



Diriger la notoriété industrielle
et universitaire du Canada vers
une stratégie quantique nationale





Introduction

L'informatique quantique est la première stratégie informatique fondamentalement nouvelle depuis des décennies. Tandis que la première révolution quantique a donné à l'humanité de nouvelles connaissances à l'égard des règles qui régissent le monde physique, la deuxième révolution quantique applique ces règles afin de développer de nouvelles technologies qui, selon l'industrie, feront disparaître la puissance de traitement des superordinateurs même les plus puissants. À plus court terme, l'optimisme est grand à l'idée que l'informatique hybride classique/quantique offrira une valeur réelle aux entreprises et à la société à grande échelle.

Dans le budget 2021, le Canada a engagé 360 millions de dollars pour lancer une stratégie quantique nationale permettant d'atteindre trois objectifs globaux : amplifier l'importante force du Canada dans la recherche quantique; développer les technologies, sociétés et talents nationaux prêts pour le quantique; solidifier le leadership mondial du Canada dans ce domaine¹.

Le Canada est actuellement l'une des premières nations au monde dans la recherche quantique, elle se classe 5^e pour les dépenses totales du G7 liées à la science quantique et 1^{re} par habitant². Cependant, puisque la technologie quantique s'approche du point décisif de fournir une valeur commerciale réelle, la concurrence mondiale s'intensifie pour miser sur ce secteur en plein essor.

Afin de garantir que la stratégie quantique nationale donne des résultats prospères, la collaboration entre tous les intervenants doit être renouvelée – gouvernement, industrie et universités – au sein de l'écosystème de la science de l'information quantique canadienne. Il est fondamentalement important que le Canada concentre ces efforts sur des résultats tangibles à court et à moyen terme, ainsi que sur une viabilité et une santé de la recherche à long terme. Ce faisant, les intervenants veilleront à ce que l'industrie canadienne soit apte et habilitée à soutenir la concurrence en cette nouvelle ère quantique et à exploiter notre leadership universitaire dans ce domaine en pleine émergence.

Cet article traite de l'opportunité économique de l'informatique quantique et présente des orientations sur la manière dont le Canada peut se positionner en tant que chef de file mondial dans cette technologie. Les auteurs n'ont pas l'intention de fournir une présentation exhaustive des programmes, de la formation ou du financement sur l'informatique quantique disponibles. Le document vise plutôt à susciter une discussion sur la meilleure voie à suivre pour le Canada dans l'industrie de l'informatique quantique.

Informatique quantique 101

« *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 2021

Tous les systèmes informatiques dépendent d’une capacité fondamentale de stocker et de manipuler l’information. Les ordinateurs classiques d’aujourd’hui manipulent des octets individuels et stockent les données binaires (0 et 1). Des millions d’octets travaillent ensemble pour traiter et afficher les données à une vitesse connue sur les téléphones intelligents, les ordinateurs portatifs et les serveurs dans le nuage.

En revanche, les ordinateurs quantiques puisent dans le phénomène de la mécanique quantique pour manipuler l’information. Pour ce faire, ils dépendent des octets quantiques, ou « qubits ». Contrairement à un octet qui doit être représenté par 0 ou 1, un qubit peut être une combinaison d’états. En appliquant les principes de la superposition quantique, de l’intrication et de l’interférence, un nombre exponentiellement élevé d’états peut être exploré à mesure que le nombre de qubits augmente. Au fur et à mesure que la technologie s’améliore et que le nombre de qubits augmente, nous atteindrons l’avantage quantique, le point où certaines tâches de traitement de l’information peuvent être exécutées plus efficacement ou de manière plus rentable sur un ordinateur quantique, par rapport à un ordinateur classique, seul.

