Rapport annuel couvrant la période du 1er avril 2020 au 31 mars 2021

Destiné au ministère de l'Innovation, des Sciences et du Développement économique
Le 31 juillet 2021

MESSAGE DU DIRECTEUR GÉNÉRAL

Du nouveau directeur général par intérim

L'exercice 2020-2021 en a été un de transformation. L'Institut d'informatique quantique (IQC) a persévéré dans le contexte d'une pandémie sans précédent, relevant les défis et adaptant sa stratégie pour continuer de connaître du succès. L'impact de l'IQC au cours de la dernière année illustre la puissance d'un engagement soutenu et d'efforts collectifs pour réaliser quelque chose de vraiment unique ici même au Canada. Grâce à l'engagement et au soutien constants du gouvernement fédéral, l'IQC et le Canada sont à l'avant-garde de la physique quantique dans le monde.

Au cours de l'année écoulée, nous avons contribué au savoir mondial avec 170 articles publiés, 124 exposés et 113 collaborations en cours, une couverture médiatique pour une valeur de 4,6 millions de dollars, de même que 73 initiatives de rayonnement qui ont touché plus de 11 800 personnes. Nos programmes d'études supérieures ont attiré 197 étudiants de partout au pays et du monde entier, et nous avons préparé le lancement de notre nouveau programme de maîtrise constitué de cours et adapté aux professionnels de l'industrie, qui prendra son envol cet automne. De plus, nous avons accueilli 17 nouveaux postdoctorants et 7 nouveaux associés de recherche. Dans nos 3 bâtiments (le Centre Quantum-Nano Mike-et-Ophelia-Lazaridis et les 2 bâtiments du RAC), nous continuons d'équiper des laboratoires à mesure des progrès du domaine et de l'arrivée de chercheurs au sein de notre communauté en pleine croissance.

L'IQC fait progresser le domaine de l'information quantique en vue de la découverte et de la commercialisation de nouvelles technologies puissantes qui nous procureront des niveaux inédits d'efficacité, de sécurité et de précision. Nous sommes fiers que la recherche et les innovations réalisées à l'IQC donnent naissance à de nouvelles entreprises et bâtissent une communauté soudée de R-D universitaire et industrielle au Canada.

À titre de nouveau directeur par intérim de l'IQC et de professeur à l'IQC depuis 2005, j'espère poursuivre ce parcours d'innovation avec le gouvernement du Canada. Merci de votre appui constant.

Bien à vous,

John Watrous
Directeur général par intérim, Institut d'informatique quantique
Professeur titulaire, École d'informatique, Université de Waterloo

Table des matières

RÉSUMÉ 3
L'INSTITUT D'INFORMATIQUE QUANTIQUE 4
OBJECTIFS DU FINANCEMENT 5
RÉALISATIONS EN 2019-2020 6
Objectif A 6
Objectif B 36
Objectif C 47
Objectif D 53
Objectif E 62
ANNEXES 65
A. Évaluation et mitigation des risques 65
B. Publications 67
C. Professeurs, professeurs-chercheurs adjoints et associés de recherche 74
D. Collaborations 75
E. Postdoctorants 78
F. Étudiants diplômés 79
G. Invitations comme conférencier et participations à des conférences 82
H. Scientifiques invités et visiteurs 92
I. Points saillants financiers 93

RÉSUMÉ

Les 20 dernières années ont vu des progrès significatifs de la science et de la technologie de l'information quantique. Nous sommes bien placés pour constater comment la recherche dans ce domaine entraîne la découverte et la mise au point de systèmes dont les capacités dépassent de beaucoup ce qui existait auparavant. Depuis sa fondation en 2002, l'IQC est devenu un moteur de la création de savoir et de technologie en informatique quantique, et il suscite des initiatives de commercialisation qui bénéficient déjà aux Canadiens et le feront pendant longtemps encore. L'IQC demeure un acteur-clé de l'économie quantique émergente du Canada.

À l'appui de son action, l'IQC a obtenu en 2019 du gouvernement du Canada un financement de 15 millions de dollars sur 3 ans. Ces fonds serviront à poursuivre 5 objectifs-clés et à aller au-delà des grandes avancées que l'IQC a réalisées pour chacun d'entre eux.

