




Technologies quantiques : une approche en écosystème pour une stratégie nationale ambitieuse

-  *Les technologies quantiques mobilisent d'ores et déjà des instituts de recherche, des universités, des entreprises, à la fois startups ou grands groupes, qui travaillent en écosystème pour explorer les applications possibles pour la science et pour l'industrie ; la formation est un enjeu central pour leur développement.*
-  *Les cas d'usages des technologies quantiques pourraient être nombreux dans des domaines aussi divers que la chimie, l'industrie, la logistique, l'analyse de risque, comme pour le machine learning, la recherche de données, etc. et représenter une opportunité de croissance pour l'économie française.*
-  *Une stratégie nationale ambitieuse pour les technologies quantiques nécessitera de soutenir leur développement par des investissements, de créer le vivier de compétences et de talents nécessaires et d'assurer la mise en place d'un cadre réglementaire favorable à leur essor.*

Observations générales

Les systèmes informatiques reposent sur la capacité à stocker et manipuler des informations. Les ordinateurs actuels manipulent des millions de bits qui stockent les informations sous forme d'états binaires 0 et 1, et travaillent ensemble pour les traiter et les afficher.

La recherche sur l'ordinateur quantique a débuté à partir de l'idée selon laquelle certains calculs voient leur résolution accélérée dans des proportions extrêmement importantes s'ils sont effectués par des bits quantiques plutôt que sur des bits classiques. Le bit quantique ou qubit est l'unité élémentaire pouvant porter une information quantique. Comme le 1 et le 0 sont les deux états d'un bit classique, un qubit est la superposition cohérente d'au moins deux états de base quantiques, que l'on peut noter $|0\rangle$ et $|1\rangle$. L'objectif du développement des technologies quantiques n'est donc pas de remplacer les ordinateurs actuels, mais de compléter leurs systèmes en permettant de nouveaux usages grâce à la démultiplication de leur capacité de calcul.

Au niveau européen, une initiative phare sur les technologies quantiques ([Quantum Flagship](#)), décidée dès 2016, a été lancée en octobre 2018, et couvre 5 domaines : la communication quantique, l'informatique quantique, la simulation quantique, la métrologie et la détection quantiques, et la science fondamentale des technologies quantiques. Dans ce cadre, à l'occasion de [l'Assemblée générale du numérique](#) en juin 2019, sept Etats Membres (Belgique, Allemagne, Italie, Luxembourg, Malte, Pays-Bas et Espagne) ont signé une déclaration aux termes de laquelle ils ont décidé d'explorer ensemble, dans les 12 prochains mois, comment développer et déployer une infrastructure de communication quantique (*quantum communication infrastructure, QCI*) à travers l'Europe dans les dix prochaines années. Les pays signataires travailleront ensemble et avec la Commission européenne pour préparer, avant la fin 2020, un plan d'action visant à explorer les avantages et la faisabilité de la construction de l'infrastructure QCI.

En France, Paula Forteza, députée des Français établis hors de France, a été chargée par le Premier ministre d'une mission temporaire ayant pour objet les technologies quantiques, et est accompagnée dans ses travaux par Iordanis Kerenidis, directeur du Paris Centre for Quantum Computing (PCQC), et Jean-Paul Herteman, ancien PDG de Safran.

L'EXCELLENCE DE LA RECHERCHE : UN ECOSYSTEME PUBLIC ET PRIVE

Les défis de la recherche sur les technologies quantiques restent nombreux, et l'écosystème public et privé est mobilisé conjointement pour y répondre, avec des investissements importants. A l'international, les partenariats de long terme se sont multipliés, comme celui de Google avec l'Université de Californie de Santa Barbara, de Microsoft avec le Pacific Northwest National Laboratory (« PNNL ») ou avec l'université de Washington, du groupe Intel avec l'université technologique de Delft, ou encore d'IBM avec près de 80 partenaires issus des Industries et Universités dans le monde.