Les ordinateurs quantiques ne remplacent pas les systèmes informatiques classiques. Ils complètent les systèmes classiques en promettant de résoudre les problèmes intraitables qui sont trop coûteux en temps ou impossibles à résoudre avec un ordinateur classique. L’évolution de l’informatique quantique créera sans aucun doute de nouvelles opportunités dans la découverte scientifique et perturbera des domaines de technologie critiques comme la cybersécurité et le chiffrement³. En fait, cette disruption est la raison pour laquelle l’industrie a mis en œuvre aujourd’hui des schémas de cryptographie « sécuritaires ». Pour atténuer ces risques, IBM a développé un agenda stratégique clair qui inclut la recherche, le développement et la standardisation des algorithmes de cryptographie à sécurité quantique de base comme outils à code source ouvert. Dans les années à venir, ces outils seront normalisés pour protéger contre l’exposition au chiffrement créée par l’informatique quantique.

Les ordinateurs quantiques ne sont pas tous créés égaux, et ne résolvent pas tous les mêmes catégories de problèmes. Le but ultime est un ordinateur quantique universel entièrement insensible aux défaillances, qui peut traiter des catégories importantes de problèmes scientifiques et d’entreprise considérablement plus rapidement qu’un ordinateur classique.

Aujourd’hui, les sociétés comme IBM développent des systèmes informatiques qui, bien que bruyants, sont des étapes sur le chemin vers l’informatique quantique universelle insensible aux défaillances⁴.

En 2023, IBM prévoit démontrer une nouvelle génération de systèmes quantiques qui ouvriront un chemin clair vers l’avantage quantique – lorsque les ordinateurs quantiques qui travaillent en étroite collaboration avec des ordinateurs classiques pourront résoudre des problèmes mieux que n’importe quel système classique seul.



Quantique : Impact économique pour le Canada et le monde

La découverte est un élément moteur de la prospérité scientifique, commerciale et économique. L'informatique haute performance, l'intelligence artificielle, le nuage hybride et, bientôt, l'informatique quantique, accéléreront la découverte scientifique et commerciale alors que l'expertise dans ces technologies cultivera la main-d'œuvre de l'avenir.

Lorsqu'elle est combinée avec d'autres technologies émergentes, l'informatique quantique a le potentiel d'accélérer la découverte de nouvelles œuvres qui répondront à des difficultés mondiales importantes. En particulier, la technologie peut être utilisée pour réinventer le processus de conception d'œuvres afin de trouver des solutions aux défis comme encourager la bonne santé et l'énergie propre, de même que renforcer la durabilité, l'action climatique et la production responsable.

Les nouvelles œuvres ou l'usage de livres existants contribueront probablement à résoudre des difficultés comme piéger le dioxyde de carbone de l'atmosphère surchargé et le stocker de manière sûre; atténuer les changements climatiques; trouver des manières plus durables de cultiver pour nourrir des populations croissantes tout en réduisant les émissions de carbone; repenser les batteries et le stockage énergétique; développer des appareils électroniques plus durables et de meilleurs antiviraux⁵.

Dans une analyse économique de 2017 effectuée pour le Conseil national de recherches Canada, il a été estimé que d'ici 2030, le secteur national des technologies quantiques pourrait valoir 8,2 milliards de dollars et employer 16 000 personnes. D'ici 2040, période au cours de laquelle on s'attend à ce que le taux d'adoption des technologies quantiques atteigne 50 %, il a été estimé que l'informatique quantique pourrait atteindre une valeur de 142,4 milliards de dollars, et créer 229 000 emplois⁶.

À ce jour, le gouvernement fédéral a investi plus de 1 milliard de dollars dans la recherche et le développement (R et D) de l'informatique quantique, alors que des provinces comme le Québec, l'Ontario, la Colombie-Britannique et l'Alberta ont fait des investissements précoces dans les organismes de recherche quantique pendant que la technologie progresse vers l'application. Il est à noter que des programmes de R et D quantiques d'une valeur de 1 milliard de dollars ont également été annoncés par les États-Unis, la Chine, l'Union européenne et l'Inde⁷.