Voici les points saillants de l'exercice 2020-2021 :

- Obtention de plus de 30 000 000 $ en fonds de recherche
- Recrutement de 1 nouveau professeur-chercheur adjoint et de 7 associés de recherche
- Accueil de 17 nouveaux postdoctorants
- Publication de 170 articles dans des revues scientifiques à comité de lecture
- Total de plus de 62 000 citations depuis la fondation de l'IQC
- Présentation d'exposés à plus de 120 groupes de pairs universitaires au Canada et à l'étranger, avec plus de 110 collaborations en cours
- Réception de plus de 425 candidatures canadiennes et étrangères aux programmes d'études supérieures, dont 20 % de femmes
- Obtention de plus de 450 prix et distinctions par les étudiants diplômés de l'IQC
- Organisation de 1 atelier, 34 séminaires et 10 colloques; parrainage de 4 programmes scientifiques à l'extérieur de l'IQC
- Plus de 11 800 personnes de publics variés touchées par 70 initiatives d'initiation et d'approfondissement en physique quantique
- Élaboration d'un nouveau programme de maîtrise constitué de cours et adapté aux professionnels de l'industrie, qui sera lancé à l'automne 2021

Avec ses partenaires, l'IQC œuvre à la construction de l'économie canadienne de l'information quantique à Waterloo. L'IQC a mis à profit son infrastructure unique au monde et ses capacités scientifiques exceptionnelles pour créer un milieu orienté vers les marchés, le premier du genre au Canada, pour la conception, la réalisation et les essais de services et dispositifs d'informatique quantique. La croissance rapide de l'IQC et ses progrès dans la connaissance du monde quantique consolideront la réputation de la région de Waterloo — et du Canada — comme chef de file planétaire du domaine quantique.

L'INSTITUT D'INFORMATIQUE QUANTIQUE

L'Institut d'informatique quantique (en abrégé IQC pour *Institute for Quantum Computing*) de l'Université de Waterloo a été fondé en 2002 afin d'exploiter le potentiel de l'informatique quantique au bénéfice du Canada. L'IQC avait une vision audacieuse : **faire du Canada un chef de file de la recherche et lui donner l'infrastructure nécessaire afin que le pays soit un moteur de la recherche en physique quantique**. Aujourd'hui, l'IQC fait partie des principaux instituts de recherche sur l'information quantique au monde. Des experts de tous les domaines de l'informatique quantique viennent à l'IQC pour y faire des recherches, partager leurs connaissances et former la nouvelle génération de scientifiques.

L'IQC mène la prochaine grande révolution technologique du Canada — la révolution quantique. Les dispositifs et applications quantiques mis au point dans les laboratoires de l'IQC constituent le fondement de technologies de la prochaine génération issues de la recherche menée ici même au Canada sur l'information quantique.

Rien de cela ne serait possible sans la vision et les investissements de Mike et Ophelia Lazaridis, du gouvernement du Canada, du gouvernement de l'Ontario et de l'Université de Waterloo. Ce partenariat public-privé stratégique accélère les progrès de la recherche et des découvertes en informatique quantique, non seulement au Canada, mais à l'échelle de la planète.

Vision et mission

L'IQC vise à exploiter la puissance de la mécanique quantique pour créer des technologies révolutionnaires qui bénéficieront à la société et deviendront le nouveau moteur de la croissance économique au XXIe siècle et au-delà.

L'IQC a pour mission de développer et faire progresser la science et la technologie de l'information quantique au plus haut niveau international, grâce à la collaboration entre informaticiens, ingénieurs, mathématiciens et physiciens.

Objectifs stratégiques

Les 3 objectifs stratégiques suivants, définis en partenariat avec le gouvernement du Canada en 2008, orientent l'action de l'IQC :

1. faire de Waterloo un centre de calibre mondial pour la recherche sur les technologies quantiques et leurs applications;
2. attirer du personnel hautement qualifié en informatique quantique;
3. constituer une source faisant autorité en matière d'idées, d'analyses et de commentaires sur l'information quantique.

OBJECTIFS DU FINANCEMENT

Période 2019-2022

En 2019, le gouvernement du Canada a octroyé à l'IQC la somme de 15 millions de dollars sur 3 ans, en vue de la réalisation des 5 objectifs suivants :

A. enrichir les connaissances dans les divers domaines et sous-domaines de l'informatique quantique, afin de placer les Canadiens à la fine pointe de la recherche et de la technologie de l'information quantique;

B. offrir aux étudiants des occasions d'acquérir et d'appliquer de nouvelles connaissances, pour le bénéfice du Canada, afin de stimuler l'innovation et les investissements dans les activités de R-D grâce à la formation d'un personnel hautement qualifié;

