

Une proposition de stratégie en technologies quantiques

Positionner le Québec mondialement dans
des créneaux stratégiques



Nous sommes Numana, catalyseur d'écosystèmes technologiques du Québec

Fondé en 2007, Numana contribue significativement à la **vitalité économique** et sociale du Québec en réunissant les intervenants des secteurs privé, institutionnel et public des technologies autour d'objectifs communs et d'actions concertées. L'organisme contribue à la **création de valeurs** et **favorise l'innovation** en multipliant les ponts entre les divers acteurs de l'industrie dans une approche par marchés verticaux (quantique, santé connectée, bâtiments intelligents et empathiques etc.) et en partenariat avec les leaders de l'industrie.

Numana est également un acteur dynamique au Québec qui participe à préparer la relève en talents dans les technologies et conseille les différents paliers gouvernementaux sur des sujets technologiques et d'innovation.

Notre vision

Faire de l'innovation technologique une richesse collective. Notre visée est d'accroître l'impact qu'ont les technologies en matière de transformation de chacun des marchés stratégiques pour le Québec de demain.

Notre mission

Accélérer les innovations d'ici qui génèrent les technologies pour les humains de demain...

Comité Aviseur en Quantique

Vincent Aimez

Vice-Recteur, Valorisation et Partenariats, U. de Sherbrooke

Charles Lespérance

Associé – Fonds pour les technologies profondes, BDC Capital

François Borrelli

PDG, Numana

Shibl Mourad

Directeur, Développement logiciel, DeepMind Canada (en son nom personnel)

Richard Bruno

Fellow invité CIRANO

Daria Riabinina et Nathalie Richard

Observatrices du gouvernement du Québec, MEI

André Fougères

Vice-président, Innovation et technologie, INO

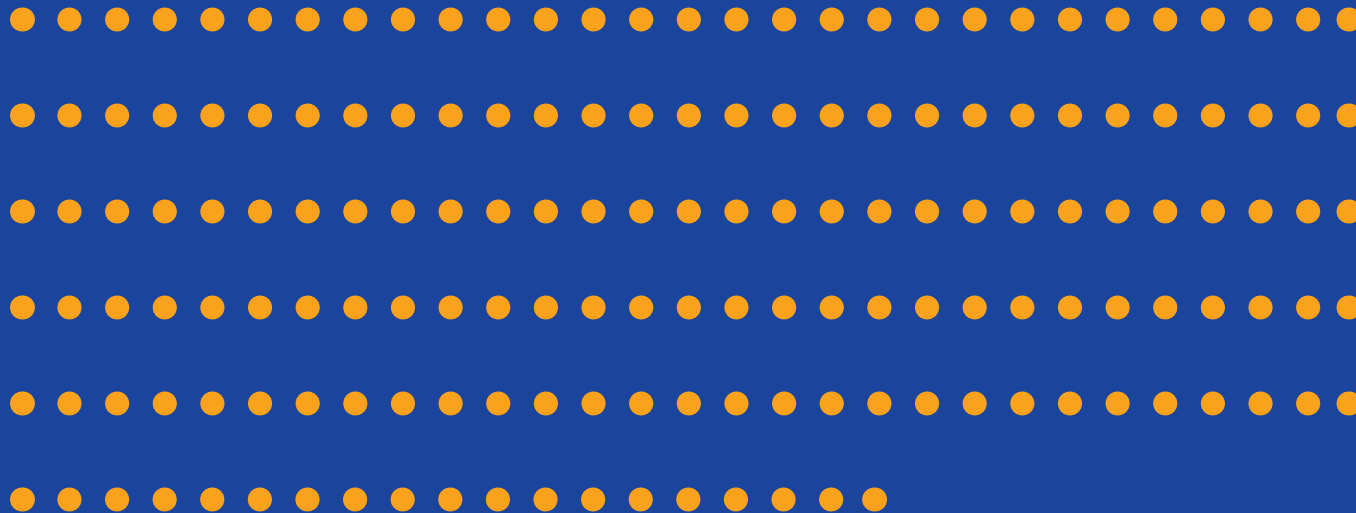
Merci à nos partenaires



Table des matières

Sommaire exécutif	7
Introduction	12
Enjeux de croissance en quantique	19
Les atouts du Québec	29
Perspectives du marché	38
La stratégie québécoise en quantique	50
Conclusion	68
Annexes	72

Sommaire exécutif



Une nouvelle révolution quantique est à nos portes.



Mieux communiquer, se nourrir, produire, combattre les changements climatiques, se protéger des cyberattaques, etc., c'est certain, **la prochaine révolution, dite quantique 2.0, aura un impact socio-économique transformateur.** Elle tire avantage des phénomènes étranges et contre-intuitifs des particules élémentaires (électrons, ions, atomes, photons) soumises aux lois subtiles de la physique quantique que sont la superposition d'états et l'intrication.

Reconnues comme des technologies de rupture, les technologies quantiques auront un impact planétaire majeur sur les nations, les industries, les personnes et la société en général. Selon Yole, leur marché global passera de **480 MUS\$ à 3,2 GUS\$ entre 2018 et 2030**, bouleversant plusieurs secteurs économiques en permettant, par exemple, l'élaboration de nouveaux matériaux, de senseurs, l'optimisation de procédés, des calculs ultra-rapides, des communications ultra sécurisées, etc.

Alors que le Québec est bien positionné mondialement par la qualité de ses recherches en sciences quantiques, peut-il devenir un joueur majeur en technologies quantiques ? Numana a formé un comité aviseur composé de professionnels d'expérience en innovation pour y répondre.

La proposition de **stratégies en technologies quantiques** vise à faire du Québec **un joueur mondial au sein de certains créneaux stratégiques** avec mission « **d'accroître l'utilisation de solutions quantiques dans un ou deux secteurs forts de son économie** », parmi eux, **l'énergie, les services financiers et d'assurances, les transports ou les ressources naturelles.**

Cette stratégie d'affaires **table sur le leadership de piliers industriels pour développer son écosystème**, de l'expertise de sa base scientifique émérite, du soutien proactif des gouvernements - le Québec prévoit y investir 200 M\$ entre 2019 et 2027 et gouvernement le fédéral vient d'annoncer 360 M\$ sur 7 ans - et de l'intérêt mondial grandissant pour ce secteur.



La stratégie en technologies quantiques proposée pour le Québec repose sur deux tactiques prioritaires

1. Développer des produits et des services d'avant-garde

Structurer et accélérer l'émergence d'un écosystème quantique centré autour de la demande de joueurs dominants qui agiront comme locomotives (« Anchor ») notamment en appuyant des projets collaboratifs de R-D, finançant des preuves de concept, dotant le Québec d'infrastructures industrielles ouvertes de R-D, tests et prototypages, en valorisant la propriété intellectuelle et les normes et en explorant des avenues conjointes avec d'autres forces locales telles que l'intelligence artificielle (I.A.) et les données massives (« Big Data »).

2. Supporter la croissance de l'industrie

Attirer, développer et retenir une masse critique de personnel hautement qualifié en sciences, génie, technique et affaires, réaliser des partenariats de R-D autour d'institutions ou des projets d'infrastructure, attirer des chercheurs, appuyer des investissements étrangers et faire une promotion du quantique ici et à l'étranger.

Les démarches proposées visent la mise en place d'un environnement ciblé autour de locomotives économiques locales pour soutenir la croissance de notre écosystème quantique, tout en respectant les enjeux éthiques qui découleront de l'introduction des technologies quantiques dans la société.

Une vision porteuse

Faire du Québec un joueur mondial en quantique dans des créneaux stratégiques

Une mission structurante

Accroître l'utilisation de solutions quantiques dans les secteurs forts de l'économie

Une stratégie d'affaires ciblée sur des produits et services

Développer l'écosystème autour de champions dans un ou deux secteurs économiques

Des actions tactiques pour supporter l'écosystème

Développer des produits et services d'avant-garde

- Anticiper la demande autour des «Anchors»
- Appuyer des projets collaboratifs et preuves de concept
- Investir dans une infrastructure en communications
- Valoriser la propriété intellectuelle
- Participer aux activités de normalisation
- Explorer les avenues avec l'I.A.

Supporter la croissance de l'écosystème

- Développer une masse critique de personnel hautement qualifié
- Attirer des chercheurs et étudiants étrangers
- Encourager des investissements étrangers
- Attirer des partenaires industriels grâce au projet d'infrastructure en communications quantiques
- Promouvoir le secteur ici et à l'étranger



Introduction

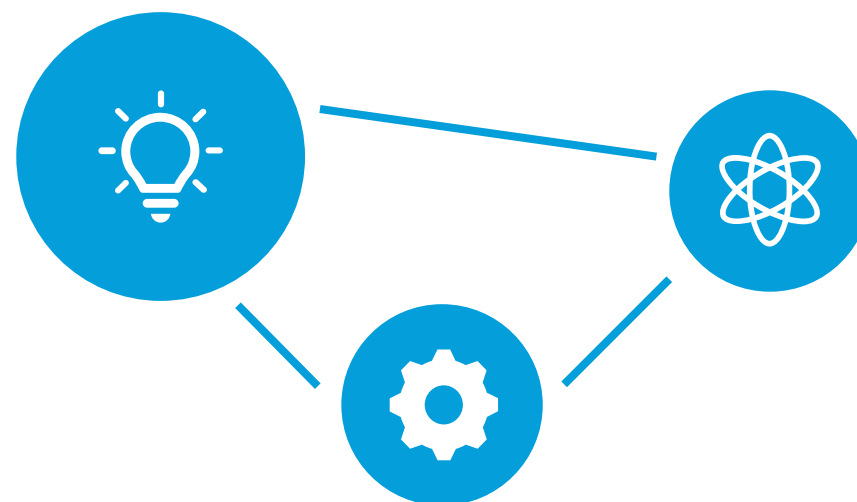


Mieux communiquer, mieux se nourrir, mieux combattre les changements climatiques, mieux anticiper les catastrophes naturelles, mieux se déplacer, mieux produire, mieux se protéger des cyberattaques, mieux conserver les données sur de très longues périodes, etc., c'est certain que la prochaine révolution, dite Quantique 2.0, aura un impact socio-économique transformateur important.

Elle tira avantage des phénomènes étranges et contre-intuitifs des particules élémentaires (électrons, ions, atomes, photons) soumises aux lois subtiles gouvernant la physique quantique que sont la superposition d'états, la téléportation et l'intrication (définitions à l'annexe 1).

En quantique, le Québec devrait s'appuyer sur ses filières économiques fortes. Sujets à une validation subséquente, les membres du Comité aviseur en quantique de Numana proposent de prioriser initialement qu'un ou deux secteurs soit par exemple l'énergie, les services financiers, les assurances, les services gouvernementaux, les transports ou les ressources naturelles.

En intégrant des innovations quantiques développées au Québec, ces champions deviendront plus compétitifs dans leurs secteur d'activité, ici et à l'étranger. Ces grands acteurs industriels agiront comme catalyseur de la mise en place d'une chaîne complète de l'écosystème d'innovation quantique au Québec. Ainsi, conséquent à des collaborations entre de grandes firmes dominantes, des donneurs d'ordre, de jeunes pousses locales et des universités, l'offre de produits et d'applications quantiques sera mieux adaptée aux besoins grandissants du marché et permettra à chacun de mieux percer sur la scène internationale.



Dans le cadre de l'exercice de cartographie du secteur et de celui de la planification d'un projet d'infrastructure en communications quantiques, les acteurs académiques et industriels de l'écosystème quantique ont démontré une ferme volonté de collaboration et de mobilisation. Les recommandations énoncées dans la présente proposition de stratégie fourniront au ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec une approche pour favoriser l'émergence d'une filière industrielle prospère en technologies quantiques.

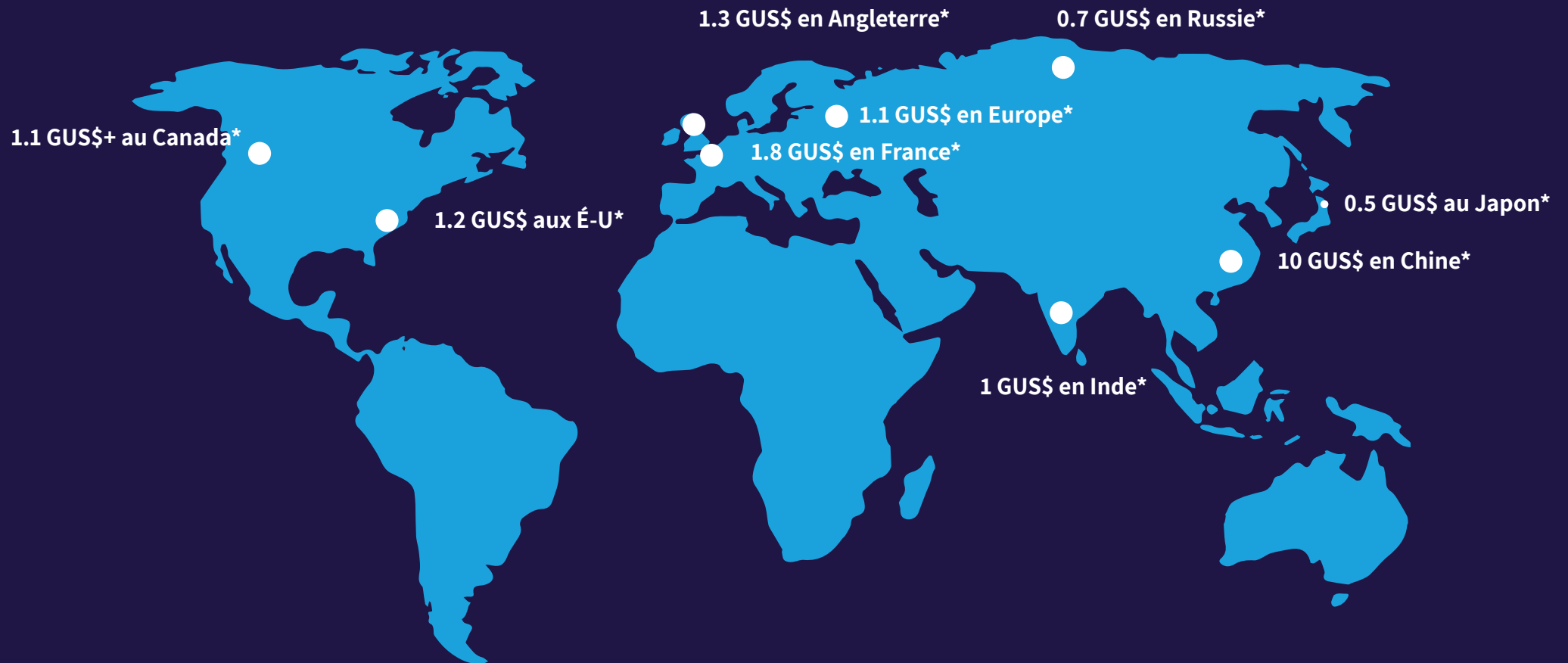
Contexte

Globalement, le nombre d'avancées de la recherche en technologies quantiques s'accélèrent et la commercialisation de ces innovations a débuté avec des projections de ventes de **21,6 milliards de dollars (GUS\$) d'ici 2025.**

Ainsi les gouvernements investissent stratégiquement dans le quantique. Plus de 100 groupes académiques et laboratoires gouvernementaux étudient, développent et parviennent à contrôler certains systèmes quantiques.

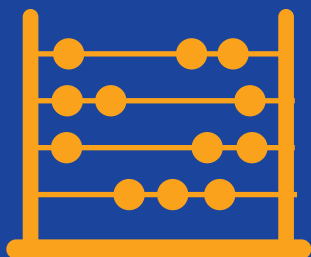
L'Industrie mondiale du numérique s'y intéresse également. Les annexes 6.1 et 6.2 présentent les principaux intervenants industriels internationaux actifs dans le quantique qui y investissent maintenant de façon importante dans leur pays respectif. Quantum Insider rapporte qu'il y a eu plus de 900 M\$ en investissements en 2020 (annexe 6.3).

Les soutiens sont majeurs :



* Montant investi depuis 10 ans.

Quatre grands axes de développement et d'innovation se côtoient et se superposent dans les sciences et les technologies du quantique (voir le glossaire à l'annexe 7)

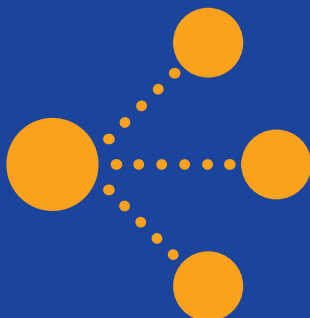


L'informatique de
calcul et de simulation

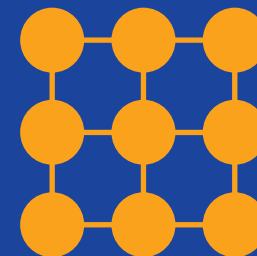


Les capteurs et
la métrologie
quantiques

Les communications
quantiques



Les matériaux
quantiques



Même si **le Canada est dans une excellente position en tant que leader de la recherche quantique** puisqu'il est classé [au cinquième rang au sein du G7, le premier par habitant](#), la concurrence mondiale s'intensifie dans le but d'exploiter ce secteur en plein essor. Le Québec dispose d'expertises indéniables en recherche transdisciplinaire sur les technologies quantiques et d'atouts particulièrement recherchés en matériaux, en photonique ainsi qu'en conditionnement (**packaging et assemblage**) de composants optoélectroniques. **Toutefois, sa petite taille sur l'échiquier mondial l'oblige à cibler des créneaux où la province se démarque.**

D'un point de vue industriel, le Québec jouit d'une bonne reconnaissance en produits et applications en microélectronique, optique et photonique, etc., et d'une assise solide pour le secteur académique avec une base scientifique émérite très forte en technologies quantiques 2.0.

Le gouvernement du Québec reconnaît déjà l'importance du quantique. Son [budget 2019-20 prévoit 79,3 millions de dollars \(M\\$\)](#) au cours des cinq prochaines années au soutien des technologies en appui aux applications d'intelligence artificielle (I.A) tel qu'un calculateur quantique.

[Le Québec se lance un défi en investissant 100 M\\$ dans ce domaine en 2019-2026.](#) Il supporte l'embauche de ressources spécialisées et finance diverses études ainsi que des projets de R-D en quantique. D'autres initiatives sont en évaluation tel que le projet de zone d'innovations de la ville de Sherbrooke portant sur la [« Science quantique et applications technologiques »](#).

Dans son budget 2021, le gouvernement du Canada [propose de rendre 360 M\\$ disponibles sur 7 ans à compter de 2021-2022](#) pour lancer une stratégie quantique nationale.

En concentrant ses atouts sur les besoins de piliers industriels au sein de créneaux particuliers, le Québec pourra pleinement exploiter ses expertises, profiter des retombées économiques pressenties et faire bénéficier plusieurs secteurs économiques des applications découlant de cette technologie de rupture.

Il convient, en cette période de relance économique post-crise COVID, de définir des priorités en innovation autour des technologies quantiques, de mettre à niveau les entreprises québécoises créatrices, de développer des cas d'usage et de se positionner pour profiter des retombées du quantique qui s'échelonnent bien au-delà du 21^e siècle.



**Enjeux de croissance en
quantique**

Enjeux technologiques

Une technologie de rupture majeure

La possibilité de manipuler des particules élémentaires (électrons, atomes, photons) ouvre la voie à de nouveaux usages dans plusieurs domaines.

Au début du cycle de maturité

Ces technologies sortent des laboratoires et le quantique initie son industrialisation, ce qui explique la très grande diversité technologique actuelle (voir annexe 6.4).