Bien que le secteur de l'informatique quantique en soit à ses balbutiements, aucun prédictor ne peut modéliser l'incidence économique totale de la capacité, du leadership et des compétences industriels et universitaires du Canada dans les technologies quantiques. Cependant, ces secteurs sont bien représentés au Canada et il est raisonnable de croire que l'investissement dans l'informatique quantique aura des répercussions économiques importantes.

Les étapes du Canada vers le succès quantique

Dans le budget 2021, le gouvernement fédéral a noté qu'une stratégie quantique nationale sera conçue afin d'amplifier l'importante force du Canada dans la recherche quantique, de développer les technologies, les sociétés et les talents nationaux prêts pour le quantique, et de solidifier le leadership mondial du Canada dans ce domaine.

Une analyse mondiale récente indique que quatre mesures politiques sont généralement déployées dans le cadre des stratégies quantiques nationales :

- établissement de centres d'excellence ou de centres d'innovation;
- exécution d'appels d'offres ou de compétition ciblés;
- financement direct de projets spéciaux d'importance nationale;
- apport d'un investissement ou d'un capital de risque au gouvernement pour les entreprises en démarrage⁸.

Le Canada a laissé sa marque en déployant certaines de ces mesures politiques de manière précoce, malgré l'absence historique d'une stratégie quantique nationale coordonnée. Un récent rapport de l'Institut canadien de recherches avancées (ICRA) a indiqué que 17 pays, dont les États-Unis, le Japon, l'Allemagne et le Royaume-Uni, proposent une certaine forme d'initiative ou de stratégie nationale pour soutenir la R et D quantique⁹. Trois autres pays, dont le Canada, proposent des stratégies qui en sont à des stades de développement variés.

« *La technologie quantique et l'intelligence artificielle sont des parties essentielles de notre plan gouvernemental de rendre notre économie post-pandémie plus forte que jamais.* »

– François-Philippe Champagne, ministre de l'Innovation, des Sciences et de l'Industrie, 11 mars 2021

Aux États-Unis, la mise en application de la *National Quantum Initiative Act* (2018) a été un moment marquant pour la science de l'information quantique et une reconnaissance évidente de l'importance critique de l'information quantique dans la sécurité et la prospérité de la plus grande économie au monde¹⁰.

Pour devenir rapidement un chef de file commercial en matière d'informatique quantique, il faut concentrer ses efforts sur six actions clés au cours des trois à cinq prochaines années. À court terme, le Canada doit se concentrer sur trois domaines :

1. Personnel hautement qualifié. — Le Canada doit attirer et conserver une masse critique de personnel formé et hautement qualifié dans le domaine de l'informatique quantique, notamment des étudiants étrangers, des scientifiques et des ingénieurs hautement qualifiés, grâce à une formation universitaire et au financement. Afin de promouvoir cet effort, les politiques d'immigration doivent être flexibles pour permettre l'arrivée massive de travailleurs compétents.

Les universités, guidées par des appels d'offres ou de compétition ciblés qui tirent profit du financement gouvernemental, doivent concevoir des opportunités de formation quantique qui tiennent compte des applications commerciales de technologie d'informatique quantique à court terme, afin de cultiver un écosystème de recherche qui fait appel à un vaste spectre de personnel hautement qualifié.

2. Expertise en informatique hybride. — Dans ce cas, nous définissons l'informatique hybride comme étant l'utilisation combinée d'approches d'informatique classique et quantique. Le Canada doit développer une expertise d'informatique hybride classique/quantique par laquelle des infrastructures d'informatique haute performance améliorées sont exploitées afin de faire la transition de la recherche et de l'industrie vers des applications quantiques, alors que ces capacités augmentent.

Des percées continues dans l'informatique haute performance aident déjà à accélérer la découverte, alors que la pandémie de COVID-19 a fait la lumière sur l'importance de la découverte scientifique pour la conception de nouveaux médicaments, vaccins et produits pharmaceutiques. L'informatique haute performance, l'intelligence artificielle, l'informatique

quantique et les technologies relatives au nuage hybride convergent toutes pour accélérer la découverte scientifique et commerciale et cultiver la main-d'œuvre de l'avenir.