C. faire du Canada la destination de choix pour la recherche sur les technologies quantiques et y attirer les meilleurs au monde, en mettant sur pied des partenariats avec la communauté internationale de l'information quantique, et en favorisant à l'échelle mondiale l'excellence en science et technologie de l'information quantique;

D. améliorer et étendre les activités publiques de formation et de diffusion des connaissances de l'IQC, afin de promouvoir effectivement la science et l'informatique quantique, et de montrer comment la recherche sur l'information quantique peut être appliquée, en vue de soutenir et d'attirer des scientifiques de classe mondiale;

E. traduire de plus en plus les résultats de la recherche en produits quantiques commercialisables qui apporteront des bénéfices économiques et sociétaux au Canada, et favoriser du même coup les projets conjoints et la collaboration avec des partenaires du secteur privé tout en suscitant des occasions de commercialisation.

Avec les activités planifiées et menées grâce à la contribution du gouvernement du Canada au cours des dernières années, l'IQC a positionné le Canada de manière à ce que celui-ci profite pleinement des bénéfices socioéconomiques venant de la recherche et de la technologie dans le domaine quantique. La suite de ce rapport présente les progrès réalisés pendant l'exercice 2020-2021.

RÉALISATIONS EN 2019-2020

Objectif A

Enrichir les connaissances dans les divers domaines et sous-domaines de l'informatique quantique, afin de placer les Canadiens à la fine pointe de la recherche et de la technologie de l'information quantique.

Résultat visé : Améliorer les connaissances en science et technologie de l'information quantique.

Activités prévues

- Poursuivre les recherches en collaboration et interdisciplinaires sur le calcul quantique, la communication quantique, les capteurs quantiques et les matériaux quantiques, menées par des professeurs de 3 facultés de l'Université de Waterloo — Sciences, Mathématiques et Génie.
- Publier les résultats de la recherche dans des revues scientifiques de premier plan.
- Recruter de nouveaux professeurs, professeurs-chercheurs adjoints et associés de recherche.
- Continuer d'équiper les laboratoires du Centre Quantum-Nano Mike-et-Ophelia-Lazaridis, à mesure que de nouveaux membres de l'IQC sont recrutés.
- Continuer d'équiper et d'entretenir l'Installation de fabrication et caractérisation nanométriques quantiques, pour permettre la fabrication de dispositifs quantiques.
- Mettre à niveau et entretenir les laboratoires des bâtiments du RAC (*Research Advancement Centre* – Centre d'avancement de la recherche).
- Continuer d'entretenir des relations effectives et pertinentes avec les partenaires actuels de l'IQC.
- Chercher à conclure de nouveaux partenariats favorisant l'accomplissement de la mission de l'IQC et l'atteinte de ses objectifs.