Un long cycle de développement

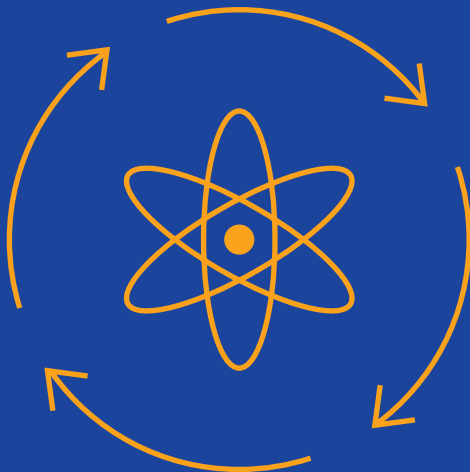
Problématique commune aux technologies de ruptures notamment due aux notions d'équipements, de logiciels et d'intégration.

Des approches hybrides

Des approches classiques et quantiques combinées sont nécessaires tant en informatique qu'en capteurs pour la réalisation des premiers dispositifs commerciaux et industriels.

Une transdisciplinarité obligatoire

Nécessite des connaissances en mathématiques, physique, génie et informatique. Le nom du regroupement des chercheurs universitaires en quantique, [l'Institut transdisciplinaire d'Information Quantique \(INTRIQ\)](#), l'illustre bien.





Nécessité d'infrastructures de tests

Il est essentiel de tester des dispositifs et des applications sur des bancs d'essais industriels ouverts pour en accélérer le développement de systèmes et les cas d'usages.

La complexité des algorithmes

Alors que l'I.A. traite de petits ensembles de données complexes, le quantique explore diverses solutions en même temps pour confirmer rapidement la meilleure. (Annexe 6.5).

Deux exemples de l'importance de l'I.A. :

- L'Alberta vise à développer un centre d'excellence « Quantum City » autour de l'Université de Calgary dans le cadre d'un investissement de 200 M\$ en informatique quantique, automatisation et I.A.
- Tout comme l'Angleterre qui en annonce un de 210 M£ pour développer des innovations en I.A. et en quantique.

Enjeux stratégiques

Nécessité de structurer l'écosystème

L'écosystème quantique doit se structurer autour des leaders (« **Anchor** ») économiques solides qui **identifient les meilleures opportunités dans les marchés verticaux**. Ce sont de grandes firmes, idéalement locales, qui feront croître le tissu industriel en une masse critique productive. Un bon exemple serait l'impact qu'a généré au Canada l'industrie des télécoms dans les années '80.¹

Cohésion avec la stratégie pancanadienne :

Le Québec doit définir un plan stratégique ambitieux et l'arrimer à la future stratégie fédérale en quantique, annoncée dans son récent budget, pour la renforcer et bâtir sur les investissements prévus de 360 M\$ au cours des 7 prochaines années.

1. Rôle d'ancrage ainsi que de cocréation de savoir et d'innovation. Tableaux en pages 59, 60 et 80 de l'étude réalisée en 2019 par l'Association des universités européennes (EUA : European University Association) intitulée *The Role of Universities in Regional Innovation Ecosystems*.

Jouer un rôle proactif en normalisation :

Des normes essentiellement volontaires et pilotées par l'industrie réduisent les coûts, promeuvent l'innovation, assurent l'interopérabilité entre équipements et aident les entreprises à accéder aux marchés plus rapidement. L'approche prônée implique une veille technologique, une présence sur les certaines organisations de normalisation et l'offre de capacités de tests (« benchmarking »). Voir les commentaires afférents émis lors des consultations effectuées dans le cadre de la cartographie du secteur à l'annexe 3.²

2. Cartographie des acteurs oeuvrant dans les technologies quantiques, Numana, septembre 2020

Enjeux de financement et d'affaires

Alors que les marchés industriels s'ouvrent, particulièrement en imagerie, capteurs, services financiers, fabrication, mines, communications, mobilité ainsi qu'en logiciels de développement, les défis sont pour l'instant de natures scientifique et technique.¹

Il y a une demande de capitaux pour supporter la croissance des entreprises notamment pour l'informatique (75%) et en équipements, plus coûteux que le logiciel (production et logistique, approvisionnements, inventaires, distribution, chaînes d'assemblages, etc.).²

1. The Quantum Age (UK Government) ; Grandview Research, APS Physics

2. Pitchbook, Crunchbase, Quantum Technologies Patents, Publications & Investments

Les offres de financement couvrent les phases de pré-amorçage, démarrage, rondes A et B. C'est pour la suite qu'il y a des lacunes.

Au niveau du pré-amorçage et de l'amorçage, le manque est vraiment plus au niveau de l'expertise que du capital. Plusieurs fonds généralistes sont déjà actifs en quantique.

La série B n'est pas adéquatement couverte, ni au Québec ni dans le reste du Canada. Un exemple concret l'illustrant est la série de B de Xanadu qui a été principalement comblée par des investisseurs USA.

Autres considérations sur le financement :

Il y a peu d'investisseurs spécialisés et peu d'investisseurs étrangers (financiers ou stratégiques) actifs lors des phases démarrage et croissance. Quantonation en France, étant l'un des rares fonds d'investissement, avec Lux Capital, DCVC et The Engine, dans le domaine mais ils ciblent surtout leur région d'origine (annexe 6.6).

Pour la phase d'amorçage, il faudrait harmoniser les meilleurs mécanismes offerts par les gouvernements pour supporter plus rapidement les projets.

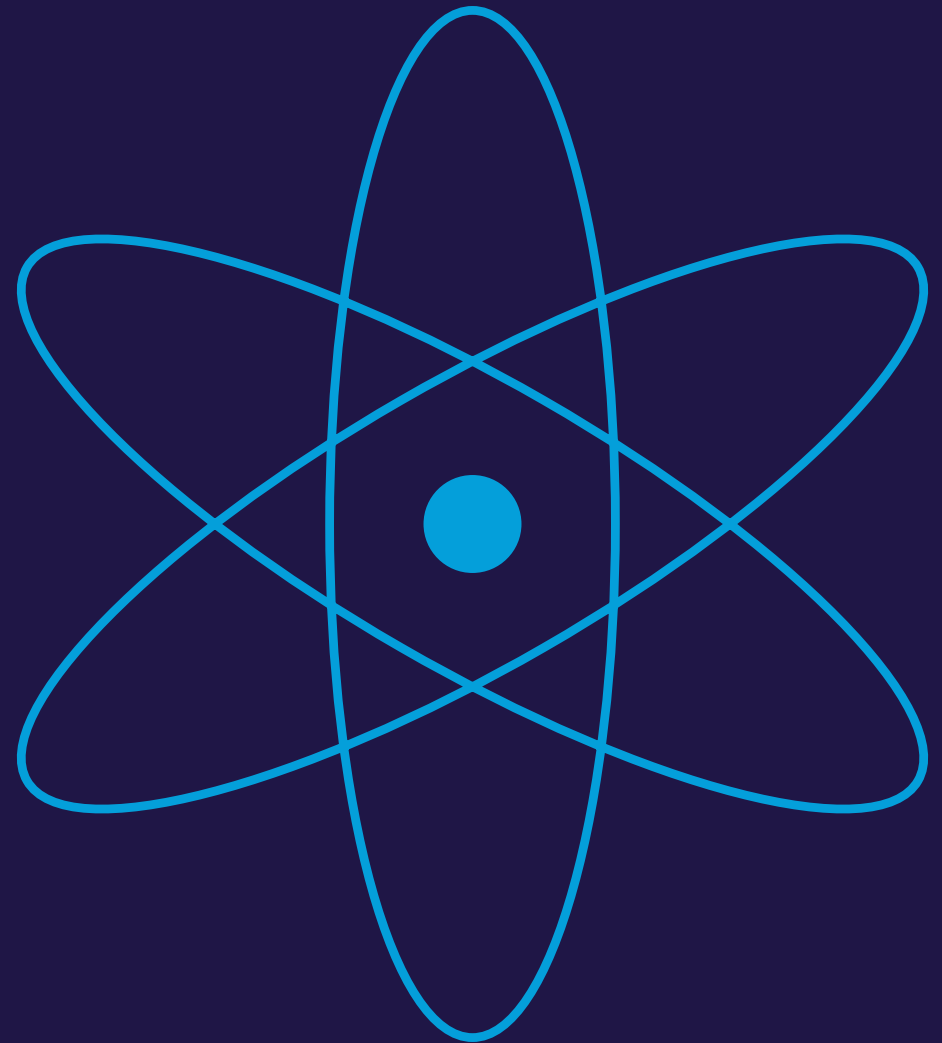
Un montant typique pour une ronde A en technologies profondes est de 10 MUS\$ et de 50 MUS\$ pour une série B. Ces montants sont difficiles à sécuriser au Canada car les revenus manquent et cela attire peu les investisseurs étrangers. L'investissement faciliterait alors notre rayonnement à l'international.

En quantique, à l'instar d'autres technologies profondes, des GP spécialisés au Québec profiteraient des fonds plus gros avec un mandat plus large et des allocations minimales au Québec, tel qu'un fonds Québec/France ou Québec/Reste du Canada, pour leur permettre de diversifier leur portefeuille tout en conservant des réserves pour des rondes plus tardives alors que plus de capitaux sont nécessaires. Ainsi, afin de pouvoir se diversifier adéquatement tout en investissant des montants plus importants dans certaines entreprises connaissant beaucoup de succès, un fond se doit d'investir dans une vingtaine de projets pour se diversifier. Il doit aussi assurer une qualité moyenne dans son portefeuille et répartir son risque, il pourra en réaliser, par exemple, 5 au Québec et 15 ailleurs. Cela lui permettra de lever plus de capitaux, et ainsi pouvoir mettre en quantité absolue plus d'argent sur ses dossiers gagnants.

En réponse à un vide perçu dans le marché, BDC Capital lance le Fonds pour les technologies profondes de 200 M\$ en amorçage et série A pour la technologie quantique, l'électronique, la photonique et d'autres secteurs connexes. Il est espéré que le lancement de ce fonds va catalyser l'intérêt et l'activité dans le secteur des technologies quantiques et y attirer de nouveaux joueurs.

Il faut sensibiliser les dirigeants des secteurs économiques plus conventionnels aux possibilités qu'apportent les technologies quantiques ;

L'importance des commandes publiques et du gouvernement comme premier client ou premier employeur.



Enjeux talent et formation

Comme pour toutes technologies de ruptures, le système d'innovation québécois devra attirer ou former une main-d'œuvre spécialisée ensemble et savoir retenir ce talent.

Les startups doivent être en mesure d'offrir des postes à des salaires concurrentiels afin de compétitionner avec les grandes entreprises ayant un grand pouvoir attractif.

La formation d'une main-d'œuvre qualifiée tant sur le plan technique que scientifique facilitera l'adoption du quantique dans des secteurs traditionnellement non quantiques.

Il faut favoriser la croissance d'intégrateur domestique afin d'éviter les effets pervers de certaines politiques de développement économique menant à du talent à trop faible coût qui est plutôt exporté (i.e. ne pas devenir une succursale à rabais). Les cas du développement des industries du multimédia ou de l'IA, centrés principalement sur les besoins des GAFAM, ont été largement documentés alors que plusieurs sommités scientifiques locales ont été embauchées par des sociétés américaines comme ce fut le cas pour les chercheurs Yoshua Bengio (de l'UdeM et maintenant chez ServiceNow), Doina Precup (de McGill et maintenant chez DeepMind) et Joelle Pineau (de McGill et maintenant chez Facebook).

Les formations devront couvrir certaines connaissances indispensables (annexe 6.7)



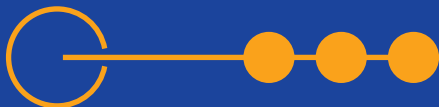
Transdisciplinarité : génie, physique, informatique, algorithmes quantiques et AI



Ingénierie : Plus d'ingénieurs pour assurer le passage de la science vers les technologies quantiques en calcul, logiciels, réseaux, composants, dispositifs, etc.



Entrepreneuriat : Au sein de l'équipe de direction, des entrepreneurs ingénieurs ou diplômés en sciences (Ms ou PhD) et une formation dans un domaine ciblé



Marketing et ventes B2B: Formation de gestionnaires et de professionnels



Sensibilisation auprès d'entreprises des possibilités du quantique



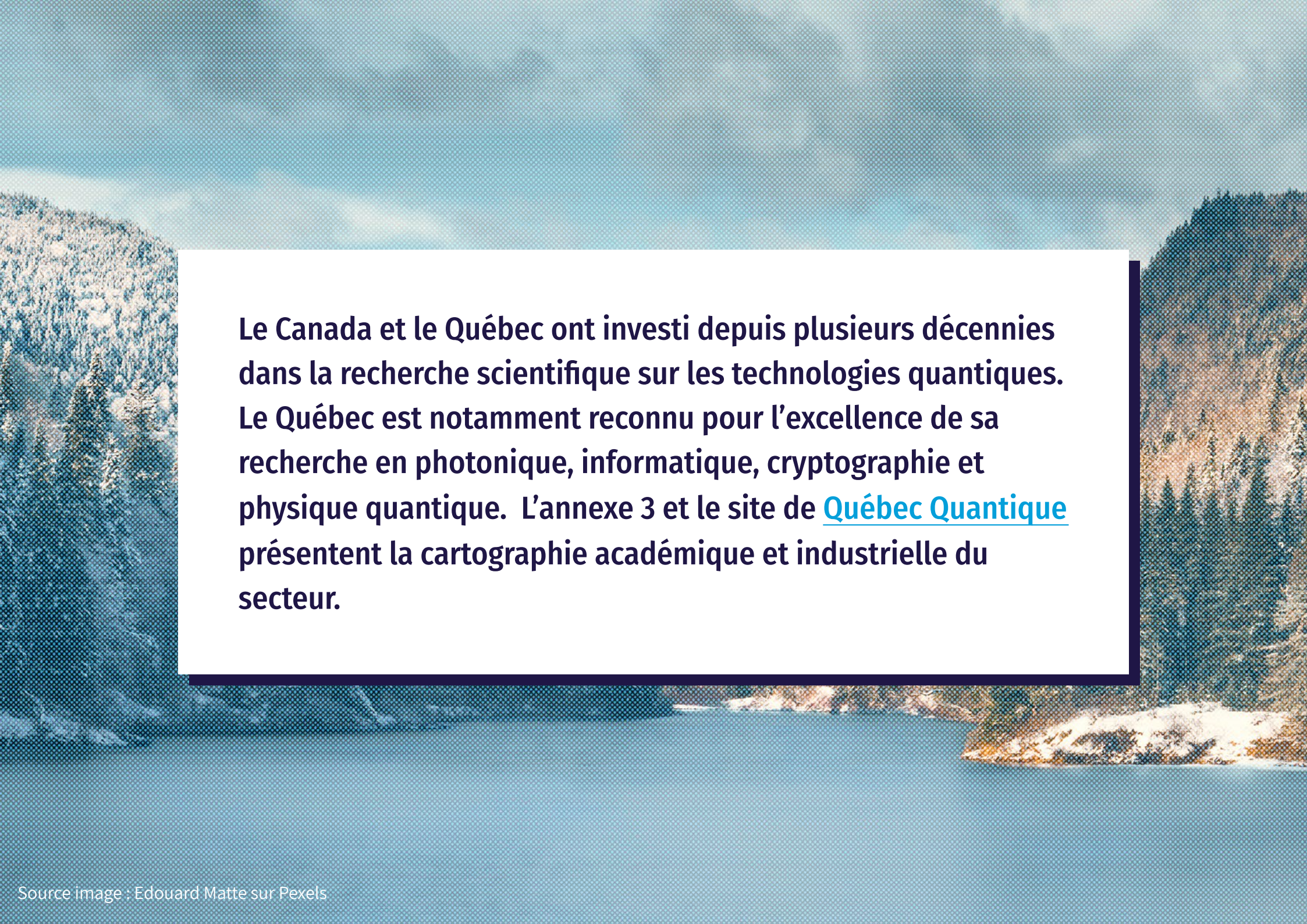
Enjeux éthiques

Quels sont les effets sur l'individu et la société concernant la transition vers un futur meilleur et son impact en termes d'accessibilité, diversité, inclusion, équité et développement durable ?

Quelles sont les responsabilités des personnes impliquées dans la recherche fondamentale, la R-D, la conception, la fabrication et la commercialisation ?

Les atouts du Québec



A scenic view of a lake surrounded by forested mountains under a cloudy sky. The image has a halftone or dithered texture. A white rectangular box with a dark blue border is centered on the image, containing text.

Le Canada et le Québec ont investi depuis plusieurs décennies dans la recherche scientifique sur les technologies quantiques. Le Québec est notamment reconnu pour l'excellence de sa recherche en photonique, informatique, cryptographie et physique quantique. L'annexe 3 et le site de [Québec Quantique](#) présentent la cartographie académique et industrielle du secteur.

Les atouts du Québec

Une masse critique de chercheurs et d'infrastructures de classe mondiale, allant de la recherche fondamentale jusqu'aux pré-séries, avec des expertises en matériaux, design, packaging, assemblage, tests (microélectronique, optique, photonique, etc.), en ordinateurs quantiques (dont un développé au Québec), en algorithmes et autres technologies périphériques : **INTRIQ, Institut Quantique, INO, RQMP, COPL, C2MI, ReSMIQ, Stara-com, Optech, 3IT, RISQ, CMC Microsystems, Espace IBM-Q, Concordia, ÉTS, INRS, Polytechnique, Universités McGill, de Montréal, Laval et de Sherbrooke, CNRC, RDDC, ...** Selon Québec Quantique, il y aurait quelque 30 000 étudiant(e)s dans des programmes en lien avec le quantique.

De fortes activités entrepreneuriales avec plus d'une dizaine de startups tels que **Anyon Systems, Quantum Numbers, QuantumSense, Ki3 Photonic, InfinityQ Tech., SB Quantum, Nord Quantique, Qubic Tech., Ehva Photonics, ...**

Des incubateurs performants formant le consortium des incubateurs en entrepreneuriat quantique : **ACET, Centech, Quantino et Entrepreneuriat Laval.**

Des firmes majeures locales actives qui démontrent de l'intérêt pour le secteur, ici et/ou à l'étranger, aux applications quantiques 1.0 et 2.0 : **Accenture, Excelitas, IBM, Google, Hydro-Québec, Honeywell, Lockheed Martin, Microsoft, Teledyne DALSA, Thales, ...**

Un large bassin d'utilisateurs de petites et de grandes tailles pouvant bénéficier d'applications découlant des technologies quantiques en : **Aéronautique, agriculture, assurances, chimie, défense, énergie, finances, informatique, I.A., manufacturier, minier, pharmaceutique, santé, télécommunications, transport, ...**

Et, tout aussi essentiel, la reconnaissance du quantique par les gouvernements :

Le budget 2019-20 du Québec prévoit 79,3 M\$ sur 5 ans aux technologies en appui à l'I.A. Le Québec a inauguré 2 projets de zone d'innovations en février dernier, incluant une zone dédiée aux sciences et technologies quantiques à Sherbrooke, qui permettront l'accélération du développement du secteur. [Le Québec se lance maintenant un défi en y investissant 200 M\\$ en 2019-2027.](#)

Le Québec peut arrimer sa stratégie avec celle du Canada au moment où le fédéral propose d'injecter 360 M\$ sur 7 ans, à compter de 2021-2022.

Certains ministères, dont le MEI, se sont dotés de ressources internes dédiées au secteur. Le MEI a supporté, entre autres, la réalisation de la présente étude, de la cartographie des acteurs en quantique, de l'étude d'un projet d'infrastructure, et financé des chaires et des projets de recherche collaboratives en plus de ressources pour la coordination des activités de Québec Quantique et des activités d'incubations via le Consortium des incubateurs en entrepreneuriat quantique.



Cet écosystème quantique naissant mérite maintenant d'être renforcé par l'ajout de firmes établies qui intègrent des technologies quantiques, la sensibilisation du milieu de développement économique, la formation de la main-d'œuvre qualifiée pour permettre à davantage de compagnies de prospérer ici comme l'ont fait [1QBit](#), un leader en optimisation quantique venu s'établir au Québec en 2019, IBM qui a établi en 2020 son [Espace IBM Q](#) en calcul quantique et **CMC Microsystème** qui a déménagé son siège social au Québec pour gérer son réseau national.