Parmi les exemples innovateurs de cette convergence technologique, mentionnons IBM Discovery Accelerator, à la clinique Cleveland, qui comprend l'installation d'un système IBM Quantum System One sur le campus principal du centre médical afin de permettre de nouvelles percées médicales et de donner accès à la technologie quantique pour les universités, les collèges et le gouvernement, axés particulièrement sur la création d'une main-d'œuvre future en informatique quantique¹¹. Ce modèle peut être reproduit au Canada avec les bons partenariats, apportant un avantage mutuel.

3. Collaboration. — Le milieu universitaire a un rôle unique à jouer pour éduquer la nouvelle génération de scientifiques et de citoyens. Cependant, ces institutions doivent développer des partenariats d'enseignement innovateurs parmi les disciplines disparates dans les universités, entre les universités et l'industrie et entre les universités et les laboratoires du gouvernement afin de créer un programme d'études flexible et des programmes de formation quantiques éducatifs et pertinents pour l'industrie. En bâtissant des collaborations quantiques

pratiques entre les entreprises technologiques chefs de file du secteur privé, les universités et les laboratoires gouvernementaux, nous pouvons créer des écosystèmes de R et D durables reposant sur une orientation vers la recherche commerciale et l'application à court terme. Des organismes provinciaux financés par le gouvernement ont été établis au cours des quelques dernières années avec l'intention de permettre des partenariats entre l'industrie et les universités pour l'informatique quantique. Parmi les exemples précoces de ces collaborations figurent la Quantum Algorithms Institute (QAI)¹² en Colombie-Britannique et l'Institut quantique¹³ à l'Université de Sherbrooke, au Québec, où le réseau quantique IBM a récemment établi son premier centre quantique au Canada afin de mobiliser les partenaires de l'industrie et de la recherche. Il ne manque pas d'occasions dans cet écosystème pour le gouvernement fédéral d'agir davantage comme un optimiseur en R et D quantique pour améliorer l'application commerciale.

L'éducation quantique de base doit également être intégrée dans les programmes dès le secondaire et être conçue à l'aide de paramètres basés sur les compétences et reconnus par l'industrie pour être offerts à grande échelle au niveau postsecondaire, en partenariat avec l'industrie.



Dans une deuxième phase, la consolidation de la position de leadership du Canada dans la science de l'information quantique sera réalisée par :

- 4. La fabrication.** — Le Canada doit soutenir les technologies et la photonique qui optimisent la technologie quantique, y compris la fabrication nationale de matériel et de composants avancés, et ainsi sécuriser des maillons importants de la chaîne d'approvisionnement grâce à l'informatique hybride et quantique. De plus, la fabrication de ces composants matériels critiques pour la technologie quantique favorisera une meilleure collaboration internationale entre les alliés.

L'ICRA remarque que le renforcement de la chaîne d'approvisionnement pour les composants de la technologie quantique (comme les fibres et les satellites nécessaires pour un Internet quantique ou la fabrication de puces et l'infrastructure de la fabrication pour les ordinateurs quantiques) est un objectif de politique stratégique central pour son développement de l'informatique quantique¹⁴.