Publications de recherche et citations

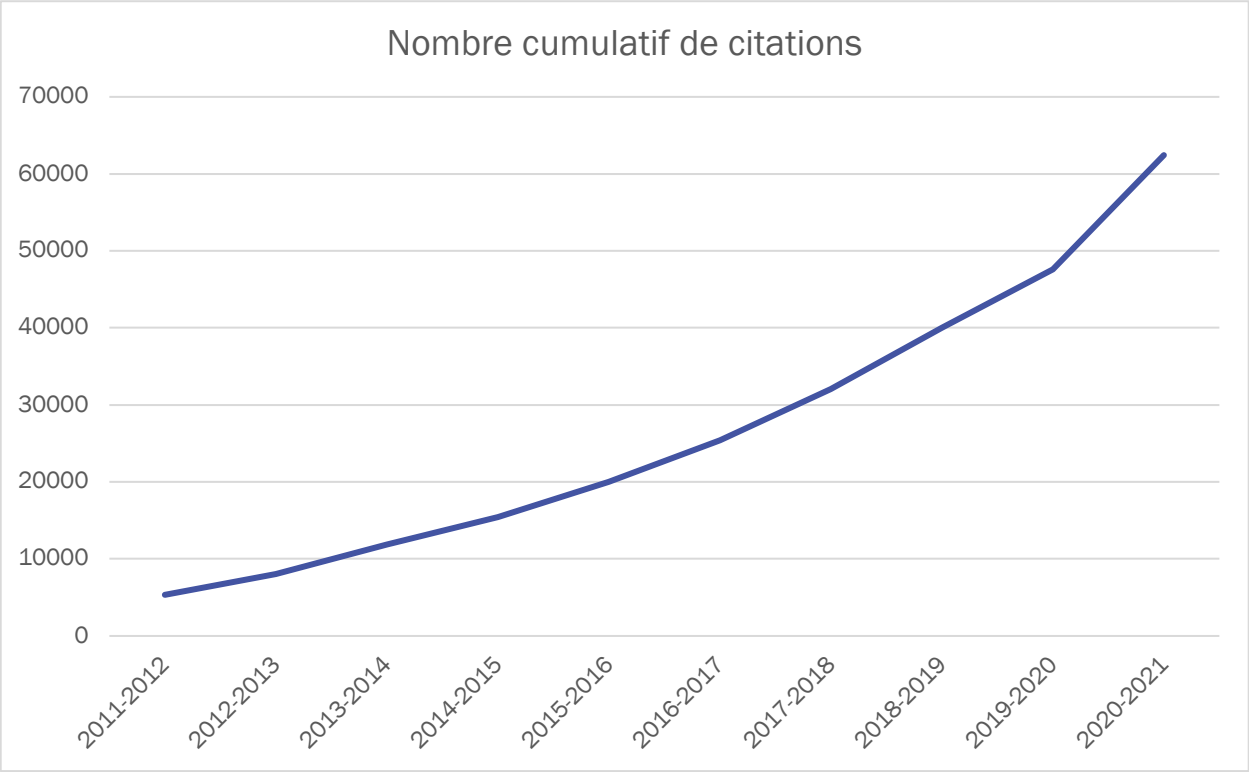
En 2020-2021, les chercheurs de l'IQC ont publié en tout 170 articles dans des revues scientifiques à comité de lecture, portant le nombre cumulatif de publications à 2431[1] depuis 2002. Plusieurs articles sont parus dans des publications scientifiques de premier ordre, dont *Science*, les publications du groupe *Nature*, le *Journal of Mathematical Physics* et les *Physical Review Letters*. Voici un résumé des articles publiés dans des revues prestigieuses depuis 2014. L'annexe B, à la page 67, donne la liste complète des articles publiés cette année.

Publications de premier ordre	**14-15**	**15-16**	**16-17**	**17-18**	**18-19**	**19-20**	**20-21**
Revues du groupe *Nature*	11	7	9	9	4	9	12
Physical Review Letters	26	17	11	6	8	15	8
Science	1				1		
Journal of Mathematical Physics	5	7	3	4	5	1	3
Foundations of Computer Science	2	2	1			9	1
Symposium on Theory of Computing	3	1	2	1	1	1	3

Une analyse plus poussée révèle que 67 % des articles de l'IQC (de 2002 à ce jour) ont été publiés avec des chercheurs d'importants instituts et universités du monde entier, notamment l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), l'Université du Maryland, l'Université de technologie de Delft, l'Université Tsinghua, l'Université de Sherbrooke, l'Université de la Colombie-Britannique et l'Université de Toronto.

[1] Cela comprend *Web of Science* et les revues de la base de données *Scopus* qui ne sont pas indexées dans *Web of Science*.

Le nombre de citations est aussi un indicateur important de l'influence des recherches publiées. Au 31 mars 2021, les articles publiés par des membres de l'IQC ont fait en tout l'objet de 62 437 citations. Le graphique ci-dessous montre l'augmentation importante du nombre de citations, étant donné la croissance modérée du corps professoral de l'IQC, ce qui témoigne de l'impact de ses chercheurs.



Source : Web of Science : *AD= ((Inst* Quant* Comp*) OU IQC) ET ad = waterloo + revues de la base de données* Scopus *qui ne sont pas indexées dans* Web of Science : *AFFIL(Inst* Quant* Comp*) ET AFFILCITY(waterloo); période couverte : de 2010 à 2021. Données extraites le 31 mars de chaque année.*

Points saillants de la recherche

Les comptes rendus qui suivent ne constituent qu'un échantillon des recherches publiées par l'IQC au cours de la dernière année. Ils mettent en évidence l'étendue et la profondeur des recherches effectuées à l'Institut.

TROUVER L'ÉTAT FONDAMENTAL DE HAMILTONIENS DE SPIN À L'AIDE DE L'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT

Finding the ground state of spin Hamiltonians with reinforcement learning
Publié le 7 septembre 2020 dans *Nature Machine Intelligence*
https://www.nature.com/articles/s42256-020-0226-x

Des simulations avancées pourraient un jour nous aider à explorer de nouveaux territoires en physique atomique, à élaborer de nouveaux matériaux et à découvrir de nouveaux médicaments. Mais les chercheurs doivent d'abord trouver les meilleurs moyens de contrôler ces simulations. De nouvelles recherches, qui ont fait la couverture

de la revue *Nature Machine Intelligence*, abordent l'apprentissage automatique comme moyen de réaliser un contrôle optimal.