Forces du Québec en technologies quantiques

Le tableau suivant résume l'héritage scientifique et les expertises technologiques où le Québec pourrait appuyer le développement de son écosystème quantique 2.0.

Applications	Patrimoine scientifique	Visées technologiques
Communications quantiques et cryptographie	Héritages des grandes sociétés canadiennes dans les télécoms Travaux pionniers du Pr Gilles Brassard (distribution quantique de clés et téléportation d'états quantiques) Travaux de recherche primés de l'INRS-EMT en composants de réseaux fibrés	Dispositifs quantiques de communication pouvant s'intégrer au futur Internet quantique Déploiement de réseaux de communications intégrant des dispositifs quantiques

Applications	Patrimoine scientifique	Visées technologiques
Photonique	Héritage de Ciena (Nortel), Exfo et autres firmes locales en photonique Héritage de l'INO en optique et en photonique Travaux pionniers du laboratoire du Pr Roberto Morandotti (INRS-EMT)	Interconnexion / transduction Photonique intégrée sur puce Génération d'états quantiques complexes (qubits) et manipulation par traitement optique ultrarapide Réseaux neuronaux optiques Capteurs, imagerie
Algorithmes et AI	Base scientifique bâtie autour des réseaux neuronaux / Machine Learning Écosystème d'innovation IA dont le hub de Montréal (MILA, Scale AI, etc.)	Apprentissage machine quantique Interfaces objets en traitement en périphérie (IoT & Edge Computing) Solutions IA pour réseaux de capteurs Réseaux neuronaux optiques

Applications	Patrimoine scientifique	Visées technologiques
Composants et dispositifs	Alexandre Blais, David Poulin, Louis Taillefer, Claude Bourbonnais, etc. Masse critique de compétences à : • Sherbrooke : IQ, 3IT, C2MI, ... • Montréal : INRS-IMT, DIRO/UdeM, Polytechnique, McGill, ÉTS • Québec : INO, COPL, RDDC, Uni. Laval	Systèmes quantiques cohérents Transduction entre systèmes Design des composants des futurs ordinateurs quantiques Dispositifs de réseaux télécom et de capteurs, systèmes de contrôle, instrumentation
Packaging et architectures hybrides	C2MI, INO, etc.	Prototypage de composants optoélectroniques Conditionnement (packaging et assemblage) de microsystèmes
Architectures de calcul hybrides	Calcul Québec, RISQ, Canarie, etc.	PINQ : Plateforme d'innovation numérique et quantique

Écosystème entrepreneurial

Le Québec compte déjà une première cohorte de startups en technologies quantiques, la plupart issues des travaux de recherche des laboratoires universitaires. Elles se sont fait connaître principalement au travers d'événements coordonnés par l'initiative Québec Quantique, l'INTRIQ, l'Institut Quantique, le Consortium des incubateurs en entrepreneuriat quantique et Numana dans les derniers 18 mois. Le tableau suivant illustre les principales startups.

Nom de la startup	Création	Lieu	Domaine
Hub de Montréal			
Anyon Systems Inc.	2014	Montréal	Informatique
Quantum Numbers Corp. (TSX: QNC)	2016	Montréal	Communication
QuantumSense	2017	Montréal	Informatique
Ki3 Photonic Technologies	2015	Varenes	Communications quantiques
InfinityQ Technology	2020	Montréal	Informatique
Hub de Sherbrooke			
SB Quantum	2017	Sherbrooke	Capteurs
Nord Quantique	2020	Sherbrooke	Informatique
Qubic Technologies	2020	Sherbrooke	Capteurs et imagerie
Hub de Québec			
EHVA Photonics	2019	Québec	Équipements test et dispositifs intégrés

Un exemple de projets d'infrastructures

Une trentaine d'experts industriels et académiques proposent un projet fédérateur pour positionner le Québec parmi les leaders sur toute la chaîne d'innovation en communications quantiques. Ce projet répondrait ainsi à un besoin critique d'accès à une telle infrastructure identifiée lors de la cartographie réalisée en 2020.

Le projet d'une infrastructure de réseaux de communications quantiques entre Montréal, Québec et Sherbrooke permettrait de réaliser de la R-D et du développement de produits et services novateurs. De tels projets sont en déploiement aux États-Unis, en Europe, en Asie et considérés en Ontario.

L'industrie québécoise a identifié le besoin critique de l'accès à une telle infrastructure lors de cartographie réalisée en 2020 ;

Ce projet regrouperait les expertises du Québec en quantique québécois et privilégiera :

- La réalisation, sur un horizon de dix ans, de **plateformes fibrées, aériennes et satellitaires** permettant de tester des prototypes et des concepts de R-D dans un environnement industriel autonome des réseaux commerciaux (« Living Lab ») ;
- L'accélération de l'utilisation de nouvelles **applications de communications sécurisées** au sein de filières économiques fortes ;
- La réalisation de partenariats avec des fournisseurs, équipementiers et opérateurs télécoms ;
- L'augmentation des **exportations et des investissements étrangers** attirés par cette infrastructure de test de pointe mondiale.

The image features a dark blue background with four circles of different colors and sizes. A large light blue circle is centered on the right side. A medium-sized blue circle is in the top left. A small white circle is in the top right. A medium-sized orange circle is in the bottom right. The text 'Perspectives du marché' is written in white, bold, sans-serif font on the left side, partially overlapping the large light blue circle.

Perspectives du marché

Le quantique produira des gains commerciaux, scientifiques et sociaux substantiels. Afin de rester compétitifs et se prémunir des risques associés aux progrès exponentiels de l'informatique quantique et de ses algorithmes, plusieurs pays priorisent le développement des technologies quantiques.

Néanmoins, les technologies quantiques posent un **défi critique à de nombreux pays, car elles concernent les communications sécurisées et l'accès aux données liées à la sécurité nationale.**

« La technologie quantique est aujourd'hui à la fine pointe de la science et de l'innovation, et présente un énorme potentiel de commercialisation. Ce domaine en émergence transformera la manière dont nous développons et concevons tout, qu'il s'agisse de médicaments pour sauver des vies ou de batteries de nouvelle génération, et les scientifiques et entrepreneurs canadiens sont bien placés pour tirer profit de ces opportunités. Ils doivent toutefois investir pour demeurer concurrentiels sur ce marché mondial en croissance rapide. »

- Budget fédéral 2021

Le marché global des technologies quantiques, comprenant informatique, communications, cryptographie, capteurs et métrologie, passera de 480 MUS\$ en 2018 à 3,2 GUS\$ en 2030, à un taux de croissance annuel composé de 17%. D'autres études sont plus optimistes avec des prévisions de 21,6 GUS\$ dès 2025.

Retombées économiques

Il est justifié de croire à l'impact important qu'aura le quantique au Québec, tellement les avancées technologiques actuelles sont significatives et d'intérêt mondial.

L'impact structurant de la photonique (de la génération du quantique 1.0) sur l'économie de l'industrie québécoise a permis à quelques 22 000 personnes d'œuvrer au sein de 220 entreprises et contribuer 3 G\$ en revenus fiscaux à l'économie québécoise en 2019.

Il est donc plausible d'anticiper que le Québec sera en excellente position pour profiter de la création de grande richesse à la suite de l'envolée industrielle des technologies quantiques 2.0.

D'ici 2030, le Canada pourrait se doter d'une industrie quantique de 8,2 G\$, emploierait 16 000 personnes et verserait 3,5 G\$ à l'État. Dix ans plus tard, cela représenterait 229 000 emplois, des revenus de 142,4 G\$ et 55 G\$ à l'État, soit 3,4%) à son PIB.

Par extrapolation, à 19% du PIB canadien, l'industrie québécoise du quantique représenterait alors en 2040, des revenus de 27G\$, impliquerait 45,000 emplois et engendrerait 11 G\$ en revenus fiscaux.

Applications sectorielles

Les technologies quantiques ont le potentiel de réaliser des tâches totalement sécuritaires, exponentiellement plus rapidement et avec une précision sans égale. Le Québec doit cibler ses forces sur des opportunités de niches au sein des 3 segments du marché du quantique

Communications totalement sécuritaires

La cybersécurité représente une première application commerciale (« Low hanging fruit ») pour nombreuses startups en quantique (voir l'annexe 6.2). Les communications quantiques **sont parfaitement sécurisées contre toute tentative d'espionnage et résistantes aux capacités de décryptage de l'éventuel ordinateur quantique**. La technique de distribution quantique de clés de chiffrement utilise la lumière intriquée pour identifier toute interception de la transmission. La génération de nombres aléatoires quantiques est également utilisée pour produire des clés d'encryption. Au centre de ces réseaux se trouve le **répéteur quantique, le graal des dispositifs de communications**, et l'un des défis de ce dispositif est de pouvoir contrôler et arrêter son fonctionnement de façon précise. Les assises scientifiques et industrielles en photonique et en communications sont deux atouts qui pourraient permettre au Québec de réaliser des systèmes et des applications innovantes dans ce secteur. La présence d'une infrastructure de tests et de prototypage en communications quantiques favoriserait cette avenue au Québec.

Informatique exponentiellement plus rapide que les ordinateurs classiques

Les ordinateurs quantiques sont des systèmes qui peuvent stocker et traiter l'information parallèlement plutôt que séquentiellement comme le font les ordinateurs classiques. Cela s'explique par une caractéristique des bits quantiques ou qubits qui permet la superposition d'états (des proportions différentes de 0 et de 1 en même temps). Lorsque développé avec succès, **l'ordinateur quantique pourra exécuter certains algorithmes mieux que les superordinateurs classiques pour réaliser des traitements inaccessibles actuellement.** Des simulateurs quantiques programmables pourraient mener à des dispositifs quantiques capables de résoudre des problèmes de routage et de planification avec des accélérations polynomiales par rapport aux ordinateurs classiques. **Avec sa base scientifique primée en algorithmie, données massives et intelligence artificielle, le Québec pourrait exceller dans le développement d'applications** quantiques en gestion de réseau d'énergie, en optimisation de route ou modélisation actuarielle avec des piliers québécois.



Dispositifs avec une précision sans égale

Certains systèmes quantiques sont très sensibles à des effets externes, tels que les champs électriques, magnétiques et gravitationnels, la rotation, l'accélération et le temps. Ils peuvent donc être utilisés pour concevoir et fabriquer des capteurs très précis à température ambiante, moins chers, plus faciles à utiliser, plus portables, plus légers et consommant moins d'énergie. Leur utilisation déjà initiée devrait conduire à de nouvelles applications commerciales. L'annexe 4 présente des exemples d'utilisation de senseurs qui pourraient être développés et testés au Québec telles qu'en imagerie médicale R-X sans radiation, navigation de véhicules sans pilote ou détection plus précise de gisements miniers.

Relier usages et premiers utilisateurs

La clé du succès est de répondre aux besoins des leaders au sein de leur propre marché avec des solutions quantiques innovantes. **Il est donc essentiel d'élaborer des cas d'usage avec des champions industriels québécois, possiblement en partageant le risque financier**, pour orienter le développement des technologies quantiques de PME québécoises vers des preuves de concept répondant aux caractéristiques recherchées par ces marchés plus matures.

Usages anticipés

Il convient de bien comprendre les usages potentiels des technologies innovantes par une approche prospective et participative. Une liste partielle des usages anticipés du quantique est donnée à l'annexe 4 de même qu'une liste, à l'annexe 5, des principaux secteurs économiques québécois et d'entreprises majeures qui pourraient tirer avantage d'applications dérivées des sciences et technologies de l'information quantique. **Des études subséquentes approfondies permettront d'identifier les secteurs à prioriser et d'identifier les entreprises intéressées selon les applications et usages.**

Étant donné leur impact commercial au sein de leur propre secteur économique, au Québec et à l'international, certaines **grandes entreprises québécoises sont pressenties pour jouer le rôle de pilier (ancrage) et catalyser la croissance des jeunes fournisseurs de solutions quantiques.**

Parmi celles qui pourraient concrétiser des solutions quantiques pour ces champions, on note, entre autres, **Aeponyx, Anyon Systems, EHVA Photonics, InfinityQ, Ki3 Photonic Technologies, Nord Quantique, Quantum Numbers Corp., QuantumSense, Qubic Technologies et SB Quantum.**

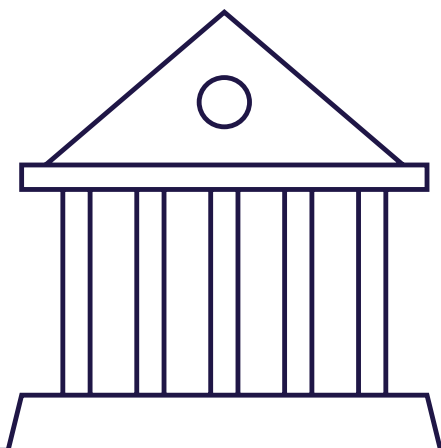
A low-angle, upward-looking perspective of several modern skyscrapers with glass facades. The buildings are arranged in a way that they appear to converge towards the top center of the frame. The sky is a clear, light blue. The image has a halftone or dithered texture.

Les membres du comité aviseur suggèrent de prioriser initialement un ou deux secteurs à la suite d'un examen plus approfondie parmi les quatre secteurs économiques suivants.

Assurances, banques, finances et gouvernements

Partenaires possibles en assurances : Intact, SSQ

Partenaires possibles en cybersécurité financière : Desjardins, CDPQ, Conseil du trésor et autres ministères du Gouvernement du Québec

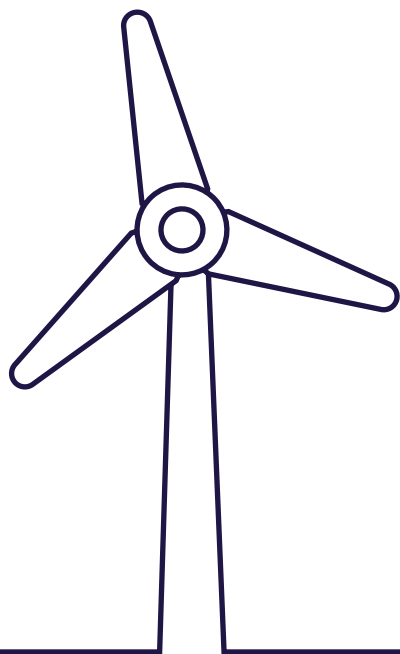


Applications possibles en services d'assurances, bancaires et gouvernementaux :

- Optimiser la gestion de portefeuilles ;
- Analyse du risque de catastrophes naturelles ;
- Sécurité des données de clients ;
- Puissance de calcul supérieure qui optimiserait les algorithmes boursiers ;
- Horloges de grande précision pour le commerce à grande vitesse ;
- Mieux cibler et servir les clients par l'I.A. ;
- Cybersécurité des communications et cryptographie post-quantique ;
- Les algorithmes actuels sont lents et la capacité des superordinateurs ne sera jamais assez élevée pour faire un décodage en un temps raisonnable ;
- Les entreprises exigent de leurs fournisseurs de solides mesures de sécurité de l'information pour se protéger des cybercriminels. Des règles de cybersécurité rigoureuses donnerait un avantage compétitif pour fidéliser leur clientèle.

Énergie

Partenaires possibles :
Hydro-Québec, Énergir,
Boralex, Brookfield



Applications possibles en énergie :

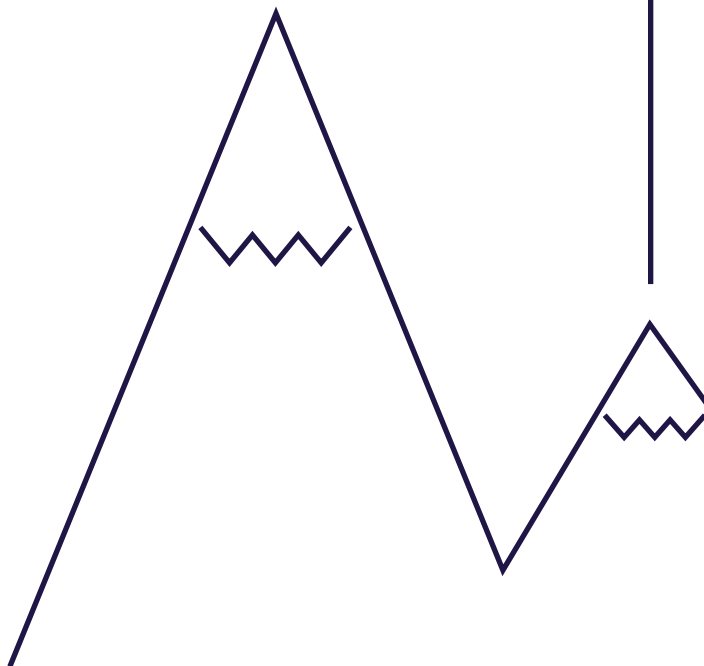
- Nouvelle génération de batteries pour véhicules autonomes ;
- Gestion temps réel du réseau à l'ère des nouvelles énergies (Smart grid) ;
- Photovoltaïque et photosynthèse artificielle ;
- Capturer, stocker ou transporter l'énergie, production industrielle d'hydrogène, dopage des procédés de capture et séquestration du CO₂ ;
- Accélération de la découverte de nouveaux procédés (modélisation des états excités de systèmes moléculaires complexes...) ;
- Fusion nucléaire ;
- Surveillance de l'environnement lié aux risques radioactifs aux abords des centrales nucléaires (détection rayonnements ionisants).

Ressources naturelles et mines

Partenaire possible : Rio Tinto, Gouvernement du Québec

Applications possibles pour la géologie et les mines

- Prospection géologique : détection de différences gravimétriques indicatrices de la composition du sous-sol durant l'exploration ;
- Détection ultrasensible des fuites et des failles ;
- Navigation inertielle de camions et autres équipements autonomes permettant leur fonctionnement en continu ;
- Géophotonique pour l'obtention de données instantanées en minéralogie et de capteurs optiques distribués pour la surveillance des sites d'excavation et la mécanique des roches ;
- Logistique et chaînes d'approvisionnement (recherche opérationnelle).

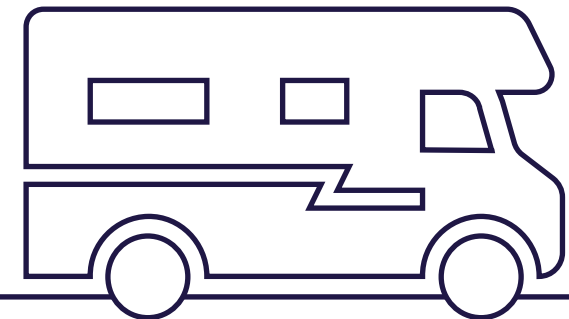
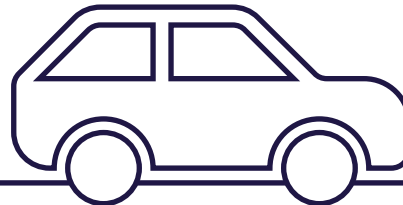
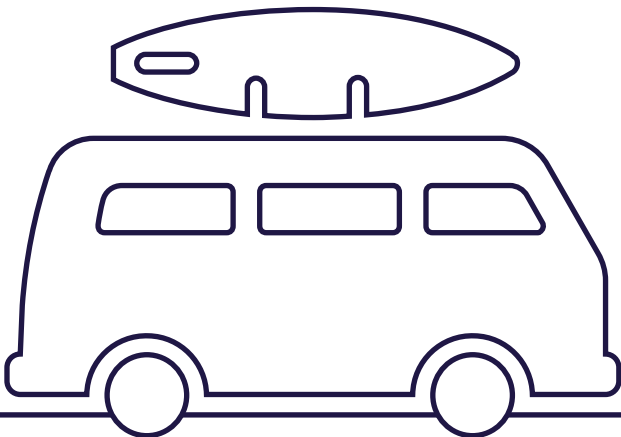
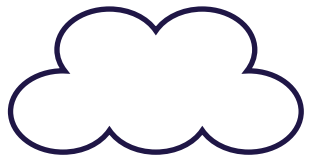


Transport et mobilité

Partenaires possibles :
Airbus, Lockheed, Lion

Applications possibles :

- Optimisation de la logistique ;
- Navigation sans GPS ;
- Gestion du trafic routier ;
- Gestion des données ;
- Nouveaux matériaux ;



Un exemple de projet appliqué à l'environnement



Source image : Pixabay sur Pexels

La réduction des impacts négatifs des technologies de l'information et des communications (TIC) sur l'environnement figure parmi les cibles fixées par l'Accord de Paris et les objectifs de développement durable des Nations-Unies. En optimisant les procédés de productions dans différents secteurs, les processus quantiques pourraient contribuer à réduire leur empreinte écologique. Une collaboration entre le CIRODD, GeSI et Numana s'inscrit d'ailleurs dans ce sens.¹

1. Entente entre Numana, CIRODD et GeSI : <https://numana.tech/publications/>

La stratégie québécoise en quantique



Le Québec n'est pas une superpuissance dans l'univers quantique planétaire. Peut-il alors réussir dans ce secteur stratégique ?