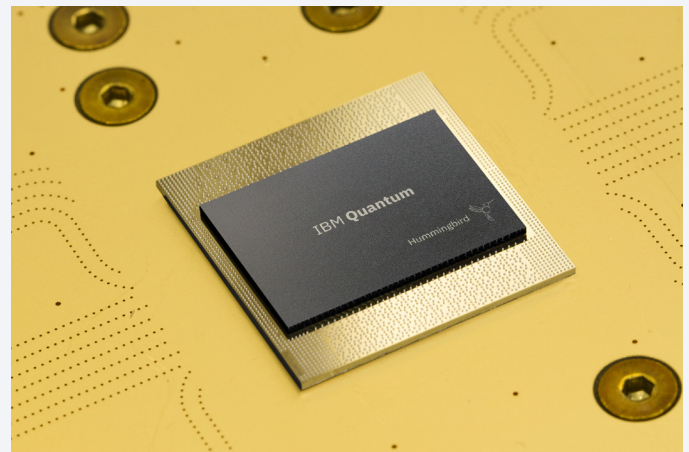
La stratégie quantique nationale du Canada doit être axée sur l'entretien de l'écosystème matériel existant et doit trouver des manières innovantes d'établir des partenariats à long terme avec des entreprises afin d'assurer que la fabrication nationale est encouragée.

- 5. L'hébergement.** — L'hébergement d'ordinateurs quantiques de classe mondiale dans des installations sécurisées en sol canadien apportera un accès élargi et dédié à des chercheurs universitaires et gouvernementaux et à l'industrie, et permettra aux entreprises quantiques en démarrage d'évoluer. Les premiers déploiements internationaux d'IBM de son Quantum System One dans des centres de données en Allemagne¹⁵ et au Japon¹⁶ sont des investissements importants qui soutiennent les stratégies quantiques de ces pays. En facilitant l'accès de l'informatique quantique dans des systèmes hébergés, le Canada pourrait renforcer son leadership dans les sciences quantiques, les entreprises et l'éducation, et tirer profit d'une position plus forte pour attirer et conserver des talents hautement qualifiés alors que la concurrence mondiale s'intensifie.

- 6. Un vaste écosystème de technologies optimisant l'informatique quantique.** — Le développement de logiciels et d'algorithmes quantiques, les intergiciels et les applications de secteurs spécifiques qui apportent un avantage concurrentiel prospéreront une fois que les fondations du paysage quantique seront en place. Un écosystème coordonné permettra la dissémination rapide des capacités d'informatique quantique dans l'ensemble des secteurs des écosystèmes et des partenariats pancanadiens.

Le développement des points 2 à 6 — en mettant l'accent sur un accès élargi à des ordinateurs quantiques de classe mondiale — créera une boucle de rétroaction qui amplifiera le développement de personnel hautement qualifié et créera des emplois canadiens de grande valeur à long terme et des opportunités de perfectionnement des compétences.

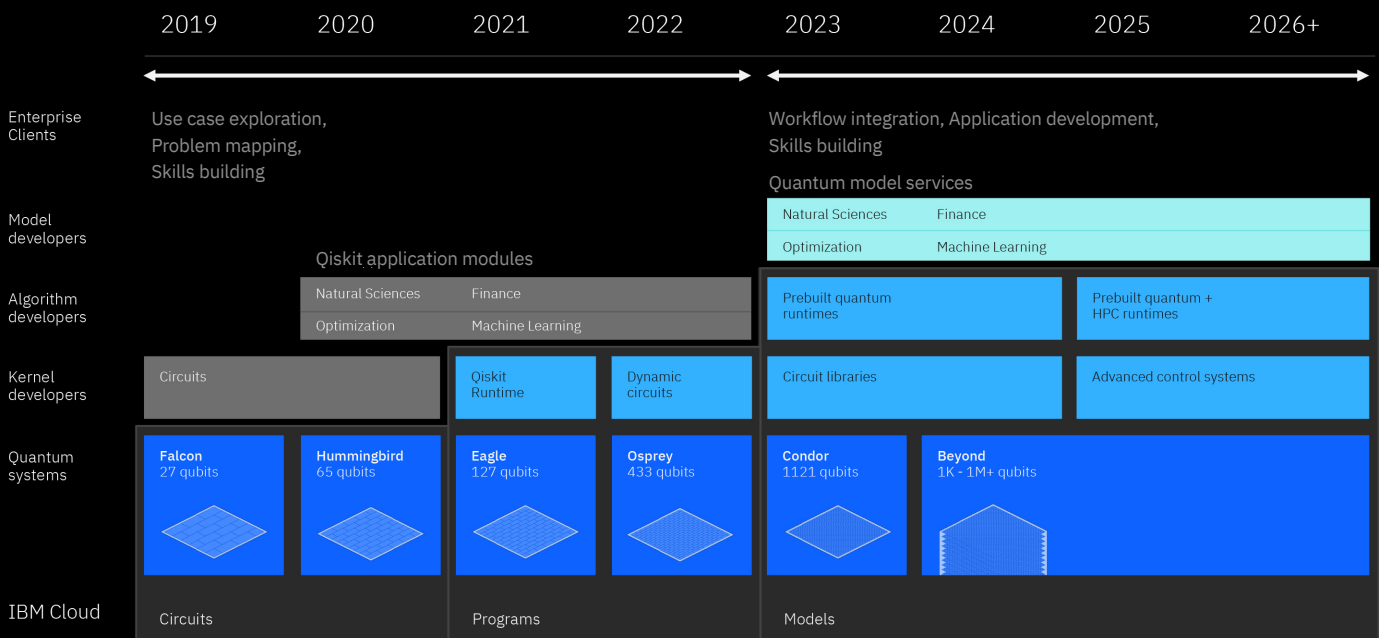
Bien qu'elles ne soient pas exhaustives, ces mesures aideront le Canada à optimiser sa capacité de former une main-d'œuvre prête à l'emploi à l'échelle nationale.