En France, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) a développé des partenariats avec Atos sur le calcul intensif, les supercalculateurs et l'informatique quantique ; l'université de Montpellier, avec le soutien de la Région Occitanie - Pyrénées-Méditerranée, s'est associée à IBM pour créer des modules de formation sur le calcul quantique et identifier des cas d'usage en relation avec des entreprises. La France mène une recherche de premier plan, notamment au sein du CEA, du CNRS, de l'Inria et sur plusieurs sites universitaires, dont Paris, Paris-Saclay et Grenoble.

L'écosystème du quantique peut également bénéficier de démarches favorisant la co-innovation : par exemple, Microsoft a annoncé récemment rendre accessible en open source, sur Git Hub, le kit de développement quantique comprenant le langage de programmation Q#, qui permet de traduire des algorithmes quantiques, un compilateur, une bibliothèque d'opérations et de fonctions ainsi que des échantillons de programmes.

Les gouvernements du monde entier reconnaissent la nécessité d'investir dans l'informatique quantique. Aux États-Unis, des agences fédérales soutiennent la recherche en science de l'information quantique depuis plus de 20 ans, pour un montant estimé entre 200 et 250 millions de dollars. En complément, le gouvernement américain s'est engagé en décembre 2018 à financer, à hauteur de 1,2 milliard de dollars, les activités de promotion de l'informatique quantique sur une période initiale de cinq ans, et appelle à l'élaboration d'un plan stratégique pluriannuel avec de nouveaux centres de recherche rassemblant des universitaires de différentes disciplines, telles que l'informatique, la physique et l'ingénierie. En Chine, la science de l'information quantique a été désignée comme l'un des quatre « mégaprojets » du plan de développement scientifique et technologique pour la période 2006-2020, avec un financement annuel pour la R&D estimé à 244 millions de dollars. La Chine a également été le premier pays à franchir deux étapes clés en matière de communication quantique : exploiter une ligne fixe de communication quantique à longue distance entre Beijing et Shanghai et mener le premier appel vidéo crypté de manière quantique.

D'autres Etats européens ont déjà engagé d'importants investissements dans la recherche et la formation aux technologies quantiques : par exemple, le gouvernement britannique a mis à disposition un financement de plus de 200 M€ pour soutenir les étudiants en thèse dans les domaines de l'ingénierie et sciences physiques ainsi que pour promouvoir la recherche en technologies quantiques. Des initiatives comme l'école d'été franco-allemande « Quantum Future | Academy », pilotée par les ministères allemand et français et réunissant en août 2019 l'Université de Strasbourg, l'Université Paris-Saclay, l'Université de la Sarre et le Karlsruhe Institut für Technologie, devraient également être multipliées parce qu'elles contribuent à créer un réseau international et interdisciplinaire de chercheurs, entrepreneurs, doctorants et étudiants.

Les compétences, à la fois sur les infrastructures et le travail sur les environnements logiciels ou les algorithmes applicatifs, représentent donc un enjeu fondamental pour le développement des technologies quantiques et de leurs applications en France. Il est important de renforcer l'attractivité pour les chercheurs sur le quantique et de faciliter leur mobilité. Il est par ailleurs essentiel de développer dès maintenant des filières de formation qui combinent à la fois les parcours « mécanique quantique » et « informatique » pour créer les compétences nécessaires aux métiers du quantique. Il s'agit aussi d'inclure dans les parcours de formation le développement d'algorithmes quantiques nécessaires à la recherche et à l'exploitation industrielle. L'ensemble de la formation, initiale et continue, doit

Septembre 2019 – Technologies quantiques : une approche en écosystème pour une stratégie nationale ambitieuse

également être adaptée pour faciliter l'adaptation des professionnels, actifs ou futurs, aux cas d'usages qui se multiplient dans tous les secteurs.

Les technologies quantiques mobilisent d'ores et déjà des instituts de recherche, des universités, des entreprises, à la fois startups ou grands groupes, qui travaillent en écosystème pour explorer les applications possibles pour la science et pour l'industrie ; la formation est un enjeu central pour leur développement.

