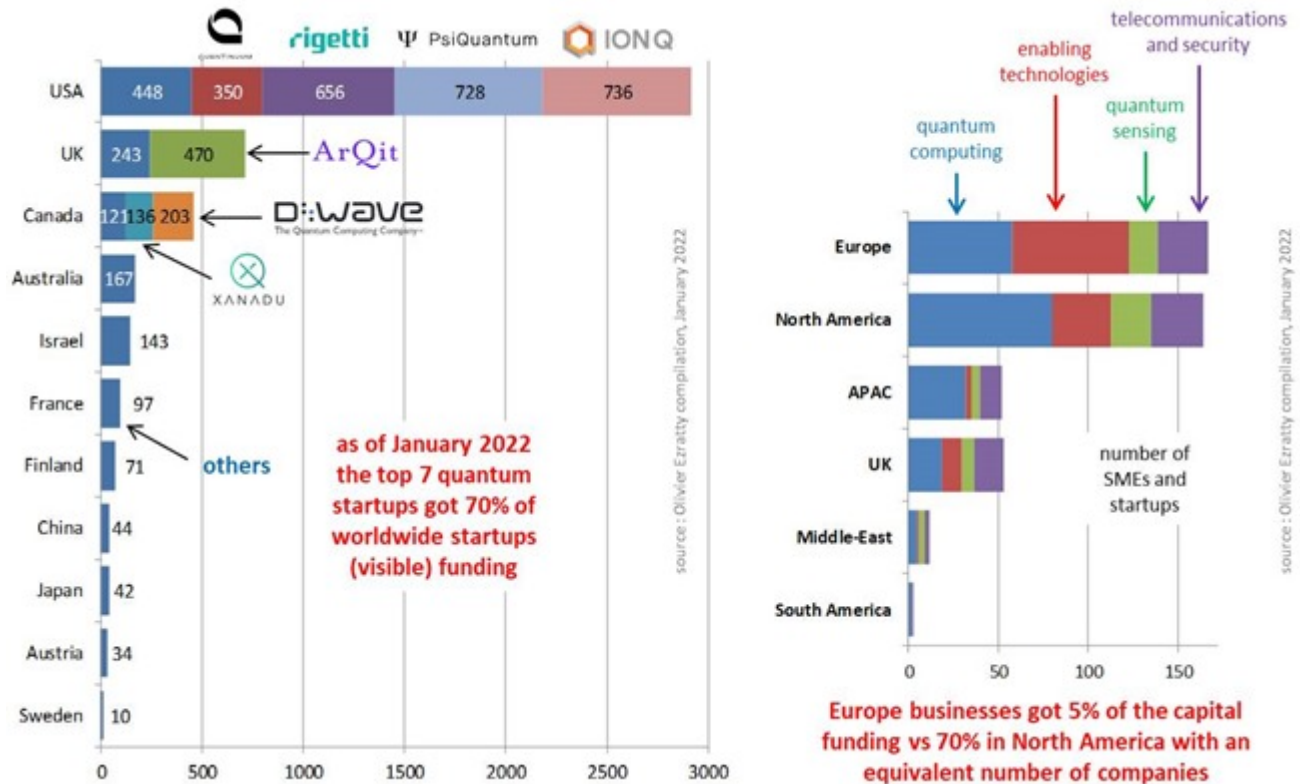
qubits d'un processeur quantique. Des progrès ont également été réalisés à l'échelle de la recherche fondamentale sur les mémoires quantiques, notamment au CEA. Il y en a aussi dans le domaine des algorithmes, comme dans le quantum machine learning, ainsi que dans les outils d'ingénierie logicielle pour gérer le cycle de vie des logiciels quantiques. En pratique, l'actualité scientifique quantique mondiale est bien plus riche que ces quelques lignes. Elle continuera inexorablement d'apporter son lot de surprises dans les mois et années qui viennent.

2021 a été marqué par plusieurs annonces : la Chine avec ses 66 qubits supraconducteurs et 113 qubits photons (en "échantillonnage de bosons", qui ne sont pas encore programmables) annoncé au début de l'été, IBM avec ses 127 qubits présentés en novembre puis Rigetti avec ses 2x40 qubits annoncés en décembre 2021, au même moment que les 500 qubits annoncés par Pasqal (mais en mode simulation, pas en gate-based, ce qui fait que les nombres de qubits ne sont pas facilement comparables). Nous avons aussi eu l'annonce par D-Wave de son lancement dans les qubits programmables (gate-based).