Comblers les lacunes des compétences numériques : Ressources complémentaires

Development Roadmap

IBM Quantum

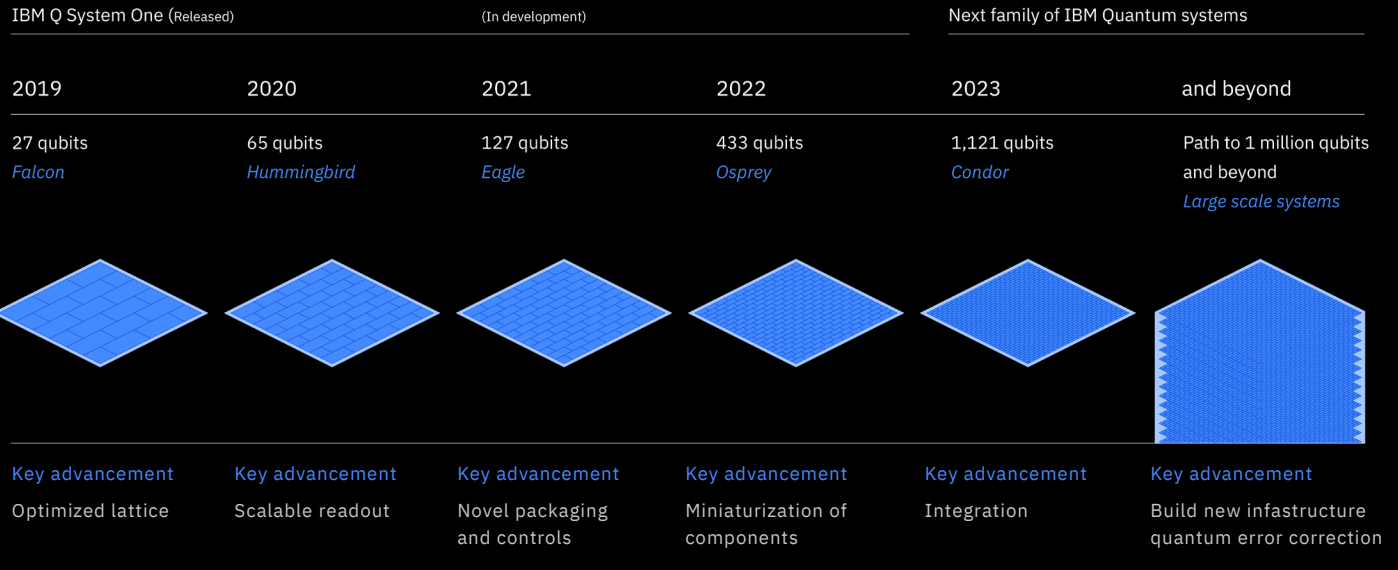


Feuille de route *Quantum Development Roadmap*.