DES CAS D'USAGES POTENTIELLEMENT NOMBREUX DANS DES SECTEURS TRÈS DIVERS

L'enjeu central des compétences et de la formation permettra de démontrer, d'explorer et de développer les premiers cas d'usages. D'autres applications, insoupçonnées jusqu'à présent, pourront apparaître dans un futur proche avec l'accélération de la recherche industrielle. Il est donc nécessaire que les acteurs industriels aient accès aux technologies quantiques, pour être demain en mesure de développer de nouveaux usages. Les ordinateurs quantiques sont utilisés aujourd'hui principalement pour la recherche, à la fois publique et privée, et permettent de piloter le développement d'algorithmes basés sur ces technologies.

Grâce à leurs propriétés physiques intrinsèques, les systèmes quantiques sont capables de traiter un très grand nombre d'informations en parallèle par rapport au calcul traditionnel, offrant ainsi une puissance de calcul inégalée dans le monde des ordinateurs de très haute performance.

Les premières applications les plus probables pourront concerner la chimie, à la fois par exemple pour la pharmacologie (accélération de découverte de molécules, découverte de molécules complexes, etc.) ou pour l'agronomie ; la cybersécurité ; l'industrie du futur, pour accélérer la production de composants ; la métrologie, pour améliorer la précision des mesures de temps ; l'analyse de risques ; l'assurance et la banque ; ou encore la logistique, pour améliorer les parcours de livraison.

Les usages des technologies quantiques concerneront également la recherche de données, qui pourrait bénéficier d'une accélération exponentielle, ou encore le *machine learning*, en permettant d'optimiser la phase d'apprentissage d'une intelligence artificielle en exploitant des bases de données inexploitées à ce jour via le calcul traditionnel. Certains acteurs travaillent en avance de phase sur le développement de ces cas d'usages ; il est important d'être dans la course et de ne pas prendre du retard pour créer de nouvelles opportunités en France.

Les cas d'usages des technologies quantiques pourraient être nombreux dans des domaines aussi divers que la chimie, l'industrie, la logistique, l'analyse de risque, comme pour le machine learning, la recherche de données, etc. et représenter une opportunité de croissance pour l'économie française.

POUR UNE STRATÉGIE AMBITIEUSE DE LA FRANCE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

La France, comme ses partenaires européens, a vocation à placer les technologies quantiques en tête de ses priorités de recherche et développement pour les prochaines années. L'écosystème dépassant les frontières géographiques, sa stratégie pour le développement du quantique devra s'appuyer sur une logique de partenariat avec l'ensemble des acteurs impliqués à l'échelle internationale. Ces partenariats permettront de dépasser l'informatique exascale, soit la capacité à effectuer un milliard de milliards de calculs chaque seconde, et de conférer une place stratégique à la recherche française académique et industrielle, à la fois sur la scène européenne et internationale.

Septembre 2019 – Technologies quantiques : une approche en écosystème pour une stratégie nationale ambitieuse

La France devrait créer le vivier de compétences et de talents nécessaires pour répondre aux besoins des entreprises :

- Au-delà de l'enjeu central de la formation vers les métiers du numérique, sur lequel Syntec Numérique est engagé depuis de nombreuses années, il est nécessaire d'augmenter le volume de formations intégrant les technologies quantiques pour répondre aux besoins déjà en tension. Pour cela, le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation devrait organiser un partenariat durable avec l'industrie pour multiplier les programmes d'apprentissage de la programmation quantique et le développement de logiciels ou d'algorithmes quantiques, dans les universités ou en ligne, et pour garantir qu'ils soient adaptés aux besoins des entreprises qui investissent ce secteur.
- Les entreprises de tous les secteurs devraient être encouragées à s'engager sur de premiers cas d'usages en collaboration avec les acteurs qui font de la recherche et développent ces technologies afin de former leurs collaborateurs et leur permettre d'utiliser les systèmes hybrides qui vont se développer dans les prochaines années.