De plus, les offres d'accès aux ordinateurs quantiques dans le cloud se sont consolidées, notamment chez IBM, Microsoft, Amazon et Google. Et les offres européennes sont en voie de construction, comme celles, déjà évoquées du TGCC, de Lumi et du Jülich Supercomputing Center qui proposeront des solutions intégrées de calcul hybride associant un supercalculateur, des processeurs quantiques ainsi que les systèmes d'émulation QLM d'Atos. Ces derniers sont en pratique les plus avancés et les plus diffusés dans le monde, aussi bien aux USA (DoE) qu'en Europe et en Asie (Japon). Ils permettent en effet l'émulation classique des trois classes d'ordinateurs quantiques : à portes quantiques (type IBM), les simulateurs quantiques (Pasqal) et le recuit quantique (quantum annealing, D-Wave).



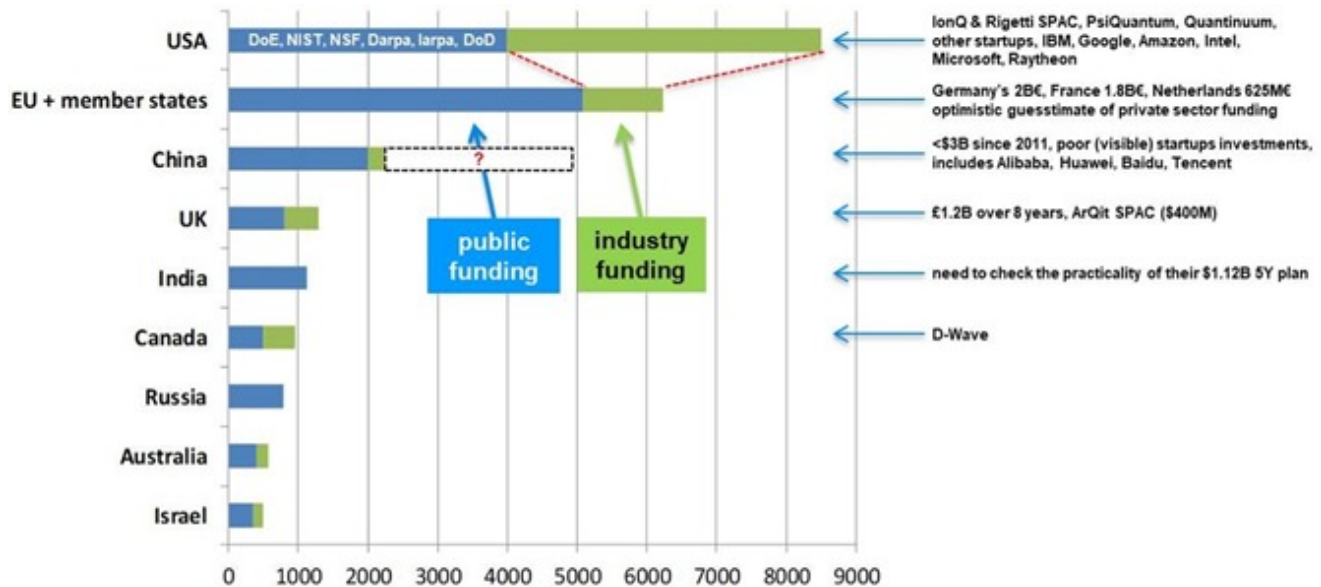
La hype quantique a été bien visible via le truchement des niveaux de financement élevés de startups américaines, notamment via le procédé des SPAC (special acquisition purpose company) qui sont des fonds d'investissements introduits en bourse et n'ayant comme seul actif une startup qu'ils digèrent par la même occasion. Dans le monde en 2021, il y a eu en tout 613 SPACs et 298 introductions en bourse associées (source). Nous avons ainsi eu les SPAC d'IonQ (IPO au NYSE en octobre 2021, récoltant en tout \$650M pour une valorisation de \$2,5B à mi-janvier 2022, sachant qu'elle avait atteint \$4.5B en novembre 2021) et Rigetti (annonce en octobre 2021 avec une levée de fonds de \$458M et une valorisation estimée à \$1.5B). Le Britannique ArQit spécialisé dans les communications quantiques satellites a aussi lancé son SPAC pour récolter \$400M. Enfin, citons la fusion d'Honeywell Quantum Systems avec le Britannique CQC qui est devenu Quantinuum, avec dans la corbeille de mariée \$270M de financements d'Honeywell.