L'accès au code source ouvert et son adoption permettront à un écosystème de développeurs, de scientifiques, d'enseignants et de professionnels dans divers secteurs d'activité d'être « prêts pour l'informatique quantique » pour cette nouvelle génération de l'informatique. Faire évoluer toute une communauté à l'aide de l'ensemble de compétences approprié est la clé pour faire progresser l'informatique quantique pour la science et les entreprises, et les pays qui choisissent d'investir et de se mobiliser tôt dans le processus en retireront un avantage concurrentiel. Une stratégie quantique nationale exigera également le développement d'une meilleure compréhension autour du déploiement, de la surveillance et de l'évaluation d'approches émergentes d'identification, du développement et de l'emploi des compétences numériques¹⁷.

Pour aider à réaliser cet effort mondial, IBM a été la première entreprise à mettre un ordinateur quantique dans le nuage en 2016. IBM Quantum Composer et le laboratoire quantique IBM¹⁸ ont depuis bâti une communauté active de plus de 325 000 utilisateurs qui ont exécuté des centaines de milliards de circuits (plus de 2 milliards par jour) sur du matériel informatique réel et des simulateurs, ce qui a mené à la publication de plus de 500 articles de recherche par des tiers. Pour appuyer ces efforts, une trousse de développement logiciel à code source ouvert appelé Qiskit¹⁹ permet aux programmeurs d'accélérer le développement d'applications quantiques en fournissant la trousse d'outils complète nécessaire pour interagir avec les systèmes et les simulateurs quantiques. Qiskit permet la recherche et le développement faciles pour des cas d'utilisation de l'industrie précis qui ont le plus grand potentiel d'avantage quantique. Qiskit a été téléchargé plus de 650 000 fois à ce jour.

Scaling IBM Quantum technology



Feuille de route *Quantum Development Roadmap*.

Afin d’offrir une orientation sur le développement quantique à tous les intervenants, IBM a également rendu publique la feuille de route *Quantum Development Roadmap*²⁰ qui pointe vers notre mission plus élargie : concevoir un ordinateur quantique à pile complète déployé dans le nuage, que n’importe qui dans le monde peut programmer.

Les ressources de formation de l’industrie comme celles énumérées ici permettent de meilleures compétences et une adoption plus facile des compétences quantiques dont le Canada a besoin pour alimenter l’économie de l’informatique quantique de demain.



Conclusion

Chaque élément de l'informatique quantique exige des compétences précises et offre des opportunités uniques pour les entreprises technologiques canadiennes en démarrage, les entreprises de l'ensemble des disciplines et les chercheurs avec les résultats qui touchent la société globalement.

Une stratégie quantique nationale canadienne doit permettre l'expansion rapide de la collaboration afin d'atteindre une masse critique de technologies quantiques et de favoriser les compétences « prêtes pour le quantique » qui donneront l'assurance que le Canada peut être concurrentiel à l'échelle mondiale. L'exploration d'applications pratiques et de futurs cas d'utilisation de l'informatique quantique exigent des partenariats cohésifs entre l'industrie, les universités et le gouvernement.

Alors que nous travaillons ensemble pour préparer la main-d'œuvre prête pour le quantique de demain, nous devons tous faire notre part pour permettre l'accès à cette technologie émergente et pour protéger le leadership quantique du Canada à l'échelle mondiale.