Pooya Ronagh, professeur-chercheur adjoint à l'IQC ainsi qu'au Département de physique et d'astronomie, a démontré qu'on peut enseigner à un programme d'apprentissage automatique à trouver les meilleures manières de contrôler un système avec lequel il n'a jamais interagi auparavant.

« Lorsque quelqu'un apprend un jeu sur une console Atari, dit-il, il en apprend beaucoup sur la manière de jouer à tous les jeux sur cette console. À l'heure actuelle, les modèles d'apprentissage automatique doivent être entraînés pour chaque jeu séparément. Mais nous aimerions qu'ils soient capables de jouer d'emblée à un autre jeu qu'ils n'ont jamais vu auparavant. » [traduction]

L'équipe de M. Ronagh, qui comprenait Kyle Mills et Isaac Tamblyn, de l'Institut universitaire de technologie de l'Ontario et du Conseil national de recherches du Canada, a simulé des systèmes composés de particules. Elle voulait contrôler le passage de ces systèmes d'une température élevée — haut niveau d'énergie — à une basse température — faible niveau d'énergie —, aussi appelée *état fondamental*. Plus précisément, l'équipe voulait vérifier si un type d'apprentissage automatique appelé *apprentissage par renforcement* pouvait trouver la manière optimale de faire baisser la température dans différentes configurations de tels systèmes.

L'apprentissage par renforcement est un type d'apprentissage automatique où un programme apprend, en interagissant avec un système en évolution, comment mieux obtenir un résultat voulu. Les schémas réguliers de contrôle de la température font appel à des formules analytiques. Mais l'équipe s'est rendu compte que l'apprentissage par renforcement permet de trouver des schémas de contrôle de la température qui sont meilleurs tout en étant très irréguliers, en particulier lorsque le système simulé est d'une taille beaucoup plus considérable.

Dans un processus d'essais et erreurs, le programme des chercheurs a fait passer plusieurs fois un système de particules d'une température élevée à une basse température. Après cette période d'entraînement, le programme est parvenu à trouver des schémas de contrôle améliorés sur des systèmes entièrement nouveaux pour lui. La capacité du programme à trouver ces schémas s'adaptait bien à la taille des systèmes. M. Ronagh a déclaré que ce résultat constitue un début prometteur de l'utilisation de l'apprentissage par renforcement pour le contrôle quantique.

« Le but ultime est de construire un bon ordinateur quantique, dit M. Ronagh, et pour cela nous avons besoin de bons qubits. Pour fabriquer de bons qubits, il faut en simuler les propriétés physiques. Il faut pouvoir contrôler l'évolution du système. » [traduction]

Avec ses premiers résultats prometteurs, Pooya Ronagh espère maintenant étendre au monde quantique la technique d'apprentissage par renforcement.

Son équipe a déjà commencé à travailler en ce sens en utilisant des mesures « destructrices ». Pour faire évoluer le système d'une température élevée à une basse température, le programme de contrôle doit mesurer la température du système au cours du processus. Cependant, le fait de mesurer un système quantique altère son

évolution. Pour mettre à l'épreuve son programme sur des systèmes quasi quantiques, l'équipe lui a donné instruction de recommencer chaque fois qu'il prenait une mesure, simulant ainsi l'aspect destructeur de la mesure d'un système quantique. L'équipe a quand même obtenu une amélioration de l'adaptabilité du programme, ce qui laisse entendre que l'apprentissage par renforcement pourrait constituer une méthode efficace de contrôle quantique.

Le contrôle quantique n'est pas utile seulement pour les qubits. « À un niveau plus élevé, dit M. Ronagh, de nombreux algorithmes quantiques simulent des évolutions physiques, et la performance de chaque algorithme dépend du choix de ces évolutions. La raison pour laquelle la découverte d'un nouveau médicament coûte si cher, c'est qu'il faut fabriquer une molécule, la tester, puis en essayer une autre si la précédente ne fonctionne pas. Et si on pouvait simuler le médicament et en comprendre les propriétés à l'aide d'un processeur quantique? »