Avec le double seulement de la population du Québec, la Hollande peut s'enorgueillir d'être devenue un pôle du quantique en Europe grâce à une politique nationale ciblée.

Tout comme en microélectronique et en photonique, **le Québec dispose d'atouts pour réussir dans le domaine quantique**, à condition de mettre en place une politique visionnaire et porteuse **privilégiant le développement de solutions ciblées**, plutôt que de vouloir maîtriser tous les éléments de la chaîne technologique.

Les travaux du Comité aviseur ont fait émerger un consensus quant à la vision et aux actions que devrait privilégier l'écosystème québécois pour développer et dynamiser une filière industrielle vigoureuse de classe mondiale en quantique.



Une vision porteuse

Faire du Québec un joueur mondial en quantique dans des créneaux stratégiques

Une mission structurante

Accroître l'utilisation de solutions quantiques dans les secteurs forts de l'économie

Une stratégie d'affaires ciblée sur des produits et services

Développer l'écosystème autour de champions dans un ou deux secteurs économiques

Des actions tactiques pour supporter l'écosystème

Développer des produits et services d'avant-garde

- Anticiper la demande autour des «Anchors»
- Appuyer des projets collaboratifs et preuves de concept
- Investir dans une infrastructure en communications
- Valoriser la propriété intellectuelle
- Participer aux activités de normalisation
- Explorer les avenues avec l'I.A.

Supporter la croissance de l'écosystème

- Développer une masse critiques de personnel hautement qualifié
- Attirer des chercheurs et étudiants étrangers
- Encourager des investissements étrangers
- Attirer des partenaires industriels grâce au projet d'infrastructure en communications quantiques
- Promouvoir le secteur ici et à l'étranger



La stratégie québécoise en technologies quantiques et les recommandations proposées au gouvernement visent donc à cibler le développement d'applications quantiques au sein de créneaux de marché (verticaux) à la portée de l'écosystème québécois et à le valoriser. La stratégie repose sur la réalisation de partenariats entre des start-ups innovantes et de grandes entreprises québécoises, chacune dominante au sein d'un secteur économique fort du Québec. Ainsi, les deux partenaires pourront, conjointement ou individuellement, devenir des joueurs importants pour rivaliser avec leurs pairs sur les marchés mondiaux.

Développer des produits et des services d'avant-garde

Stimuler la demande venant de piliers industriels (« Anchors »)

Favoriser l'essor de filières industrielles d'avenir à fort impact économique (ex. en énergie, services financiers, assurances et gouvernement, ressources naturelles/mines ou transport) pour lesquelles la chaîne de valeur est maîtrisée.

Pour chacune, cibler un de ses acteurs majeurs (intégrateurs de systèmes, donneurs d'ordre et fournisseurs de solutions) pouvant agir comme catalyseur ou lien d'ancrage dans l'évolution de l'écosystème d'innovation et soutenir le développement d'innovations quantiques et assurer, pour ces filières, une démarche d'innovation tirée par le marché.

Le comité recommande certaines démarches au gouvernement du Québec pour appuyer les actions proposées. En ce qui concerne le développement de filières industrielles :

Développer un programme de sensibilisation pour différents secteurs au potentiel des technologies quantiques et de l'importance d'explorer les solutions uniques qu'elles peuvent offrir à différents problèmes de calculs complexes, de communications sécurisées ou de mesures extrêmement précises (instrumentation, capteurs quantiques, horloges atomiques...).

Favoriser parmi ces grands groupes (donneurs d'ordre) l'émergence d'un ou deux intégrateurs spécialisés capables de soutenir le développement de filières d'excellence.

Accompagner ces acteurs industriels dans l'appropriation des technologies quantiques et les supporter dans leur rôle de catalyseur.



Appuyer des projets collaboratifs et preuves de concept

Lancer, **dans une approche de projets structurants, des projets parrainés** par de grands acteurs industriels pouvant agir comme catalyseur afin de **soutenir la R-D et la mise à l'échelle de** procédés innovants ;

L'écosystème requiert des occasions d'échanges pour orienter les discussions et mener à un esprit de collaboration et contribuer au développement du quantique ;

Développer un programme d'accompagnement de cohortes de firmes dans l'identification et l'appropriation de technologies quantiques et la création de chaînes de valeur.

En termes de recommandations pour le gouvernement :

- Encourager l'intégration des meilleures pratiques observées chez d'autres écosystèmes actifs dans les technologies profondes pour favoriser la cocréation du savoir et d'innovations au sein de l'écosystème québécois ;
- Lancer des défis R-D impliquant de grands groupes utilisateurs et PME développeurs.



Investir dans des infrastructures de démonstration

Miser sur les retombées de projets majeurs d'infrastructures de démonstration ouvertes. De tels projets visent à créer et tester des solutions québécoises et leur intégration au sein de réseaux pour développer des usages du quantique en favorisant des coopérations multidisciplinaires en développement industriel et recherche universitaire et dynamisant l'écosystème autour d'une plate-forme « Living Lab » commune d'innovation et d'expérimentation.

En termes de recommandations :

- Supporter financièrement avec l'industrie la mise en place d'infrastructures ;
- Supporter les projets de zones d'innovations dont celle de Sherbrooke autour du 3iT en quantique et de Bromont au C2MI en technologies durables et bâtir sur ces nouvelles capacités technologiques.



Valoriser la propriété intellectuelle

Appuyer des projets collaboratifs entre ces locomotives et l'écosystème et financer des preuves de concepts.

Valoriser la propriété intellectuelle (PI) :

Assurer la diffusion de l'étude réalisée par le cabinet ROBIC dressant un panorama des brevets dans le domaine quantique au Canada et en assurer une mise à jour ;

Réaliser des activités de veilles technologiques avec la création d'un observatoire sur l'évolution des usages des technologies quantiques (création de guides, fiches de cas d'usage) ;

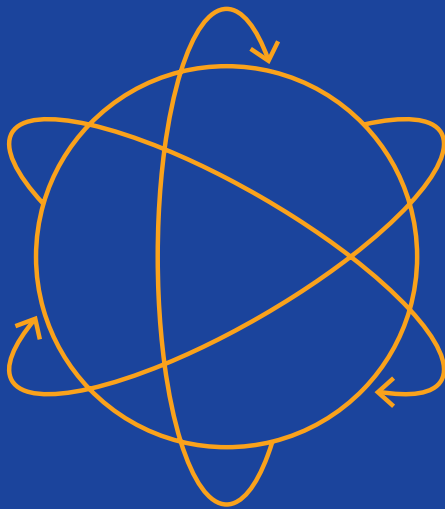
Innover dans les modes de valorisation et protection de la PI telles que la formation de portefeuilles de brevets.

En termes de recommandations :

- Aider les entreprises à se doter d'une stratégie de PI adaptée au quantique et élargir la gamme des aides du MEI à sa protection et valorisation afin de garantir le développement de produits et solutions différenciées ;
- Bonifier le budget de programmes d'aide à l'innovation offerts par le MEI afin d'allouer 5% à 10% de ces budgets à la protection de la PI avec, par exemple, un remboursement de 50% des coûts de préparation et de dépôt de trois brevets sur cinq ans ;
- Favoriser par un financement adéquat la création d'un portefeuille de brevets et autres droits de PI dans le quantique en s'inspirant notamment des expériences de « patent pools » ainsi que du nouveau programme canadien « **Innovation Asset Collective** » (IAC/CAI) lancé en décembre 2020 pour le secteur Cleantech.

Participer aux activités de normalisation internationales

Participer de manière proactive au processus de normalisation internationale en dédiant des ressources aux différents organismes de certifications.



En termes de recommandations :

- Utiliser le processus de normalisation de manière plus stratégique et exercer un rôle moteur au sein du Canada à travers le BNQ ;
- Favoriser la participation d'entreprises et associations à l'élaboration de normes industrielles sur la scène internationale (ISO, ASTM, ITU/UIT, IEEE, ...) ;
- Présenter des cas d'usage et scénarios sur 4 ou 5 axes fondamentaux ;
- Dédier 1 à 2 ressources temps plein du BNQ pour coordonner stratégie et actions de l'écosystème quantique québécois au sein du SCC-CCN ;
- Inclure l'INTRIQ dans le comité de pilotage de l'initiative ;
- Jumeler le tout à une plateforme des savoirs techniques.

Explorer les avenues avec l'I.A.

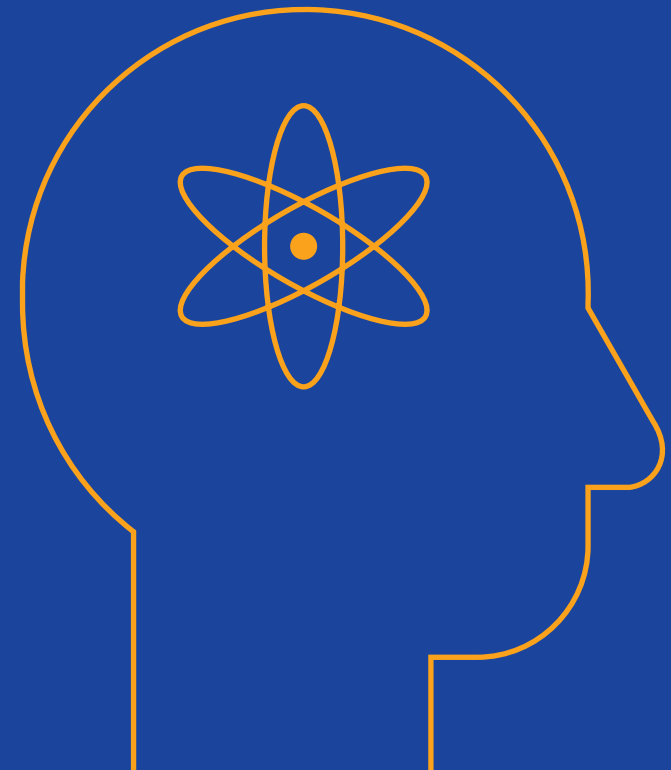
Les phénomènes de mécanique quantique, la superposition et l'intrication, permettent à l'informatique quantique d'effectuer des calculs plus efficacement que les algorithmes d'I.A. classiques.

Les services qui découlent de l'I.A., des données massives et d'autres applications utiliseraient le quantique pour explorer de nombreuses solutions de test possibles en même temps afin de confirmer la meilleure aux problèmes les plus complexes.

Les algorithmes I.A. seraient prometteurs pour contrôler les réseaux de senseurs où il y a un petit nombre de données mais qui requiert une interprétation songée. Le Québec pourrait s'y intéresser compte tenu de son expertise en IA et en mathématique.

En termes de recommandations :

Supporter des initiatives développant des applications du quantique et de l'I.A.



Supporter la croissance de l'écosystème

Développer une masse critique de personnel hautement qualifié

Développer des cursus académiques universitaires et collégiaux transdisciplinaires couvrant le génie, la physique, les mathématiques, et l'informatique :

- Création d'un comité de travail sur le cursus en quantique tel que pour la consultation sur l'Université québécoise du futur par le scientifique en chef du Québec.

Offrir une formation Marketing & Ventes B2B dans les grandes écoles de gestion (par exemple: HEC, John Molson, Desautels et autres institutions similaires aux universités Laval, de Sherbrooke, Bishop) ;

Développer des programmes de formation pour professionnels en exercice et en requalification pour métiers existants ;

Favoriser la croissance d'intégrateur domestique afin d'éviter l'embauche d'experts locaux par des sociétés étrangères.

Attirer des chercheurs et étudiants étrangers

Faire du Québec une terre accueillante et fertile pour chercheurs, ingénieurs et technologues en quantique, tant québécois qu'étrangers, afin de rester compétitif dans la course internationale aux talents, notamment en structurant et renforçant la R-D autour possiblement d'unités mixtes de recherche ou de zones d'innovation bénéficiant de conditions favorables à la venue de chercheurs étrangers ;

- Et en termes de recommandations, ceci pourrait impliquer :
- Appuyer les projets d'innovation des startups en quantique tout en favorisant la proposition de leurs projets dans des secteurs d'avenir et/ou dans des filières d'excellence en mutation ;
- Faire du Québec une terre d'accueil pour attirer les entrepreneurs, chercheurs, étudiants à s'établir ou investir au Québec afin d'enrichir l'écosystème d'innovation, notamment au sein des zones d'innovation supportant le quantique ;
- Accélérer la formation et/ou l'acquisition de talents spécialisés essentiels à l'émergence et l'essor au Québec d'une filière industrielle dédiée au quantique :
 - En ingénierie et techniques transdisciplinaires, particulièrement pour femmes ;
 - Chaires d'excellence ou industrielles autour de chercheurs établies ou à venir ;
 - Formation continue pour le développement des compétences en quantique.
- Le Québec devra stimuler les compétences entrepreneuriales des chercheurs et de leurs étudiants intéressés à se lancer en affaires en profitant des incubateurs et programmes d'accompagnement existant au Québec pour les porteurs de projets.

Encourager des investissements étrangers

Doter l'écosystème de plateformes industrielles de tests, notamment l'infrastructure en communications quantiques, pour supporter le développement de prototypes et attirer des partenaires étrangers.



Et en termes de recommandations, ceci pourrait impliquer :

Inviter et attirer des startups étrangères à s'implanter au Québec pour renforcer la position du Québec comme hub mondial du développement de technologies quantiques. Les capacités dynamiques et évolutives de l'écosystème d'innovation s'en trouveront renforcées par les synergies à prévoir.

Attirer des partenaires industriels grâce à des projets d'infrastructures de démonstration

Sensibiliser les dirigeants des grandes firmes aux changements qui se préparent via le quantique et encourager les nouveaux usages de technologies quantiques (calcul, communication sécurisée, capteurs...) ;

Dresser une liste d'acteurs étrangers ayant démontré un leadership et leur intérêt pour le quantique et qui pourraient vouloir s'implanter et/ou investir au Québec dans le domaine ;

Élaborer une approche coordonnée auprès des grands acteurs industriels étrangers susceptibles de s'intéresser au Québec (avec . Investissement Québec, Montréal International, Québec International, Délégations générales du Québec, etc.) ;

Travailler avec les Délégations du Québec à Paris, Munich et Barcelone afin d'identifier des opportunités d'investissement ou de financement de projets au sein de l'écosystème. Les hubs de Paris-Saclay, Munich et Barcelone sont parmi les plus avancés dans le domaine quantique au niveau mondial et ceux qui connaissent déjà bien le Québec.

Promouvoir le secteur ici et à l'étranger

Adapter les structures chargées de **l'accompagnement des startups et PME** (incubateurs, accélérateurs, centres d'excellence, instituts, etc.) aux technologies quantiques par le support de Quebec Quantique, le consortium des incubateurs en quantique mandaté par le MEI, qui fournit des ressources spécialisées dans les enjeux stratégiques, de développement commercial, d'industrialisation aux accélérateurs québécois.



Supporter la promotion de l'écosystème d'innovation

- Appuyer les efforts de coordination à l'échelle du territoire initiés notamment via l'initiative « Québec Quantique » et s'associer à d'autres groupes et partenaires ;
- Donner de la visibilité aux histoires à succès québécoises en quantique ;
- Capitaliser sur les travaux pionniers de chercheurs (théoriciens et expérimentateurs) québécois ;
- Multiplier les partenariats entre la recherche et l'industrie ;
- Coorganiser des événements phares, en partenariat notamment avec les sociétés et organisations professionnelles (OSA, IEEE, SPIE...) ;
- Produire et diffuser les contenus rédactionnels sur usages des technologies quantiques à fort impact potentiel sociétal et/ou économique ;
- Améliorer la notoriété et l'attractivité du Québec.

Ajouter les technologies quantiques aux programmes de financement des technologies de rupture, afin d'offrir aux entreprises et aux chercheurs, un financement conséquent à chaque étape de croissance d'un projet.

Promouvoir auprès des associations sectorielles les usages potentiels des technologies quantiques dans différents segments de marchés et pouvant déboucher sur de nouveaux produits et services.

Et en termes de recommandations :

- Appuyer les projets d'innovation des startups en quantique tout en favorisant la proposition de leurs projets dans des secteurs d'avenir et/ou dans des filières d'excellence en mutation ;
- Financer avec des montants conséquents aux phases de financement (pré-amorçage, démarrage, rondes A, B), la R-D et la commercialisation des innovations quantiques ;
- Inviter et attirer des startups étrangères à s'implanter au Québec pour renforcer la position du Québec comme hub mondial du développement de technologies quantiques. Les capacités dynamiques et évolutives de l'écosystème d'innovation s'en trouveront renforcées par les synergies à prévoir ;
- Reconnaissance par le gouvernement du rôle catalyseur important de la commande publique dans le soutien à l'innovation (rôle de premier client ou employeur)¹ ;
- Le gouvernement québécois peut dynamiser l'écosystème et accélérer l'innovation sur son territoire en lançant des concours comme client potentiel en encourageant les sociétés d'états et les ministères à soutenir le développement du marché quantique ;
- Prendre exemple sur le gouvernement fédéral qui a lancé à l'automne 2020 son programme 'Solutions Innovatrices Canada' des appels à solutions faisant appel aux technologies quantiques.

Sous-jacent à ces actions, il convient à l'industrie d'agir de façon responsable aux enjeux éthiques qui découlent de l'introduction des technologies du quantique pour les individus et la société notamment en termes de liberté , de solidarité ou de développement durable.

1. Accelerating the Emergence and Development of Innovation Ecosystems through Procurement: A toolkit. White Paper, 26 pages, World Economic Forum, 2019

Conclusion.

La proposition de Stratégie en Technologies Quantiques vise à positionner le Québec comme un joueur mondial en quantique dans certains créneaux stratégiques.

Les technologies quantiques représentent des opportunités majeures au sein de marchés qui se forment présentement.

Plusieurs gouvernements et grandes firmes investissent massivement en R-D. La commercialisation s'amorce. Alors que le Canada vient d'annoncer qu'il va préciser sa stratégie nationale en quantique, **le Québec peut démontrer ici un leadership.**

Pour souhaiter réussir, considérant sa petite taille, le Québec se doit de prioriser ses actions au sein de filières fortes de son économie et développer son écosystème en quantique autour de quelques piliers industriels. Les prochaines démarches vont permettre d'identifier quels sont les secteurs à prioriser, par exemple, l'énergie, les services (assurances, finances et gouvernements), les ressources naturelles ou le transport.

Le Québec doit cibler ses expertises pour répondre aux besoins de ces acteurs dominants, ici et à l'étranger, et développer des produits et services d'avant-garde.

La stratégie d'affaires centrée sur le développement de produits et de services vise à greffer l'écosystème naissant à de tels locomotives ou futurs intégrateurs. Ainsi, les firmes québécoises en quantique seront en mesure d'offrir un portefeuille de produits et applications adaptés aux besoins de grands donneurs d'ordre et ainsi profiter plus rapidement des marchés mondiaux naissants. En s'appropriant des innovations quantiques québécoises, ces champions seront en mesure d'accroître leur compétitivité dans leurs marchés mondiaux, de profiter des retombées économiques pressenties du quantique et de servir d'ancrage pour l'écosystème quantique associé à chacune de ces filières.