Notes et sources

1. <https://www.canada.ca/fr/ministere-finances/nouvelles/2021/04/budget-de-2021--batir-une-economie-de-linnovation-de-demain.html>
2. <https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/recherche-collaboration/programmes/incidence-economique-technologies-quantiques>
3. <https://cyber.gc.ca/fr/orientation/faire-face-la-menace-que-linformatique-quantique-fait-peser-sur-la-cryptographie>
4. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy>
5. <https://www.research.ibm.com/5-in-5/>
6. <https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/recherche-collaboration/programmes/incidence-economique-technologies-quantiques>
7. Inde : <https://dst.gov.in/budget-2020-announces-rs-8000-cr-national-mission-quantumtechnologies-applications>; Chine : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab4bea>; Union européenne : <https://ec.europa.eu/digital-singlemarket/en/policies/quantum-technologies-flagship>
8. <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/04/quantum-report-EN-10-accessible.pdf>
9. <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/04/quantum-report-EN-10-accessible.pdf>
10. https://science.osti.gov/-/media/_/pdf/about/pcast/202006/PCAST_June_2020_Report.pdf?la=en&hash=019A4F17C79FD5E5005C51D-3D6CAC81FB31E3ABC
11. <https://www.cnn.com/2021/03/30/tech/ibm-cleveland-clinic-quantum-computing/index.html>
12. <https://quantumalgorithms.ca>
13. <https://www.usherbrooke.ca/iq/>
14. <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/04/quantum-report-EN-10-accessible.pdf>
15. <https://newsroom.ibm.com/2019-09-10-IBM-and-Fraunhofer-Join-Forces-on-Quantum-Computing-Initiative-for-Germany>
16. <https://newsroom.ibm.com/2020-07-30-IBM-and-the-University-of-Tokyo-Unveil-the-Quantum-Innovation-Initiative-Consortium-to-Accelerate-Japans-Quantum-Research-and-Development-Leadership>
17. <https://ppforum.ca/fr/publications/comblent-les-lacunes-dans-les-competences-numeriques/>
18. <https://quantum-computing.ibm.com>
19. <https://qiskit.org>
20. <https://www.ibm.com/blogs/research/2021/02/quantum-development-roadmap/>

© Copyright IBM Canada Ltée, 2021
© Copyright IBM Corporation 2021

IBM Canada
3600 Steeles Avenue East
Markham, ON L3R 9Z7

Produit au Canada
2021-05

IBM, le logo IBM et ibm.com sont des marques de commerce d'International Business Machines Corp., enregistrées dans de nombreux pays. Les autres noms de produit et de service peuvent être des marques de commerce d'IBM ou de tiers. La liste à jour des marques IBM est disponible sur le web sous « Copyright and trademark information », à l'adresse www.ibm.com/legal/copytrade.shtml.

Toute l'information contenue dans le présent document est à jour à la première date de publication seulement et peut être modifiée sans préavis. Les offres ne sont pas toutes disponibles dans tous les pays où IBM fait affaire.

LES RENSEIGNEMENTS CONTENUS DANS LE PRÉSENT DOCUMENT SONT FOURNIS « TELS QUELS », SANS AUCUNE GARANTIE, EXPRESSE OU IMPLICITE, Y COMPRIS TOUTE GARANTIE RELATIVE À LA QUALITÉ MARCHANDE, À LA CONVENANCE À UN USAGE PARTICULIER ET TOUTE GARANTIE OU CONDITION DE NON-CONTREFAÇON.

Les produits IBM sont garantis selon les modalités des contrats qui les accompagnent.

Cette publication est fournie à titre d'orientation générale seulement. Elle ne vise pas à se substituer à une recherche approfondie ou à l'exercice du jugement professionnel. IBM ne sera pas responsable d'une perte éventuelle subie par une entreprise ou une personne qui se fie à cette publication.

Les données utilisées dans ce rapport peuvent être dérivées de sources de tiers et IBM ne les vérifie pas et ne les valide pas de façon indépendante. Les résultats de l'utilisation de ces données sont fournis tels quels et IBM n'émet aucune déclaration ou garantie, expresse ou implicite.