Cela donne toujours ce même état des lieux du financement des startups et PME (connu publiquement) dans le monde avec une concentration de 70% sur les 7 plus grands projets. Mais, cette part a baissé car mi-2021, seulement cinq startups consolidaient 70% du financement mondial. C'est lié à l'intégration d'Arqit (UK) et Quantinuum (fusion d'Honeywell Quantum Systems et CQC) dans ce top 7. L'Europe concentre toujours seulement 5% des financements mondiaux (documentés) face à 70% pour l'Amérique du Nord.

Il faudrait d'ailleurs que j'harmonise les modes de financements de startups européennes pour celles qui en obtiennent via des aides EIC de l'Union Européenne. Ainsi, l'Espagnole **Multiverse Computing** a obtenu €12.5M avec un mélange de subvention et d'obligations convertibles.

Le financement privé des technologies quantiques contribue en tout cas à créer une différence significative entre les USA et l'Union Européenne (EU+France+Allemagne+Pays-Bas+autres). En effet, en montants cumulés, cette dernière semble investir plus via le secteur public, notamment dans la recherche, que les USA. Les USA ont à la fois des startups bien financées et de grands acteurs du numérique (IBM, Google, Microsoft, Intel, ...) qui investissent aussi en fonds propres et n'ont pas d'équivalents en Europe. C'est ce que reflète cette consolidation des financements publics et privés de mon cru. Ils révèlent que la Chine est moins puissante qu'il n'y paraît. J'ai mis en bleu les financements publics connus sur 10 ans alors que les autres données du chart sont sur 5 ans, et en pointillé une inconnue. Le problème avec les Chinois est que leur communication officielle est volontairement floue. Ainsi, on relaie souvent les soi-disant \$10B du financement du seul laboratoire de Hefei, mais la durée de ce financement n'est pas précisée ni le fait que ce laboratoire de recherche ne travaillerait pas que sur les technologies quantiques.



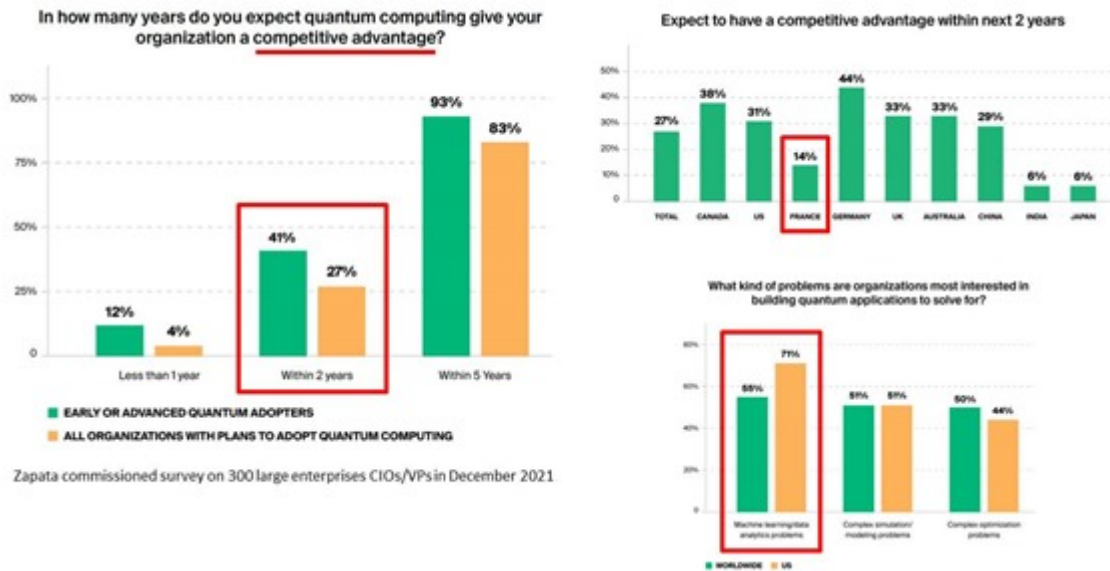
Source: Olivier Ezratty compilation, January 2022, on 5 year period, past, present or future depending on the country. Euro/\$ parity.

Du côté des plans gouvernementaux, le plan français a été suivi de l'annonce du plan Néerlandais en avril 2021, doté de 615M€, dont la gestion a été opportunément confiée à une fondation, Quantum Delta, lui donnant une bonne souplesse opérationnelle. Après des soubresauts et conflits divers, l'Allemagne a mis en branle son plan de 2Md€, avec des financements qui atterrissent concrètement dans les laboratoires de recherche. Aux USA, le National Quantum Initiative Act de 2018 et sa rallonge de 2020 ont notamment débouché sur la création de cinq instituts quantiques au sein du Département de l'Énergie et de trois hubs de recherche centrés autour des Universités, financés par la NSF. L'Inde a pour sa part lancé un laboratoire quantique militaire fin 2021.