Divers éléments favorisant la réussite d'un écosystème dynamique s'ajouteront :

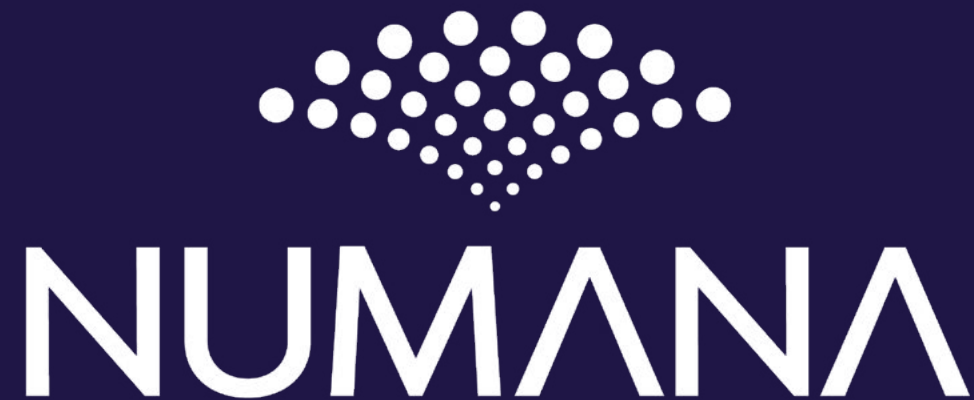
- projets collaboratifs ;
- infrastructures de démonstration ;
- valorisation de la propriété intellectuelle ;
- normalisation internationale ;
- formation de talents spécialisés ;
- attraction des chercheurs de calibres et d'investissements étrangers ;
- promotion du quantique ici et à l'étranger ;
- etc.

Du point de vue industriel, le Québec est déjà fort en applications électroniques, optiques, photoniques, etc. et, du côté académique, il est déjà très solide en technologies dites quantique 2.0.

Le gouvernement québécois a ainsi en main les outils et leviers pour jouer un rôle moteur dans l'émergence et l'essor d'une filière industrielle quantique au Québec.

Étant donné l'impact majeur qu'aura la montée en puissance des technologies quantiques sur le tissu économique et plus largement sur la société, la mise en œuvre de la stratégie décrite dans le présent document, centrée sur l'appropriation éthique des technologies quantiques par des entreprises innovantes, devrait s'inscrire aux priorités du MEI.





Cette proposition de stratégie pour l'industrie quantique est produite par l'équipe de Numana.

Annexes

Annexe 1 – Qu’est-ce que la mécanique quantique ?



Emmanuel Macron
Président de la République
Française

Les technologies quantiques nous projettent dans la France de 2030, celle que nous construisons à travers France Relance et les investissements d'avenir : un monde où les performances des ordinateurs seront fulgurantes et la sensibilité des capteurs extrêmes, un monde où nous pourrions identifier très rapidement le remède à un agent pathogène, simuler des molécules, décrypter des messages aujourd'hui indéchiffrables et communiquer de façon parfaitement sécurisée.

Une nouvelle révolution technologique se profile et la France y prendra toute sa part. Pour viser haut, nos regards doivent porter loin. Si, dans la gestion d'une crise sanitaire, la réactivité compte, les forces profondes d'un pays se construisent au minimum sur des années, sinon des décennies. Ce temps long du travail scientifique, cette anticipation que demandent la découverte et l'expérimentation, est au cœur de notre politique d'investissement dans la recherche et le développement technologique.

Source : Stratégie nationale sur les technologies quantique, Saclay, France, 21 janvier 2021

Le raccourcissement des temps de calcul d'un facteur d'un milliard, qu'apporteront les ordinateurs quantiques **d'ici 5 à 10 ans, constitue une rupture technologique majeure**. Des outils inédits d'optimisation auront des impacts sociétaux importants grâce à la possibilité de simuler les molécules et leur action, ouvrant une nouvelle ère de la chimie, ou encore de prédire finement les propagations épidémiques, ou d'optimiser le trafic en temps réel. Les capteurs quantiques apporteront de nouvelles fonctionnalités de navigation sans satellite, ou encore des capacités de détection inédites, de dire le président Macron.¹

1. Stratégie française en quantique https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/01/dossier_de_presse_quantique_vfinale.pdf

A l'aube du XXe siècle, la naissance de la physique quantique a révolutionné la conception du monde. Les physiciens réalisent que la **physique classique, qui décrit l'environnement quotidien macroscopique, devient inopérante à l'échelle microscopique** des atomes et des particules. Ceux-ci n'évoluent pas comme un système classique, où les quantités d'énergie échangées peuvent prendre un continuum de valeurs. **Pour un système quantique, l'énergie s'échange par valeurs discrètes ou quanta** où les valeurs intermédiaires sont interdites.

La physique classique décrit différemment un corpuscule (atome, particule) et une onde (lumière, électricité) tandis que la mécanique quantique permet de mettre en évidence la dualité de ces deux descriptions : un photon, un électron, un atome ou même une molécule sont à la fois onde et corpuscule.

Si, en physique classique, l'état d'un système est parfaitement défini par la position et la vitesse de l'ensemble de ses composants – il ne peut être alors que dans un seul état à un moment et à un endroit donné, il n'en va pas de même en physique quantique.

Un système quantique, tel qu'une simple onde-corpuscule, peut se trouver dans **une superposition cohérente d'états**, qui traduit l'aspect probabilistique de tous ses états possibles. Dans l'univers quantique, la connaissance parfaite d'un système est inaccessible, au mieux on peut savoir sa position (par exemple un électron) mais cela au prix d'une incertitude minimale sur sa quantité de mouvement régissant son déplacement. Ceci est appelé le principe d'incertitude de Heisenberg. C'est ce qui fait une différence entre la physique classique (où il y a un continuum de position et d'énergie qui décrivent l'évolution prédictive d'un système) alors que la physique quantique se caractérise par une probabilité plus ou moins significative de présence à un endroit et une certaine probabilité de se trouver à un ou plusieurs autres endroits simultanément.

Pour résoudre le dilemme associé à sa position réelle ou état d'énergie réel, il faut mesurer le système qui est du coup soit détruit (le photon ou l'électron est alors capté l'empêchant ainsi de poursuivre son parcours) ou soit modifié (une mesure partielle détecte le passage de l'onde-corpuscule) mais au prix de le transformer. Pour imager ceci, considérons un électron qui est décéléré par un champ quelconque et qui émet une partie de cette énergie de ralentissement par un photon. Il peut poursuivre son parcours mais ses propriétés ont été modifiées.²

2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_d%27incertitude

Quantique 1.0

Des découvertes de la première révolution quantique, découlent des applications massivement utilisées aujourd'hui tels les lasers, les transistors qui sont à la base des circuits intégrés et des appareils électroniques. Pour l'heure, les physiciens cherchent encore à exploiter la richesse des états quantiques et à maîtriser leurs mesures dans la perspective lointaine d'un ordinateur quantique.³ Une courte description de certains phénomènes quantiques :

- **L'effet laser** se dit d'une émission spontanée d'une molécule à la suite de l'interaction avec un photon passant à très grande proximité. Ce photon induit aura les mêmes caractéristiques que le photon initiateur de l'émission spontanée. C'est ce qui donne la caractéristique de longueur d'onde et de phase unique d'un laser.
- **La supraconductivité** traduit cette propriété de certains matériaux qui offrent une résistance nulle à la circulation d'un courant à travers ceux-ci. Deux électrons s'unissent alors pour former une paire de Cooper, un unique état quantique.⁴ Mesurable qu'à basse température présentement, ils représentent une révolution pour le transport de l'énergie s'ils pouvaient opérer à température ambiante.

3. <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-mecanique-quantique.aspx>

4. https://fr.wiktionary.org/wiki/paire_de_Cooper

- **L'effet tunnel** permet à des électrons de franchir une barrière de potentiel, ce qui est strictement interdit en physique classique.
- **Le spin** est une propriété quantique sans équivalent classique qui explique, entre autres, les propriétés magnétiques de la matière.

Alors que la première génération des technologies quantiques a poursuivi son développement rapidement, elle a également permis l'arrivée de technologies habilitantes incontournables qui seront absolument nécessaires à la prochaine révolution quantique.⁵

Quantum 2.0 / Quantique 2.0

La révolution quantique de l'information va toucher l'ensemble de la société. Ses trois domaines – capteurs, communication, calcul – connaîtront leur pleine maturité grâce à la recherche fondamentale. La plupart des validations de principe et des applications préliminaires sont confinées dans les laboratoires d'universités et des centres de recherches ; elles exigent une infrastructure coûteuse, des équipements spécialisés, des équipes d'experts et de vastes locaux.

Nonobstant, **la commercialisation de certaines technologies quantiques 2.0 a débuté.** Déjà, les capteurs quantiques mesurent finement l'information. On voit aussi émerger commercialement des systèmes de communications quantiques et de petits systèmes de calcul quantique.

5. <https://www.canada.ca/fr/ministere-defense-nationale/organisation/rapports-publications/strategie-de-sciences-et-technologies-quantiques-du-mdn-et-des-fac/introduction.html>

Parmi eux, on peut compter des réseaux créés en contrôlant précisément l'emplacement des atomes à l'aide de lasers ou le chiffrement de données basé sur l'aléa absolu des phénomènes quantiques. Ceux-ci ont des caractéristiques jadis inaccessibles, qui rendront possibles des prouesses étonnantes qu'auront les ordinateurs quantiques à réaliser, dans un temps polynomial, des problèmes impossibles pour un ordinateur traditionnel.

Grâce à un contrôle plus étroit de la manipulation des systèmes très susceptibles aux perturbations a permis une nouvelle gamme de possibilités depuis les quinze dernières années. Les technologies quantiques dites 2.0 reposent des propriétés extraordinaires : la quantification, la superposition et l'intrication.

Quantification

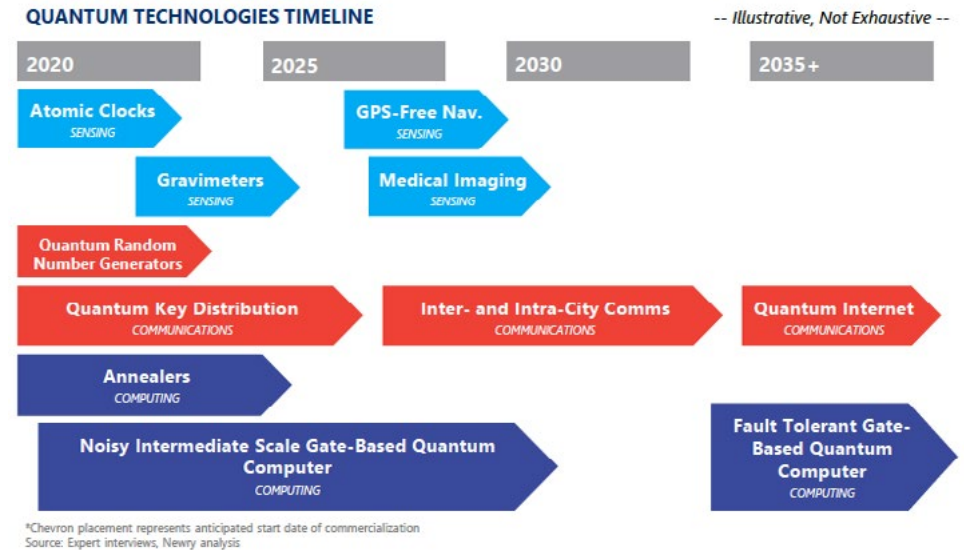
En mécanique quantique, les systèmes n'ont droit qu'à certaines énergies et ne peuvent pas prendre des valeurs arbitraires, on dit que **l'énergie est quantifiée**. Les particules sont des ondes et n'ont pas n'importe quelle forme : à chaque forme son énergie. Ces paliers d'énergie permettent de comprendre la structure des atomes et créer de nouveaux outils technologiques.

Superposition

La **superposition** correspond au fait qu'un système quantique - particules de matière ou de lumière - peut se trouver dans deux états en même temps, ce qui n'a pas d'équivalent dans le monde classique. Selon le principe de superposition, un même système quantique peut posséder plusieurs états pour une certaine quantité observable (spin, position, quantité de mouvement, etc.). En conséquence, la position est représentée comme une somme d'un nombre infini d'état de position, chacun représentant une position précise dans l'espace. Cette combinaison linéaire est nommée état de superposition, car la particule peut être vue comme étant simultanément, avec des probabilités diverses, en plusieurs endroits. Cet état s'applique de la même façon à toutes les autres observables imaginables typiquement utilisées : vitesse, spin, etc.

Intrication

L'**intrication** (enchevêtrement ou « entanglement ») est le résultat de la forte corrélation d'état qu'ont deux ou plusieurs systèmes interagissant entre eux. Des systèmes quantiques intriqués ne peuvent plus se considérer individuellement, quelle que soit la distance qui les sépare, leurs états quantiques restent liés comme s'ils formaient un tout. Un tel état est dit intriqué parce qu'il existe des fortes corrélations entre les propriétés physiques observées de ces particules distinctes. L'intrication quantique a des applications potentielles dans les domaines de la cryptographie quantique, la **téléportation** quantique et même l'ordinateur quantique.



Jalons dans le temps

La capacité de créer, manipuler et lire les états quantiques individuels auront une utilité sur plusieurs applications en capteurs, en communications et en calcul. La figure suivante illustre l'arrivée de certaines applications à base de technologies quantiques en optique et photonique.⁶

6. OIDA Quantum Photonics roadmap, <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OIDA-2020-3>

Au niveau des systèmes, les cibles atteintes se résument comme suit : ⁷

Capteurs (senseur et métrologie)

- Dans 3 ans, des capteurs quantiques, des systèmes d'imagerie et des standards quantiques qui surpassent leurs homologues classiques (résolution, stabilité) démontrés en environnement de laboratoire ;
- Dans 6 ans, des capteurs quantiques intégrés, des systèmes d'imagerie et des normes de métrologie au niveau du prototype, avec les premiers produits commerciaux mis sur le marché, ainsi que des démonstrations en laboratoire de technologies de détection améliorées par enchevêtrement ;
- Dans 10 ans, passage des prototypes aux appareils disponibles commercialement.

Communications

- Dans 3 ans, le déploiement et la certification de systèmes basés purement sur des nombres aléatoires (QRNG) et de distribution quantique de clés (QKD) à haut débit, permettra le développement de produits ayant un haut niveau TRL, à faible coût avec de nouveaux protocoles pour des applications en réseau, ainsi que le développement de prototypes et protocoles pour répéteurs quantiques, nécessaires pour les communications de longues distances ;
- Dans 6 ans, disponibilité de dispositifs et des systèmes économiquement évolutifs pour rendre les réseaux interurbains et intra-urbains capables de réaliser des applications adaptées à l'utilisateur final. Preuves de concept et démonstration de solutions évolutives pour les réseaux quantiques par l'interconnexion de dispositifs et des systèmes dotés de capteurs ou de processeurs quantiques ;
- Dans 10 ans, développement de réseaux autonomes métropolitains, longue distance (> 1000 km) et basés sur l'intrication, un « Internet quantique », ainsi que des protocoles exploitant les nouvelles propriétés qu'offre la communication quantique.

7. Quantum Flagship, <https://qt.eu/discover-quantum/quantum-technologies-in-a-nutshell/>

Calcul (informatique et simulation)

- Dans 3 ans, de meilleurs algorithmes de correction d'erreur permettront de fabriquer des processeurs quantiques avec éventuellement plus de 50 qubits. Des dispositifs expérimentaux avec un avantage quantique certifié à l'échelle de plus de 50 (processeur) ou 500 (treillis) systèmes quantiques couplés individuels ;
- Dans 6 ans, des processeurs quantiques équipés de qubits plus robustes aux erreurs sont attendus. Des avantages quantiques dans la résolution de problèmes importants en science (par exemple le magnétisme quantique) et démonstration de l'optimisation quantique (par exemple par le recuit quantique) ;
- Dans 10 ans, des algorithmes quantiques démontrant une accélération quantique et surpassant les ordinateurs classiques seront exploités. Des prototypes de simulateurs quantiques résolvent des problèmes au-delà de la capacité des supercalculateurs, y compris en chimie quantique, la conception de nouveaux matériaux, et des problèmes d'optimisation comme dans le contexte de l'IA.

Annexe 2 – Comité aviseur en quantique

Numana joue un rôle pivot dans l'écosystème québécois de l'innovation. Observatoire et groupe de réflexion stratégique, son volet Humanitek étudie les impacts potentiels des technologies émergentes, notamment les meilleures approches pour replacer l'humain au cœur du processus d'innovation technologique au Québec et jeter ainsi les bases concrètes d'un avenir cohérent. Numana veut ainsi favoriser l'émergence de projets structurants afin de répondre aux problématiques et attentes identifiées, et ainsi capitaliser sur le potentiel de l'écosystème québécois d'innovation à proposer et soutenir des initiatives à fortes retombées socio-économiques.

Poursuivant sur l'intérêt marqué du ministère de l'Économie et de l'innovation (MEI) depuis 2019, Numana avait procédé à un état des lieux et à l'évaluation des impacts socio-économiques du développement du secteur quantique au Québec.

Afin de mener à bien cette initiative structurante pour l'avenir du Québec, d'assurer que les conditions et le développement d'un écosystème d'innovation pour le quantique se réalisent et d'élaborer une **stratégie québécoise en technologies quantiques** pour cette nouvelle industrie, Numana a formé le **Comité aviseur en quantique** composé d'experts de grande expérience en innovation industrielle.

Ces conseillers seront appelés à élaborer une série d'activités à mettre en œuvre pour faire croître le secteur du quantique au Québec. Celles-ci incluent l'élaboration d'une stratégie globale pour bâtir une industrie compétitive, une cartographie, des activités d'animation, de communication et de promotion à l'international, faciliter l'accès à du financement, attirer des acteurs étrangers, etc., et la proposition de projets structurants pour le secteur.

- Les membres du comité aviseur en quantique incluent des acteurs provenant d'universités et institutions de recherche, de l'industrie, du gouvernement et d'autres intervenants en financement et en incubation d'entreprises notamment:
- **Vincent Aimez**, Vice-recteur, Valorisation et Partenariats de l'U. de Sherbrooke ;
- **François Borrelli**, PDG, Numana ;
- **Richard Bruno**, Fellow invité CIRANO ;
- **André Fougères**, Vice-président, Innovation et technologie de l'INO ;
- **Charles Lespérance**, Associé – Fonds pour les technologies profondes, BDC Capital ;

-
- **Shibl Mourad**, Directeur, Développement logiciel, DeepMind Canada* ;
 - **Daria Riabinina** et **Nathalie Richard**, MEI, observatrices du gouvernement du Québec.

Pour Numana, Denis Akzam et Jacques Mc Neill furent responsables de la coordination du comité aviseur et de la stratégie du développement quantique avec le support de Marc Leclair.

* : Les commentaires reflètent ceux du membre et pas nécessairement ceux de son employeur

Annexe 3 – Cartographie des acteurs québécois en quantique

En février 2020, Numana a mandaté Arche Innovation pour réaliser une cartographie du secteur des technologies quantiques du Québec.⁸

Ce travail a permis de cerner les intervenants de l'industrie, de la recherche et du financement et d'identifier diverses initiatives qui ont permis le développement d'une expertise reconnue mondialement en quantique.