La France devrait soutenir le développement des technologies quantiques en investissant dans la recherche :

- Le gouvernement devrait soutenir l'excellence de la recherche des universités ou des instituts de recherche et accroître le financement de la recherche fondamentale sur les technologies quantiques alternatives et les algorithmes quantiques. Le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation a identifié l'importance de l'informatique exascale, et les travaux en cours pourront bénéficier des apports du quantique. La recherche et les investissements dans d'autres technologies visant également à accroître la fiabilité et l'évolutivité des qubits devraient également être encouragés, comme l'électronique de contrôle, la cryogénie et les ordinateurs classiques nécessaires à l'informatique quantique.
- Le développement d'algorithmes quantiques, qui peuvent être conçus et codés aujourd'hui sans attendre l'ordinateur quantique, doit également concentrer les investissements, pour augmenter notamment le nombre d'outils de débogage et de vérification pour identifier les erreurs dans les programmes.
- Afin de créer un écosystème attractif pour les chercheurs internationaux, il est nécessaire de garantir des procédures à la fois simples et rapides pour les parcours professionnels partagés entre la recherche publique et l'industrie, et ainsi favoriser les partenariats et la co-création entre acteurs publics et privés.

La France devrait assurer la mise en place d'un cadre réglementaire favorable à l'essor des technologies quantiques :

- Un bureau scientifique, à la valeur reconnue par la communauté scientifique, pourrait être créé auprès de l'exécutif pour contribuer à constituer une dynamique durable sur les enjeux scientifiques ou technologiques comme, par exemple, l'intelligence artificielle ou le quantique.
- La transposition de la directive Droit d'auteur en droit national doit veiller à ce que tous les acteurs de la R&D, y compris les chercheurs privés, puissent avoir recours au *text and data mining* (TDM) qui permet d'identifier des informations parmi de larges quantités de données.
- La valeur ajoutée des projets de R&D, tout comme de l'innovation, réside dans les compétences humaines et techniques des chercheurs, ingénieurs ou créateurs français. Aussi, il est nécessaire de maintenir le taux actuel des frais de fonctionnement éligible au Crédit Impôt Recherche (CIR), suffisamment élevé pour contribuer à permettre aux entreprises de retenir en France ces compétences et activités de recherche. Il est en outre essentiel d'encourager, y compris fiscalement, des investissements de long terme dans les nouvelles technologies, par les entreprises elles-mêmes ou par les fonds d'investissements.

Une stratégie nationale ambitieuse pour les technologies quantiques demandera de soutenir leur développement par des investissements dans la recherche, de créer le vivier de compétences et de talents nécessaires et d'assurer la mise en place d'un cadre réglementaire favorable à leur essor.

Syntec Numérique est l'organisation professionnelle des Entreprises de Services du Numérique (ESN), des éditeurs de logiciels et des sociétés de conseil en technologies. Elle regroupe plus de 2 000 entreprises adhérentes qui réalisent 80% du chiffre d'affaires total du secteur (56,3Md€ de chiffre d'affaires, 474 000 employés dans le secteur). Elle compte 30 grands groupes, 120 ETI, 1 000 PME, 850 startups et TPE ; 11 Délégations régionales (Hauts de France, Grand Est, Auvergne Rhône-Alpes, Provence Alpes Côte d'Azur, Occitanie, Nouvelle Aquitaine, Pays de la Loire, Bretagne, Bourgogne-Franche-Comté, Centre Val de Loire, Normandie) ; 20 membres collectifs (pôles de compétitivité, associations et clusters). Présidé par Godefroy de Bentzmann depuis juin 2016, Syntec Numérique contribue à la promotion et à la croissance du Numérique à travers le développement de l'économie numérique et de ses usages, l'accompagnement et l'essor de nouveaux marchés, le soutien à l'emploi, la formation, les services aux membres et la défense des intérêts de la profession.