L'ensemble de ces plans a engendré une lutte mondiale pour attirer les meilleurs talents, et indirectement, une concurrence entre les laboratoires de recherche publics et les entreprises du quantique. Et en la matière, il faut savoir conserver une balance des mouvements négative... à savoir, importer plus de talents qu'on en exporte. La fuite des cerveaux est parfois non perceptible à court terme. Ainsi, un thésard peu connu peut terminer sa thèse ou faire un post-doc à l'étranger, y rester, et devenir ensuite une start mondiale de son domaine. C'est l'histoire de Yann LeCun dans l'intelligence artificielle !

Comment naviguer dans la hype quantique

Nous sommes en tout cas en pleine "hype quantique" avec une situation un peu confuse, un sujet sur lequel je reviendrais très bientôt avec la publication d'une monographie détaillée de 26 pages et en anglais. La communication des acteurs du privé renforce l'impression que le calcul quantique, c'est pour maintenant, alors que ce n'est pas du tout le cas. Les surpromesses des entreprises du secteur sont plus visibles que les précautions d'usage des scientifiques. Les cas d'applications pratiques sont rarement évalués en tenant compte des ressources nécessaires et qui dans certains cas, sont loin d'être réalisables. Les études de marché sont aussi fantaisistes, certaines allant jusqu'à estimer que celui du calcul quantique pourrait atteindre les \$14.25B d'ici 2026 (source). Elles sont liées à des prévisions très optimistes sur l'arrivée d'ordinateurs quantiques scalables à tolérance de pannes. Cela contribue à renforcer les peurs en termes de cybersécurité, avec la perspective de voir les ordinateurs quantiques casser les clés RSA qui sont à la base de la cybersécurité à clés publiques sur Internet. Et tout cela est repris comme argent comptant par les analystes et consultants, tout comme dans le baratin marketing d'acteurs tels qu'IBM.



On peut retrouver les effets de ces incompréhensions dans la récente enquête diligentée par l'éditeur de logiciels **Zapata**. Réalisée auprès de plus de 300 décideurs informatiques dans le monde dont 10% en France, elle montre que la proportion des entreprises qui s'intéresse au calcul quantique croît rapidement. Elle comprend aussi deux informations qui illustrent une mauvaise interprétation de l'état de l'art du calcul quantique. Le premier cas d'usage envisagé par les répondants sont les "data analytics"... alors que, quoi qu'il arrive, les ordinateurs quantiques ne seront pas adaptés aux applications de la big data. Qui plus est, 41% des sondés pensent que le calcul quantique permettra d'obtenir un avantage compétitif pour leur entreprise d'ici moins de 2 ans. C'est un peu rapide, même s'il est vrai qu'en se préparant dès maintenant, les grandes entreprises seront à même de profiter des avancées progressives du domaine, si et quand elles se concrétiseront.

Enfin, on constate que les entreprises françaises sont moins impliquées dans l'évaluation du calcul quantique. Elles ont à la fois tort et raison. Tort car leurs concurrentes se bougent sur le sujet et qu'il faut du temps pour se l'approprier. Raison dans la mesure où le domaine doit encore gagner en maturité. Il faut juste ne pas se tromper d'objectif : les grandes entreprises doivent évaluer ces technologies, tester des algorithmes à petite échelle, identifier les acteurs clés du marché et développer un pool de compétences. Elles devraient d'ailleurs s'intéresser en priorité aux applications de la simulation quantique (sauce Pasqal) plutôt qu'au calcul à base de portes quantiques (gate-based, sauce IBM). Cela doit être une démarche long-terme. Et nombre d'entreprises devraient aussi investiguer d'autres sujets comme les capteurs quantiques, qui sont pour la plupart déjà opérationnels et commercialisés, avec une très faible incertitude scientifique.

Comparativement, les technologies du calcul quantique sont prometteuses mais encore très incertaines. Il faut s'y habituer. C'est une course de Marathon sans ligne d'arrivée bien définie, pas un cent mètres.

Cet article a été publié le 21 janvier 2022 et édité en PDF le 4 février 2022.
(cc) Olivier Ezratty – "Opinions Libres" – <https://www.oezratty.net>