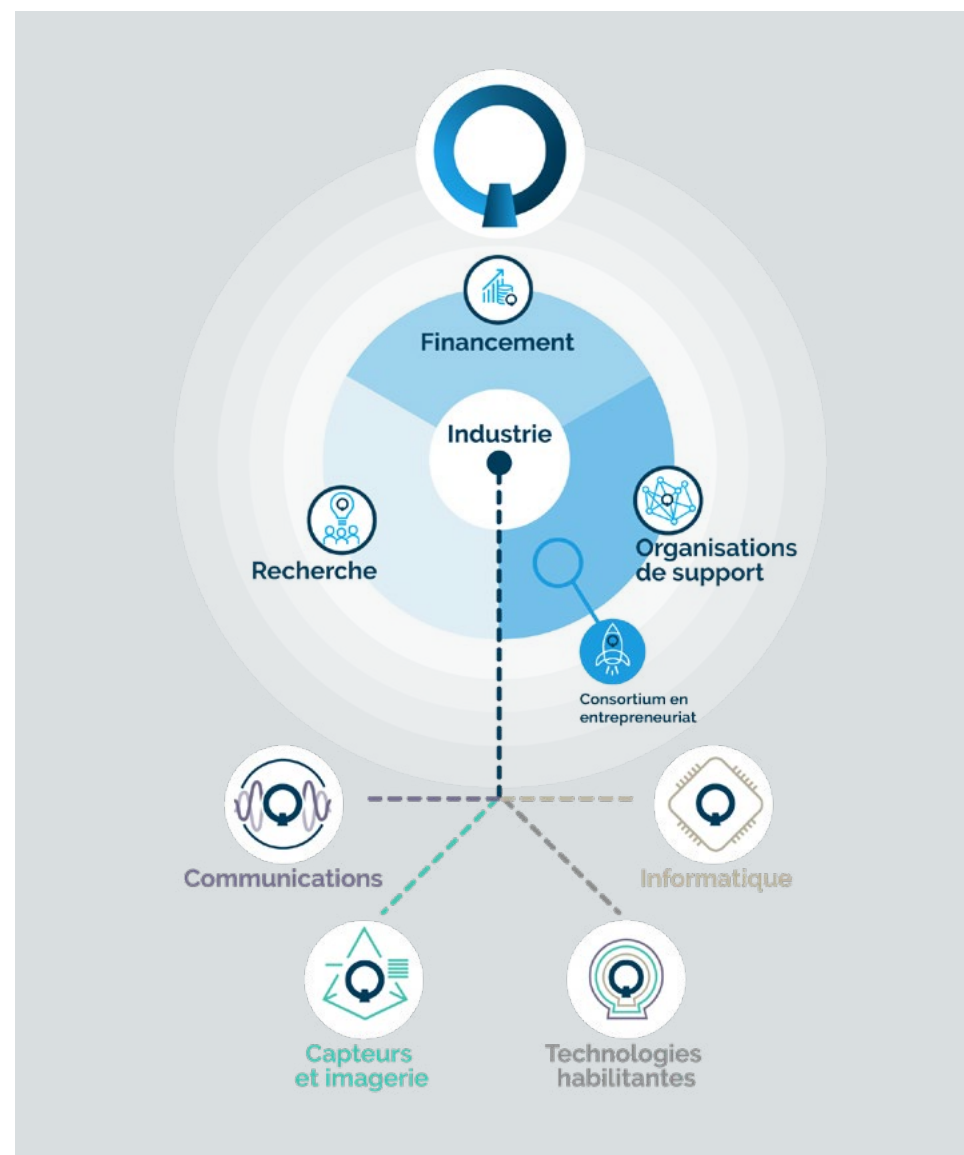
3 axes technologiques et 3 pôles régionaux

La cartographie suivante repose sur trois axes, soit les capteurs, l'informatique et les communications. Les intervenants industriels ou académiques actifs majoritairement autour de Montréal, Québec et Sherbrooke sont présentés dans la figure suivante.

La cartographie est maintenue à jour par Québec Quantique et se retrouve sous une version dynamique sur [le site de Québec Quantique](#).

Les propos recueillis lors des consultations effectuées auprès de divers intervenants du secteur du quantique au Québec dans le cadre de **l'exercice de cartographie en 2019 et 2020** secondent plusieurs arguments du comité aviseur notamment sur les sujets suivants:

8. Le rapport final de la « Cartographie et analyse de positionnement stratégique des acteurs oeuvrant dans les technologies quantiques » est en édition et sera rendu publique prochainement



Normalisation

- Il est nécessaire de créer des normes communes pour le secteur quantique afin de cibler des projets et de créer un fil conducteur pour le développement de solutions applicables. Il existe trop de types de technologies quantiques, afin de les rendre commercialement viables, nous devons **créer des standards et des normes** ;
- Il serait utile de standardiser les tests de benchmarking à faire ;
- On constate que les standards technologiques n'ont pas encore été établis. Ceci rend **ambiguë** les questions d'accès à l'équipement et des ententes de PI, et pourrait nuire à la cohésion des activités de l'écosystème lorsque celui-ci aura évolué.

Enjeux business / concurrence / financement

- Il y a encore peu d'investissement de fonds dans des projets de startups en quantique, car il y a **peu de vulgarisation du domaine pour des non-initiés**. Les investisseurs sont peu intéressés à s'investir dans quelque chose qu'ils ne comprennent pas et ne peuvent saisir les portées commerciales ;
- Les entreprises rencontrées se financent de différentes façons : Seed money, appels à projets du MEI, CRSNG, Investissement Québec, contrat de R-D.

Enjeux talent et formation

- Les entreprises et utilisateurs potentiels ont besoin d'employés en mesure de comprendre le quantique afin de les aider à l'intégrer dans leurs activités ;
- Les entreprises hors du domaine sont plus ou moins au courant des possibilités du quantique pour leur secteur. Les startups aimeraient qu'un **effort soit fait pour démocratiser le sujet** et ainsi faciliter leurs démarches auprès de potentiels clients et fournisseurs. Toutes ont mentionné être prises avec des enjeux liés à mieux connaître le marché, connaître les joueurs et l'industrie et identifier les premiers clients ;
- Pour séduire les entreprises, il faudrait avoir une idée des applications possibles, et quelles industries seraient intéressées à participer à ce domaine.
- La pierre angulaire du développement est la formation d'une main-d'œuvre qualifiée tant sur le plan technique (collégial) que professionnelle (universitaire). Ainsi, elle sera à même de manipuler les équipements et concevoir de nouveaux logiciels, de nouveaux matériaux ou de nouvelles technologies quantiques. Ceci facilitera **l'adoption de ces technologies dans des secteurs non traditionnels** quantiques qui pourraient bénéficier de ces technologies tout en venant bien sûr garnir les rangs des entreprises et startups du secteur quantique. Les entreprises établies du domaine et les startups nous ont mentionné que les **formations devront avoir un côté multidisciplinaire**.

Atouts du Québec

- La recherche est très bien établie dans le secteur, **c'est tout le reste de l'écosystème qui doit être mis en place** (startups, entreprises établies qui intègrent des technologies quantiques, milieu du développement économique pour appuyer le secteur, formation de la main-d'œuvre technique) ;
- La région de Québec est reconnue pour sa recherche en photonique, celle de Sherbrooke se démarque sur le plan de la recherche en informatique quantique et l'Université de Montréal à une des sommités mondiales en cryptographie quantique. **Le milieu de la recherche est bien connecté localement et à l'international**. Les matériaux quantiques, les capteurs, la photonique et la cryptographie quantique sont considérés par nos répondants comme les forces du Québec.

Forces du secteur :

- Collaboration et communications favorables entre différentes unités de recherche québécoise dans le quantique ;
- **Ouverture importante du MEI afin d'appuyer** le développement du quantique positivement ressentie par différents acteurs de l'écosystème ;
- Le Québec est l'un des pôles importants des technologies quantiques au Canada se démarquant mondialement en photonique, cryptographie quantique et communications quantiques. Le Canada en soi est un acteur majeur de la recherche ;
- La **création de la zone d'innovation Sherbrooke Quantique et l'acquisition d'un ordinateur quantique qui sera à Bromont** avec le tout premier IBM Discovery Accelerator au Canada.
- La recherche académique faite au Québec est reconnue à travers le monde et plusieurs chercheurs **sont des sommités dans le domaine**. Nos répondants citant régulièrement comme chercheurs pour illustrer leur propos incluent Gilles Brassard de l'Université de Montréal en cryptographie quantique, David Poulin et Alexandre Blais de l'Université de Sherbrooke et Claude Crépeau en communication quantique à McGill.

Opportunités dans le quantique :

- Beaucoup d'efforts internationaux sont concentrés dans le développement de l'ordinateur quantique **laissant beaucoup de place au développement de technologies appuyant cet ordinateur** ;
- **Les gouvernements peuvent devenir de premiers clients** particulièrement au niveau de la cryptographie et des communications quantiques ;
- Les technologies quantiques sont des technologies habilitantes pouvant offrir des occasions d'affaires dans plusieurs secteurs.

Technologies offrant des retombés à court terme :

- Viser les « low-hanging fruits » permettrait de bâtir une expertise reconnue dans l'application des technologies quantiques et permettrait aussi de fournir des champs de recherches appliquées à nos chercheurs. Cela permettrait également de démocratiser la technologie dans d'autres domaines.
- Les technologies mentionnées sont : **les algorithmes, les magnétomètres quantiques, les interféromètres, les amplificateurs, et les mémoires quantiques, la génération de nombre aléatoire et la distribution de clef de chiffrement.**

Gouvernance de l'écosystème quantique

- L'écosystème est actuellement composé de plusieurs acteurs qui travaillent collectivement, le tout coordonné par Québec Quantique, qui catalyse l'écosystème quantique du Québec et qui a pour mission de faire des sciences et des technologies quantiques un levier de développement économique et social pour le Québec et le positionner comme un chef de file du domaine sur la scène nationale et internationale.
- Ce climat de confiance servira de base pour orienter les discussions sur le domaine du quantique, **les acteurs étant plus prêts à collaborer et à échanger les idées**. Il permettra également de créer un contexte favorisant l'identification des acteurs pouvant contribuer au développement du quantique.

Annexe 4 – Domaine d’applications

Il convient de bien comprendre les usages potentiels des technologies innovantes par une approche à la fois prospective et participative. Une liste partielle **des usages anticipés** du quantique suit ci-dessous pour les principaux **secteurs économiques** au Québec à même de tirer avantage d’applications dérivées des sciences et technologies de l’information quantique.

Des études subséquentes plus approfondies permettront de prioriser ces secteurs selon les applications et usages (« use cases ») à supporter initialement.

Agriculture et chimie verte :

- Amélioration des procédés de production d’engrais ;
- Permettre des économies d’énergie dans la catalyse chimique.

Aviation :

- Chargement optimal d’un avion ;
- Navigation inertielle (sans satellite) ;
- Optimisation et gestion du trafic aérien en temps réel ;
- Planification des horaires d’équipage ;
- Résolution d’autres problèmes d’optimisation très complexes.

Construction :

- Surveillance d’infrastructures via nouvelles générations de capteurs et de senseurs ;
- Optimisation de la formulation des bétons hautes performances ;
- Autres problématiques de recherche opérationnelle sur grands chantiers.

Cybersécurité :

- La force du RSA est dû aux algorithmes lents que des supercalculateurs ne peuvent pas faire un décodage en un temps raisonnable, car leur capacité de calcul ne sera jamais assez élevée. Il a été démontré théoriquement à travers l'algorithme de Shor qu'un ordinateur quantique ayant assez de puissance de calcul sera capable de venir à bout des systèmes de chiffrement actuels ;
- La cryptographie post-quantique ;
- Certaines entreprises exigent que leurs fournisseurs instaurent de solides mesures de sécurité de l'information pour se protéger des cybercriminels qui cherchent à les attaquer en s'infiltrant dans leurs systèmes. En respectant des règles de cybersécurité plus rigoureuses, cela donne un avantage concurrentiel pour fidéliser leur clientèle.

Développement durable, environnement :

- Mesures in situ pour meilleure connaissance du milieu ;
- Métrologie pour développer de la modélisation d'écosystèmes naturels ;
- Nouveaux instruments de nanométrie ;
 - Métrologie au service de l'environnement ;
 - Optimisation de l'allocation de ressources.
- Encourager et favoriser le rayonnement d'initiatives fondamentales telles Q4Climate, un regroupement visant à faire levier sur les technologies quantiques pour lutter contre les changements climatiques.⁹

9. <https://q4climate.github.io>

Énergie :

- Fusion nucléaire ;
- Photovoltaïque / Photosynthèse artificielle ;
- Capturer, stocker ou transporter l'énergie, production industrielle d'hydrogène, dopage des procédés de capture et séquestration du CO₂ ;
- Accélération de la découverte de nouveaux matériaux (Advanced Energy Materials Discovery) et/ou de nouveaux procédés (modélisation des états excités de systèmes moléculaires complexes...) ;
 - Nouvelle génération de batteries pour véhicules autonomes ;
 - Gestion temps réel du réseau électrique à l'ère des nouvelles énergies (Smart grid) ;
 - Surveillance de l'environnement lié aux risques radioactifs, aux abords des centrales nucléaires et sites d'enfouissement de déchets nucléaires (détection rayonnements ionisants) ;

Forestier :

- Analyse imagerie satellitaire... issue d'une nouvelle gamme de capteurs ;
- Modélisation du rayonnement photosynthétiquement actif
Optimisation des procédés de bioraffinage ;
- Exploitation durable des ressources forestières.

Finance (banques, assurances, etc.) :

- Mieux cibler / servir clients par l'IA ;
- Optimiser la gestion de portefeuilles ;
- Analyse du risque de catastrophes naturelles ;
- Sécurité des données de clients ;
- Cybersécurité des communications.

Manufacturier :

- Optimisation de procédés industriels dans secteur des 'Pâtes et papiers' ;
- Optimisation des procédés industriels pour la 'Production d'aluminium' ;
- Optimisation d'autres procédés industriels ;
- Gestion en temps réel des chaînes d'approvisionnement (BMW...) ;
- Contrôle de qualité en cours de production ;
- Autres problématiques de recherche opérationnelle visant à diminuer les coûts d'exploitation ou de production ou d'améliorer les performances des unités de production ;

Minier / matériaux :

- Prospection géologique (détection de différences gravimétriques indicatrices de la composition du sous-sol durant l'exploration) ;
- Navigation inertielle de camions et autres équipements autonomes permettant leur fonctionnement en continu ;
- Géophotonique pour l'obtention de données instantanées en minéralogie et de capteurs optiques distribués pour la surveillance des sites d'excavation et la mécanique des roches ;
- Logistique et chaînes d'approvisionnement (recherche opérationnelle).
- Accélération de la découverte de nouveaux et/ou de nouveaux procédés (modélisation des états excités de systèmes moléculaires complexes...);

Santé :

- Améliorer l'imagerie médicale et le diagnostic ;
- Concevoir de nouveaux médicaments ;
- Développer des dispositifs médicaux, diagnostic in vitro ;
- Recherches cliniques / Blind computing ;
- Production de composants stratégiques.

Télécommunications

- Les futures solutions du marché de la technologie 6G seront l'un des principaux moteurs de cette opportunité de marché en développement.
- Nombreux avantages liés aux nouvelles applications, services et solutions, tels que des améliorations substantielles dans les domaines de la détection, de l'imagerie et de la détermination de l'emplacement.
 - Des fréquences plus élevées permettent des taux d'échantillonnage beaucoup plus rapides ainsi qu'une précision nettement supérieure, jusqu'au centimètre près.
 - La combinaison de l'onde sub-mmWave et l'utilisation de la sélectivité en fréquence pour déterminer les taux d'absorption électromagnétique relatifs conduira à des progrès potentiellement significatifs dans les solutions de détection sans fil.
 - Ces solutions produisent d'énormes quantités de données. Cependant, l'informatique classique ne sera pas adaptée au traitement des données dans de nombreux cas d'utilisation émergents associés impliquant la détection, la détection, l'identification et l'imagerie.

Annexe 5 – Liste de secteurs économiques et de champions potentiels

Certaines entreprises québécoises dominantes dans leur secteur d'activités (« champions ») sont pressenties comme pouvant jouer le rôle d'ancre au sein de leur secteur d'activité économique :

- Aéronautique : MDA, Agence spatiale
- Assurances : Intact, SSQ
- Banques et finances : Groupe Desjardins, CDPQ
- Défense et sécurité nationale : Rhein Metall
- Énergie : Hydro-Québec, Énergir, Boralex, Enerkem
- Ingénierie et construction : Hatch, Pomerleau
- Manufacturier : BRP, Premier Tech
- Ressources naturelles et mines : Rio Tinto, 5N Plus
- Numérique : IBM, CAE, CMC Electronics, Teledyne DALSA
- Papetières : Cascades, Domtar
- Santé : Genome Québec
- Sécurité des données : Gouvernement du Québec
- Télécom : Bell Canada, Telus, Exfo, Ericsson
- Transport et mobilité durable : Canadien National, Port de Montréal, Lion, Airbus

5N Plus

Contact: Arjang Roshan

Activités actuelles : Entreprise existante: production mondiale de matériaux d'ingénierie et de produits chimiques de spécialité de haute pureté avec recyclage intégré

Marchés cibles: Matériaux et produits chimiques de spécialité

Opportunité de produits ou de services: (1) des outils pour concevoir de meilleures méthodes de purification (2) développer des matériaux avec des propriétés nouvelles ou meilleures (3) des propriétés physiques de métrologie en temps réel

Capitaux et investissements utilisés pour de nouvelles activités d'affaires, partenaires existants et / ou startups (pour atténuer les risques commerciaux et construire une écologie locale)

BRP

Contact: François Caza

Activité existante: Véhicules de loisirs pour la neige, la mer et les routes cyclables.

Marchés cibles: l'Amérique du Nord et l'Europe pour la neige et la mer et le Canada pour la route.

Opportunité de produits ou de services: Métrologie plus sensible sur la neige et l'eau.

Capital et investissements utilisés pour de nouvelles activités et startups (atténuation des risques)

CAE

Contact: Pascal Grenier

Activité existante: Formation aéronautique et sanitaire ; systèmes de simulation

Marchés cibles: aérospatiale et médicale mondiales

Opportunité de produits ou de services: métrologie médicale, simulateurs avec des entrées stochastiques plus réalistes et des boucles de rétroaction actives pour les utilisateurs

Investissements utilisés pour de nouvelles activités, startups existantes (atténuation des risques)

Canadien National

Contact : Jean-Jacques Ruest, CEO

Activités existantes, transport intermodal.

CMC Electronics (Esterline) – (anciennement Canadien Marconi)

Contact : Alain Poirier

Activité existante : systèmes avioniques, systèmes de gestion de vol, systèmes radar, GPS

Enerkem

Contact : André Breton, Directeur, procédés d'ingénierie

Activité existante : Fabrication de biocarburants et de produits chimiques renouvelables à partir de déchets et résidus non recyclables et non compostables.

Port de Montréal

Contact : Sylvie Vachon / Martin Imbleau

Entreprise existante : Administration portuaire de Montréal

Domtar

Contact : Patrick Loulou

Entreprise existante : Traitement à base de pâtes et papiers et cellulose à base de produits spécialisés (p.ex., soins médicaux et personnels, bureau et entreprise).

Marchés cibles : pâtes et papiers spéciaux de haute qualité et produits de cellulose raffinée.

Opportunité de produits ou de services: métrologie de production et contrôle de processus, en particulier pour les produits à base de polymères hybrides de cellulose raffinée (ex nanocellulose).

Investissements utilisés pour de nouvelles activités et / ou startups (atténuation des risques)

Premier Tech

Contact : Jean Bélanger, PDG

Entreprise existante : Fabrication et exportation

Hydro-Québec

Contact : David Murray

Activité existante : Production, distribution, maintenance et comptage d'électricité

Marchés cibles : Québec pour la production avec l'Ontario et l'est des USA pour la distribution

Opportunité de produit ou de service : Équilibrage de charge en temps réel basé sur des entrées stochastiques en temps réel pour les grands réseaux hétérogènes (AC diverses tensions et futurs DC) contrôle en temps réel dans le futur.

Capitaux et investissements utilisés pour de nouvelles activités, efforts conjoints RWE-EDF.

Rio Tinto (Alcan)

Contact : Stephen McIntosh

Activité existante : exploitation minière et traitement des matériaux

Marchés cibles : minerai de fer mondial, aluminium, cuivre, diamants, oxyde de titane, rutile, zircon, borates, matières fissiles.

Opportunité de produits ou de services : Métrologie pour l'extraction et le raffinage ; perfectionnement de la simulation de processus en temps réel. Capital et investissements utilisés pour activités existante, partenaires existants et / ou startups écologie (atténuation des risques).

Intact Assurance

Contact : Christian Menkens

Activité existante : Assurances autres que la vie

Marchés cibles : Assurance des particuliers et des spécialités Canada et États-Unis

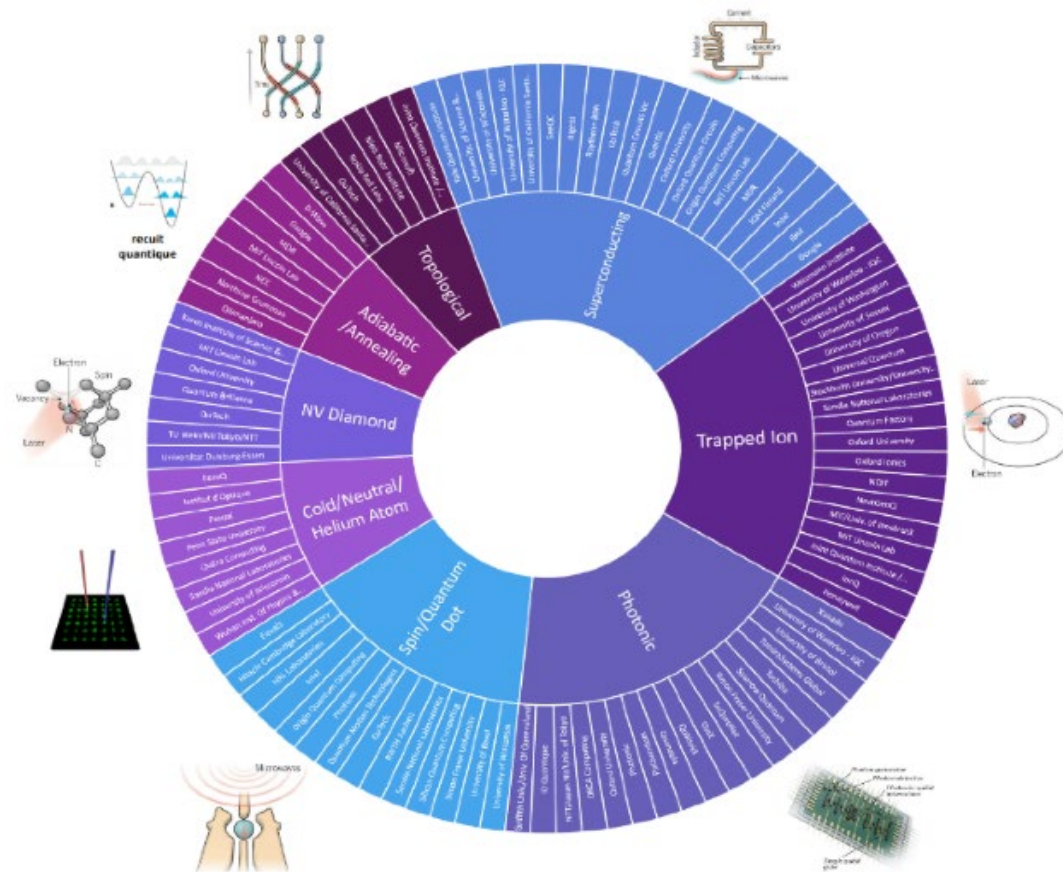
Opportunité de services : outils et algorithmes d'acquisition pour une meilleure évaluation personnelle du risque et des objectifs des offres d'intégration

Investissements utilisés pour de nouvelles activités, startups (pour atténuer le risque interne)

Annexe 6 – Figures

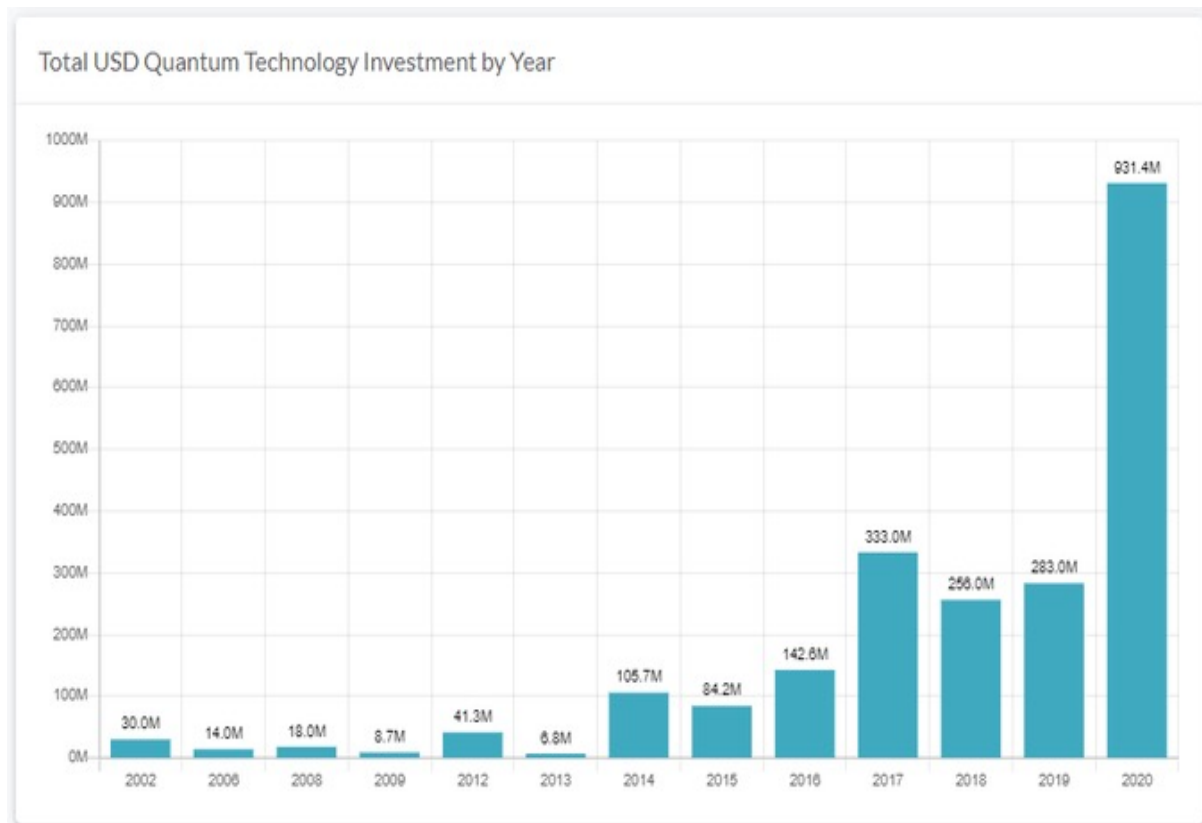
Les figures et tableaux présentés dans la présente annexe sont un support visuel pour soutenir à la compréhension du texte principal.

Annexe 6.1 – Écosystème d'innovation industriel global en quantique



Source : Michel Kurek, Quantum Technologies - Patents, Publications & Investments, en octobre 2020, en partenariat avec le Lab Quantique

Annexe 6.3 – Investissements mondiaux dans le quantique (US\$)



Source : Quantum Insider

Annexe 6.4 - Indicateurs de maturité

Development of innovation ecosystems

Stages of maturity

	Seeding emergence		Scaling local capability	Developing a global hub
	Seeding	Emerging	Scaling	Maturing
Leadership	Restricted – ecosystem participants are pursuing individual priorities	Uncoordinated – the vision for the innovation ecosystem is inconsistent among participants and efforts to expand the local community are unaligned	Focused – ecosystem participants are actively engaged in activities that contribute towards a shared vision	Determined – ecosystem participants are focused on achieving a shared vision and inspire engagement by new participants
Culture	Narrow – diversity among ecosystem participants is limited and unrepresentative of the wider community	Early – diversity is valued, but not yet lived. There exists a growing interest in experimentation and seeking out new ways of operating	Diverse – diversity is a common characteristic of ecosystem participants and success is readily shared by all people	Defined – diversity is a defining characteristic of the innovation ecosystem, with participants highly representative of the local community
Systems	Ad hoc – systems are ad hoc and are not consistently applied across actors and time frames	Organized – there exists a willingness to coordinate and manage existing systems and to provide consistency in application across actors and time frames	Interconnected – a high degree of flexibility is afforded to systems to facilitate new ways of operating and partnering with a diverse set of collaborators	Continuously improving – systems evolve to serve the changing needs of the ecosystem participants, redefining how organizations operate and collaborate with others

Source : World Economic Forum, Accelerating the Emergence and Development of Innovation Ecosystems through Procurement: A toolkit. White Paper, 26 pages, World Economic Forum, 2019

Annexe 6.5 – Problèmes types traités en calcul quantique

EXHIBIT 1 | Quantum-Advantaged Computational Problems

Type of problem



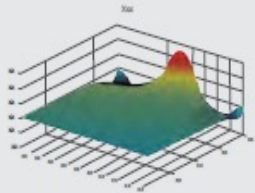
Combinatorial optimization

Useful for...

Minimizing or maximizing an objective function, such as finding the most efficient allocation of resources or the shortest total distance among a set of points (e.g., the traveling salesman problem)

Industry applications include...

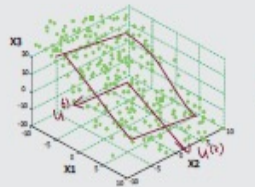
- Network optimization (e.g., for airlines, taxis)
- Supply chain and logistics optimization
- Portfolio optimization in financial services



Differential equations

Modeling the behavior of complex systems involving fundamental laws of physics (e.g., Navier Stokes for fluid dynamics and chemistry)

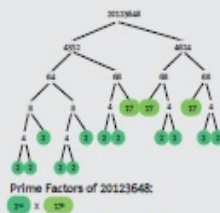
- Fluid dynamics simulations for automotive and aeronautical design and medical devices (e.g., blood flow analysis)
- Molecular simulation for specialty materials design and drug discovery



Linear algebra

Machine learning tasks involving matrix diagonalization, such as clustering, pattern matching, and principal components analysis, as well as support vector machines, which are ubiquitous in applications across industries

- Risk management in quantitative finance
- DNA sequence classification
- Marketing and customer segmentation



Factorization

Cryptography and computer security, where the most common protocols today (e.g., RSA) rely on the infeasibility (for classical computers) of factoring the product of two large prime numbers

- Decryption and code breaking (e.g., for governments)

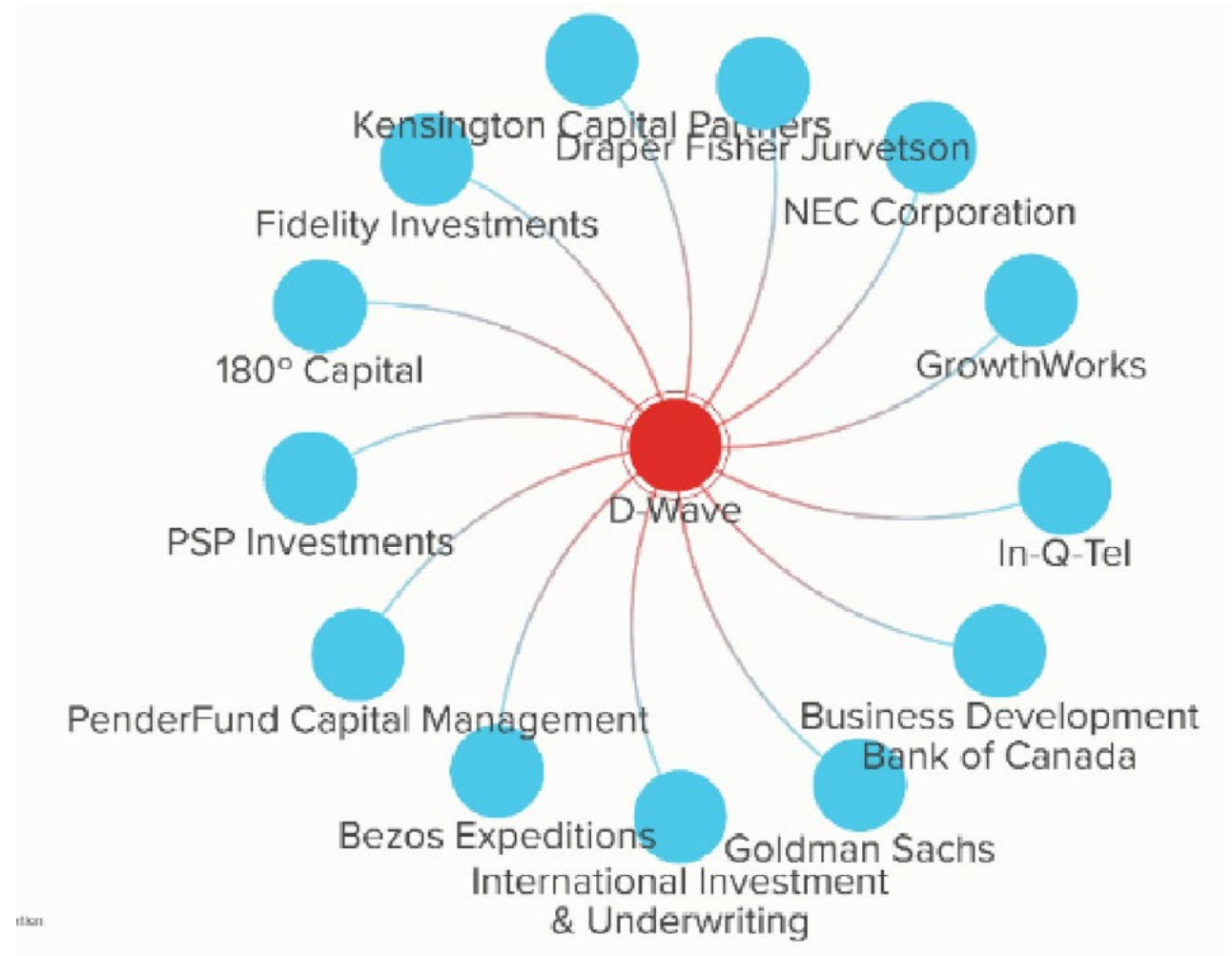
Source: BCG analysis.

Source : Boston Consulting Group, mai 2019

Annexe 6.6 – Financement de l'écosystème entrepreneurial en Quantique

1. Total de 220 startups dans la sphère quantique en Q1 2020, selon Quantum Report
2. D-Wave Systems : plus important financement à ce jour de toutes les startups
 - Pionnier du domaine de l'informatique quantique (fondé en 1999)
 - Basé à Burnaby (BC), Canada
 - Financé par différents fonds de capital-risque à hauteur de plus de 200M US\$, notamment par BDC Capital et PSP
 - Cf. Historique de financement... dans Crunchbase

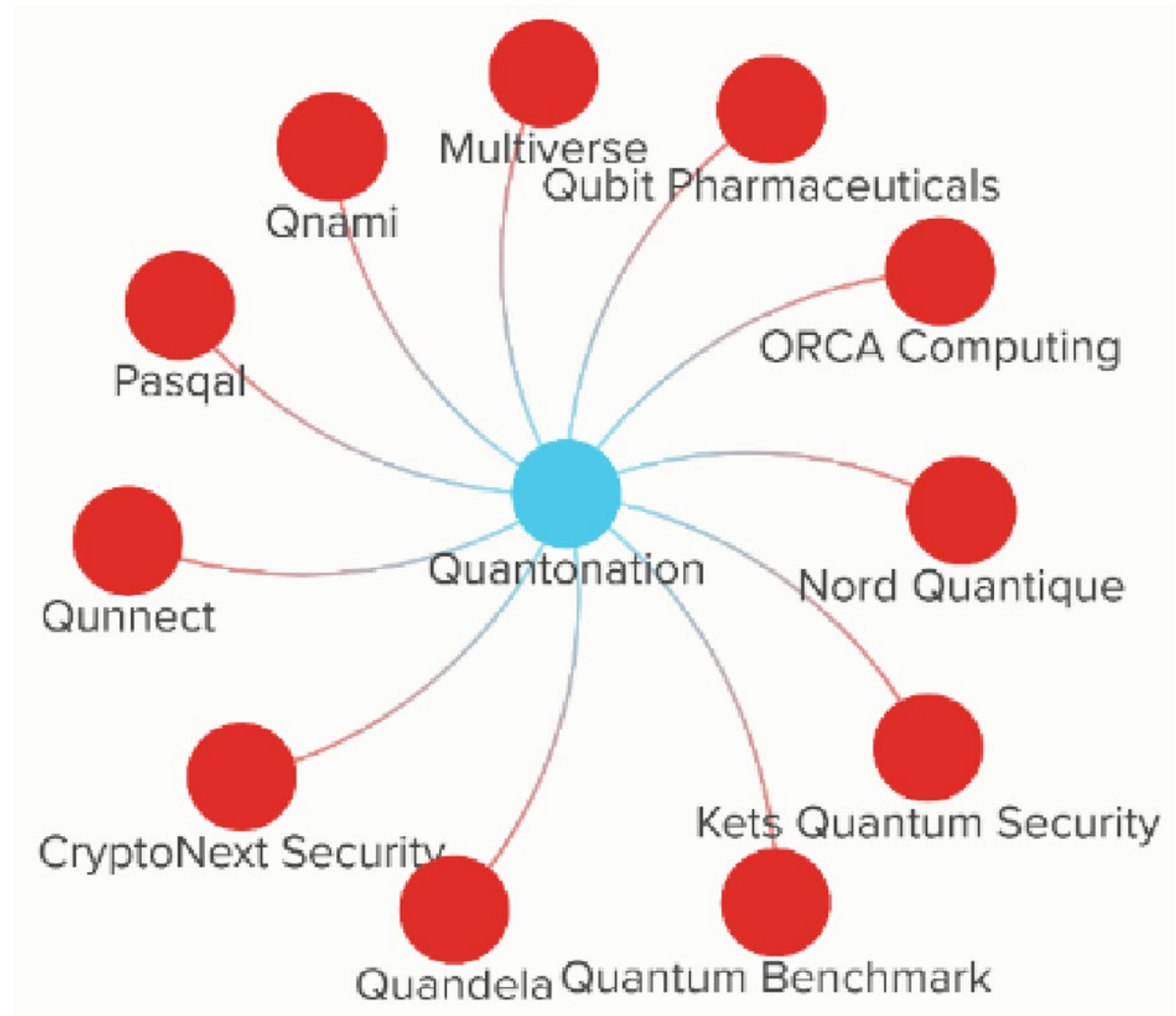
Sources : Rapport de Michel Kurek, 2020 et article du Globe & Mail <https://www.theglobeandmail.com/business/article-investors-sharply-cut-value-of-holdings-in-quantum-computer-maker-d/>



3. Quantonation

- Fonds de capital-risque Deep Tech fondé en Europe en 2016
- Un des rares investisseurs « pure play » en Technologies quantiques
- Actif au Canada, notamment via l'incubateur Creative Destruction Lab (CDL)
- Co-fondateur du think thank Lab Quantique
- Connait bien l'écosystème québécois des start-ups quantiques

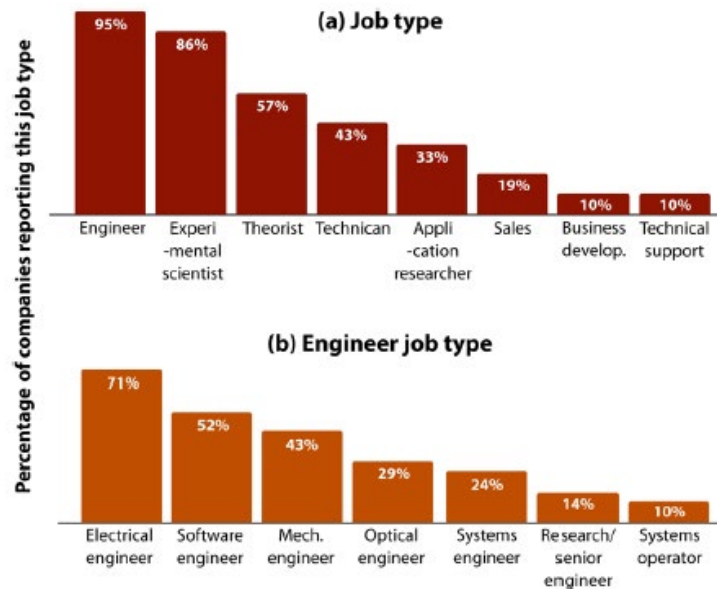
Source : Rapport de Michel Kurek, 2020



Annexe 6.7 – Formation et compétences

Rôle de la formation académique dans l'acquisition de compétences pour l'industrie quantique

PHYS. REV. PHYS. EDUC. RES. 16, 020131 (2020)



Source : Preparing for the quantum revolution: What is the role of higher education? APS Physics Review – Physics Education Research, October 2020

FIG. 2. Jobs within the quantum industry. (a) For all major job types. (b) For only job types identified as engineering. In both (a) and (b), each bar represents the percentage of the 21 companies interviewed that indicated they have employees in the types of jobs labeled. Jobs that were identified by only one company are not included in the analysis to avoid identification of that company.

Annexe 7 – Glossaire

Algorithmie / Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle quantique (QAI) est un domaine interdisciplinaire qui se concentre sur la création d'algorithmes quantiques pour améliorer les tâches de calcul au sein de l'intelligence artificielle, y compris des sous-domaines tels que l'apprentissage automatique afin d'obtenir des résultats impossibles avec des ordinateurs classiques. Les phénomènes de mécanique quantique, la superposition et l'intrication, permettent à l'informatique quantique d'effectuer des calculs beaucoup plus efficaces que les algorithmes d'IA classiques utilisés dans la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel et la robotique.¹⁰

Les services qui découlent du Big Data, de l'intelligence artificielle et d'autres applications utilisent la physique quantique pour explorer de nombreuses solutions de test possibles en même temps, puis confirment lentement la meilleure aux problèmes les plus complexes: repliement de protéines, séquestration du CO₂, production de catalyseurs bioinspirés, analyse financière, etc. La physique quantique est probabiliste, ce qui signifie que les résultats constituent une distribution prédite. Pour certains problèmes, où les résultats sont régis par des relations peu intuitives et surprenantes entre les différents facteurs d'entrée, les ordinateurs quantiques ont le potentiel de mieux prédire cette distribution, conduisant ainsi à une réponse plus correcte.^{11,12}

Les algorithmes IA seraient prometteurs pour contrôler les réseaux de capteurs où il y a un petit nombre de données mais qui requiert une interprétation soignée. Le Québec pourrait s'y intéresser compte tenu de son expertise en IA et en mathématique.

10. https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_artificial_intelligence

11. <https://qt.eu/discover-quantum/applications-of-qt/big-data-boosting-ai/>

12. <https://www.forbes.com/sites/tomtaulli/2020/08/14/quantum-computing-what-does-it-mean-for-ai-artificial-intelligence/?sh=134508033b4c>

Intelligence artificielle et données massives (« Big Data »):

On peut utiliser le calcul quantique pour exécuter des algorithmes de machine learning et même des réseaux de neurones. Toutefois, l'ordinateur quantique n'est pas adapté à un large volume de données en entrée/sortie mais à générer rapidement des solutions.

“Recent progress in AI is largely attributed to the rapid development of machine learning, especially in the algorithm and neural network models. However, it is the performance of the hardware, in particular the energy efficiency of a computing system that sets the fundamental limits of the capability of machine learning”

– Roadmap on emerging hardware & technology for machine learning, Oct’20

Capteurs, détection quantique et métrologie

Avec les communications quantiques, les capteurs quantiques seront parmi les premières applications du quantique. Ils fourniront des mesures plus précises et augmenteront considérablement les performances des appareils et services grand public, du diagnostic médical et de l'imagerie à la navigation de haute précision, en passant par les futures applications de l'Internet des objets. Les capteurs quantiques utilisent des technologies similaires à celles des ordinateurs et des réseaux quantiques: ils détectent les plus petites perturbations car ils sont basés, par exemple, sur des électrons uniques, les plus petites charges et aimants possibles. La métrologie quantique utilise des capteurs quantiques pour définir les normes pour, par exemple, le chronométrage ou les mesures électriques.¹³

Les capteurs quantiques incluent des dispositifs utilisés en navigation, prospection géologique, observation de la terre, interception, détection, sismographie, magnétométrie, science des matériaux, et multiples autres applications. Souvent limités à des marchés spécialisés étant donné leur complexité et des environnements extrêmes, l'intégration des futurs capteurs dans des systèmes viables dans des marchés civils, ouvriront la porte à une viabilité industrielle à long terme pour des technologies de prochaine génération de senseurs inertiels, de capteurs magnétiques, d'horloges atomiques, etc. et leur intégration dans systèmes embarqués.¹⁴

13. <https://qt.eu/discover-quantum/introduction-to-quantum-physics/>

14. https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/01/dossier_de_presse_quantique_vfinale.pdf

Communications / interconnexions quantiques

La communication quantique contribuera à protéger les quantités croissantes de données des citoyens transmises numériquement, par exemple les dossiers de santé et les transactions financières. Une mise en œuvre typique de réseaux quantiques utilise des photons uniques. Si quelque chose intercepte un seul photon, cela sera remarqué, ce qui signifie qu'avec la technologie quantique, nous pouvons obtenir la forme de communication la plus sécurisée connue, impossible à intercepter sans détection. C'est déjà sur le marché aujourd'hui pour les communications point à point et est en développement pour l'Internet quantique.

En permettant la distribution d'états intriqués, les communications quantiques peuvent avoir plusieurs applications prometteuses inaccessibles avec les technologies actuelles : interférométrie à longue distance, référence de temps pour la synchronisation d'horloges atomiques, mise en réseau d'ordinateurs quantiques, distribution quantique de clés, etc. La mise en réseau de capteurs quantiques pour l'interférométrie à très longue distance et la distribution de temps ultra précise intéressera, par exemple, à la fois les scientifiques, les financiers, les fournisseurs d'énergie, etc. L'accès distant aux ordinateurs quantiques et le partage de calcul entre plusieurs ordinateurs quantiques permet d'associer plusieurs processeurs afin d'accroître leurs capacités de façon exponentielle, ainsi que de permettre de localiser ces machines dans des centres de calculs distants des utilisateurs.¹⁴

L'utilisation pratique des communications quantiques reposera sur la capacité à développer des composants photoniques quantiques pouvant s'intégrer dans les infrastructures de communications existantes sans nécessiter de déploiements spécifiques, ce qui constituera un axe majeur pour orienter les activités dans ce domaine. En outre, elles aboutiront à l'expérimentation et à l'évaluation du déploiement de composants photoniques quantiques dans des prototypes de réseaux de communication fibrée existants, mettant l'accent sur les aspects qui relèvent du triptyque débit, distance des liens établis, critères de sécurité et aussi le test et l'optimisation des nouveaux composants et protocoles de communications en conditions réelles.

En raison de leur relative jeunesse, les communications quantiques n'ont pas été intensivement évaluées sur le plan de la cybersécurité, contrairement aux communications classiques. Si théoriquement les communications quantiques sont invulnérables aux attaques sur la base des lois de la physique, les réalisations pratiques introduisent des vulnérabilités potentiellement exploitables par un attaquant.

L'intrication est la ressource essentielle de presque toutes les technologies quantiques, mais elle est très fragile, ce qui rend difficile sa création et son maintien sur de longues périodes et sur de grandes distances. **Ainsi, les interconnexions quantiques sont un des principaux défis de la révolution quantique.** Ces dispositifs ou processus permettent le transfert d'états quantiques entre deux degrés de liberté physiques spécifiés (matériel, électromagnétique, etc.), soit, plus largement, ce qui relie un système quantique à un système classique. Au centre d'un réseau de divers systèmes d'information quantique, se trouve un commutateur quantique, un dispositif qui peut acheminer des signaux optiques entre différents canaux tout en maintenant la cohérence quantique et l'intrication. Les interconnexions font partie intégrante de presque tous systèmes quantiques, y compris l'informatique quantique, la détection quantique et la communication quantique.

La capacité de transmettre des informations en toute sécurité de manière à ce qu'elles soient à l'épreuve du futur même contre les ordinateurs quantiques les plus puissants, est d'une grande importance nationale. Cependant, la portée des réseaux quantiques sécurisés à base de fibres optiques et les débits de communication qu'ils permettent actuellement sont sévèrement limités par les pertes optiques dans les interconnexions quantiques existantes. L'amélioration de ces interconnexions avec des répéteurs quantiques étendra la portée et le débit des systèmes de communication quantiques.

La mise en œuvre de ces interconnexions pose d'importants obstacles techniques: ils doivent transférer les états quantiques avec une haute-fidélité, à des débits rapides et avec de faibles pertes, souvent sur une large gamme d'énergies, et ce de manière évolutive. Des efforts d'ingénierie importants sont nécessaires pour leurs mises en œuvre et, dans certains cas, de nouveaux phénomènes physiques devront être explorés. L'accélération de la recherche en vue de l'invention et de leur utilisation stimulera considérablement le développement de matériaux, de dispositifs, de systèmes et d'infrastructures de support.¹⁵

CPU vs. GPU vs. TPU vs. SoC vs. QPU

CPU: Central Processing Unit, GPU: Graphical Processing Unit, et QPU Unit: Quantum Processing. Les GPU, TPU, SoC et QPU peuvent être utilisés comme coprocesseurs dans des architectures de calcul hybrides

TPU : Tensor Processing Unit -> AI accelerator application-specific integrated circuit (ASIC) developed by Google specifically for neural network machine learning,

SoC: System on a chip

15. <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.2.017002>

Cryptographie post-quantique

L'ordinateur quantique sera capable de déchiffrer, éventuellement rétro-activement, des données protégées par des algorithmes à clé publique actuels. Il est ainsi recommandé de garantir la confidentialité et l'intégrité des systèmes d'informations et des communications dès maintenant en développant et utilisant des algorithmes post-quantiques, résistant à une cryptanalyse quantique.

Deeptech : Technologies profondes, de haute technologie, technologies de rupture

Le Deep Tech représente une innovation de rupture portant sur des solutions techniques qui impacte profondément les marchés et les procédés industriels. Il regroupe les entreprises développant des solutions scientifiques et technologiques de pointe, issue le plus souvent d'un laboratoire de recherche nécessitant un délai de mise sur le marché long et des besoins en capitaux importants.

Domaines d'application

Mots clés utilisés lors des recherches dans la littérature :

1. Informatique de calcul – Voir Informatique quantique plus bas :

Calcul quantique, informatique quantique, dispositifs, processeurs, équipement NISQ architectures hybrides, ordinateur quantique, ordinateur quantique à portes logiques, ordinateur adiabatique, programmation quantique, bit quantiques (ou qubit), langage de programmation quantique, algorithmes quantiques, correction d'erreurs, classe de problèmes/complexité, simulation quantique, simulateurs quantiques.

2. Communications quantiques : Réseau quantique, communications sécurisées, cryptographie quantique et post-quantique, génération de nombres aléatoires (QRNG), distribution quantique de clés (QKD)

3. Capteurs quantiques et métrologie : Capteurs et senseurs quantiques, imagerie quantique, horloges atomiques, réseaux de capteurs

4. Matériaux quantiques : Systèmes quantiques, Qubit, processeur quantique, atomes artificiels

Informatique quantique

L'ordinateur quantique promet une énorme capacité de stockage et de traitement d'informations, capacité provient de la superposition enchevêtrée quantique de systèmes quantiques individuels. Il peut exploiter les mathématiques inhabituelles régissant le monde quantique pour surpasser les ordinateurs classiques sur certaines tâches. Alors que les ordinateurs classiques effectuent des calculs à l'aide de bits, qui peuvent avoir l'un des deux états (1 ou 0), les bits quantiques, ou qubits, peuvent exister dans de nombreux états simultanément. Cela leur permet de résoudre les problèmes plus rapidement que les ordinateurs classiques. Mais alors que les théories prédisant que l'informatique quantique battrait l'informatique classique existent depuis des décennies, la construction d'ordinateurs quantiques pratiques s'est avérée beaucoup plus difficile. Toutefois, une équipe de scientifiques chinois vient de développer l'ordinateur quantique le plus puissant au monde, capable d'effectuer au moins une tâche 100 milliards de fois plus vite que les supercalculateurs les plus rapides du monde.¹⁶ Deux défis critiques doivent être surmontés pour faire aboutir les ordinateurs quantiques.

Premier défi : La grande quantité d'informations contenues dans des systèmes quantiques massivement intriqués n'est pas directement accessible, en raison de la réduction des superpositions quantiques lors de la prise de mesure. Au lieu de cela, des algorithmes informatiques quantiques traitent un état quantique selon une forme beaucoup plus simple pour produire un certain type d'informations pouvant être mesurées directement. Cependant, la gamme complète des applications qui peuvent exploiter les superpositions intriquées de cette façon et la manière exacte dont les ordinateurs quantiques seront utilisés à l'avenir demeurent encore à identifier.

Second défi 2 : Les ordinateurs quantiques sont très difficiles à construire, nécessitant un degré d'isolation extrême d'un grand nombre de qubits individuels, tout en permettant un contrôle précis de leurs états quantiques ainsi que la réalisation de mesures de haute précision. La technologie informatique quantique n'a rien à voir avec le matériel informatique classique et implique du traitement informatique non conventionnel dans des environnements difficiles comme un vide extrême ou une température très basse. Éventuellement, les ordinateurs quantiques à grande échelle utiliseront des techniques de correction d'erreur beaucoup plus complexes que leurs homologues classiques.¹⁷

16. <https://www.livescience.com/china-quantum-supremacy.html>

17. <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.2.017001>

IoT/IdO: Internet of things / Internet des objets

Selon l'Union internationale des télécommunications, l'Internet des objets est une « infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution. Cette définition recoupe des dimensions d'ordres conceptuel et technique.¹⁸

Lab-on-a-chip:

Dispositif qui intègre une ou plusieurs fonctions de laboratoire sur un même circuit intégré (communément appelé une puce ou un « chip »).

Maturité technologique

Fait généralement référence à la maturité technologique d'un produit ou d'un procédé selon l'échelle TRL 1-9 (**Technology Readiness Level**) développée par la NASA

Maturité d'un écosystème d'innovation

La maturité de l'écosystème d'innovation d'un pays a été étudiée par de nombreux organismes de développement économique. Le Forum économique Mondial a publié récemment un document qui met en lumière le rôle clé joué par les politiques publiques d'approvisionnement: **Accelerating the Emergence and Development of Innovation Ecosystems through Procurement : A toolkit**.¹⁹ - Voir l'annexe 6.4.

Numérique / TIC

Le monde numérique, c'est tout ce qui s'informatise et qui communique. Alors que l'informatique peut représenter différentes ressources matérielles et logicielles, le numérique rassemble les outils et l'exploitation de ces données et correspond à leur utilisation pour créer des applications. Les technologies de l'informations et des communications (TIC) sommes devenues un atout au service de tous. Les TICs ont donné naissance à l'Internet, aux bases de données, aux réseaux, au partage des informations et à bien d'autres choses qui composent le numérique.

Ordinateur quantique

Le développement d'ordinateurs quantiques capables de passer à l'échelle ou « LSQ » (Large Scale Quantum) vise à rendre possible des calculs et modélisations d'une complexité supérieure de plusieurs ordres de grandeur à ce qui peut être traité avec les supercalculateurs traditionnels.

18. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-internet-objets-15158/>

19. White Paper, 26 pages, World Economic Forum, 2019.

Les ordinateurs quantiques mettront à disposition une énorme puissance de calcul pour résoudre certaines classes de problèmes. Ils sont construits à partir de « bits quantiques » (atomes individuels, ions, photons ou circuits électroniques quantiques) et exploitent la superposition et l'intrication, pour résoudre des problèmes que nous ne pourrions jamais résoudre autrement. Cela inclut le traitement de grandes quantités de données plus rapidement que jamais pour rechercher des bases de données, résoudre des équations et reconnaître des modèles. Ils peuvent même avoir le potentiel de former des systèmes d'intelligence artificielle, par ex. pour les assistants numériques qui aident les médecins à diagnostiquer les maladies et à proposer la thérapie la plus prometteuse, ou à optimiser les itinéraires de toutes les voitures d'une ville simultanément pour éviter les embouteillages et réduire les émissions.²⁰

Patent Pool

Un pool de brevet se définit comme une entente de licences concédée pour un ou plusieurs de leurs brevets entre eux ou à des tiers. Souvent, les pools de brevets sont associés à des technologies complexes qui nécessitent des brevets complémentaires afin de fournir des solutions techniques efficaces. En général, ces pools de brevets couvrent des technologies matures. Les pools représentent aussi fréquemment la base des normes de l'industrie qui fournissent aux entreprises les technologies nécessaires pour développer des produits et services compatibles.

20. <https://qt.eu/discover-quantum/introduction-to-quantum-physics/>

Dans ce cas, ils concernent plutôt des technologies qui ne sont pas encore pleinement développées.²¹

Quantum 1.0 & 2.0 / Quantique 1.0 et 2.0

Voir description à l'annexe 1

Simulateurs quantiques

Les simulateurs quantiques sont étroitement liés aux ordinateurs quantiques. Ils seront essentiels à la conception de nouveaux produits chimiques, des médicaments aux engrais pour la médecine et l'agriculture futures, et de nouveaux matériaux, tels que les supraconducteurs à haute température pour une distribution d'énergie sans pertes. Parfois, ils sont des ordinateurs quantiques spécialisés pour comprendre des systèmes qui seraient encore plus difficiles à expérimenter.²²

Depuis quelques années, les simulateurs et calculateurs « NISQ » (Noisy Intermediate Scale Quantum) exploitables commercialement sont devenues une réalité en attendant l'ordinateur quantique « LSQ » (Large Scale Quantum) capable de passer à l'échelle. Ces machines constituent, dès aujourd'hui, des outils d'apprentissage du calcul quantique.

21. https://www.wipo.int/export/sites/www/ip-competition/en/studies/patent_pools_report.pdf

22. <https://qt.eu/discover-quantum/introduction-to-quantum-physics/>

Le raccourcissement des temps de calcul d'un facteur du milliard constitue une rupture dont le retentissement est à peine concevable aujourd'hui. L'industrie bénéficiera d'outils de simulation et d'optimisation aux capacités encore inconnues, avec des impacts sociétaux décisifs, notamment en matière de santé, environnement ou énergie. Ces systèmes ont le potentiel de combler un vide critique entre les supercalculateurs conventionnels - qui ne peuvent pas simuler efficacement les systèmes quantiques à plusieurs particules - et les ordinateurs quantiques numériques évolutifs tolérants aux pannes, qui pourraient être disponibles que dans des décennies.²³

Technologies post-Moore

Dans le contexte de la fin de la Loi de Moore qui repose sur la technologie CMOS et l'architecture de Von Neumann, plusieurs technologies hardware, dont l'ordinateur quantique obéissant à des paradigmes de calcul non conventionnels, sont considérés des candidats potentiels de l'ère post-exascale et « Beyond CMOS ».

Technology push vs. Market pull vs. Market push

Technology push : Vision du processus d'innovation où on impose une technologie

Market pull : Typiquement, acteur industriel faisant de la veille technologique pour être en mesure d'imaginer gain de fonctionnalité ou de performance sur des produits existants

Market push : Approche « Et si c'était possible ? ». Un exemple récent est l'investisseur **Flagship Pioneering** et sa 'spinoff' Moderna dédiée au développement d'une plateforme dédiée aux thérapies basées sur l'ARN messenger. Le fonds a identifié les besoins du marché, les défis à vaincre, validé auprès de scientifiques et d'ingénieurs la faisabilité, développé la preuve de concept, puis elle a créé et financé la startup Moderna.

Transduction

Capacité d'échanger des informations quantiques entre différents systèmes physiques.

23. <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.2.017003>

Pour découvrir toutes nos études

numana.tech