Pour cela, il faudrait exécuter un algorithme qui modélise le comportement physique du médicament. « Cela est en soi une évolution, poursuit M. Ronagh. Je dois pouvoir contrôler cette évolution afin d'obtenir l'état fondamental du médicament, que l'on observe dans la nature. La question est de savoir quelle est la meilleure manière d'obtenir un contrôle quantique optimal. L'apprentissage automatique constitue une possibilité enthousiasmante. » [traduction]

MISE EN ŒUVRE D'UNE PORTE DE WALSH-HADAMARD DANS UN QUTRIT SUPRACONDUCTEUR

Implementation of a Walsh-Hadamard Gate in a Superconducting Qutrit
Publié le 27 octobre 2020 dans *Physical Review Letters*
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.125.180504

Pour la première fois, des chercheurs ont mis en œuvre dans un système quantique à 3 niveaux — un qutrit — une porte utilisée dans d'importants algorithmes quantiques à une étape.

Dirigés par Ali Yurtalan, associé de recherche à l'IQC ainsi qu'au Département de physique et d'astronomie de l'Université de Waterloo, ces travaux définissent et abordent les principales difficultés du contrôle d'un qutrit, rapprochant les chercheurs de la réalisation d'ordinateurs quantiques centrés sur de tels processeurs quantiques multiniveaux.

En informatique, une porte est un opérateur logique qui traite des intrants pour produire un extrant. Dans un ordinateur classique, une porte donne 0 ou 1. Une porte réalisée sur un qubit — bit quantique — donne 0, 1, ou une superposition de ces 2 possibilités. Une porte réalisée sur un qutrit a beaucoup plus d'extrants possibles : 0, 1, 2, ou une superposition de n'importe lesquels de ces 3 états.

L'ajout d'un niveau dans chaque unité de traitement d'un ordinateur signifie qu'il y a beaucoup plus d'options disponibles pour mettre en œuvre des algorithmes quantiques existants et en élaborer de nouveaux. Il ouvre aussi la possibilité que des processeurs

quantiques traitent de l'information à 2 niveaux comme s'ils étaient faits de qubits, mais en utilisant le 3e niveau des qutrits pour des opérations telles que la correction d'erreurs.

Cependant, l'ajout d'un niveau à un système n'augmente pas seulement ses possibilités. Il en augmente aussi la complexité.

« Les qutrits posent des difficultés, dit M. Yurtalan. Si l'on essaie de contrôler les 3 niveaux du système en même temps, cela crée des changements dans les niveaux d'énergie des qutrits. » [traduction]

Les chercheurs, qui ont travaillé avec le professeur Sahel Ashhab de l'Université Hamad-Ben-Khalifa, ont pu définir et caractériser les changements dans les niveaux d'énergie de leur qutrit supraconducteur. Ils ont ensuite compensé ces changements de manière dynamique, tout en mettant en œuvre leur porte dans les 3 niveaux du qutrit avec une impulsion de micro-onde.

« Nous avons identifié les difficultés naturelles qui surgissent lorsque l'on essaie de contrôler ces qutrits, dit M. Yurtalan, et nous avons défini la manière de s'y attaquer. Nous espérons que cela nous aidera à généraliser de telles portes à des systèmes ayant plus de 3 niveaux. » [traduction]

La porte mise en œuvre par l'équipe est commune à de nombreux algorithmes quantiques cruciaux, qui auront de grandes possibilités lorsqu'il y aura des ordinateurs quantiques suffisamment puissants et stables pour les exécuter. Même si une telle porte ne constitue qu'une petite partie de n'importe quel algorithme, Ali Yurtalan espère que ces travaux sont une étape vers le contrôle de puissants ordinateurs quantiques faits de qudits, unités élémentaires générales de systèmes quantiques à 3 niveaux ou plus.

« Comme cette porte est une étape vers la mise en œuvre d'algorithmes quantiques cruciaux, poursuit M. Yurtalan, elle constitue un petit pas vers l'informatique quantique utile. » [traduction]

Le qutrit supraconducteur sur lequel les chercheurs ont mis en œuvre leur porte a également fait l'objet des travaux de Michal Kononenko, le plus récent lauréat du prix d'excellence de l'IQC et aussi l'un des auteurs de cet article.

APPRENTISSAGE EFFICACE DU BRUIT QUANTIQUE
Efficient learning of quantum noise
Publié le 10 août 2020 dans *Nature Physics*
https://www.nature.com/articles/s41567-020-0992-8

Les ordinateurs quantiques auront dorénavant de l'aide pour vaincre le principal obstacle à leurs performances : le bruit.

Joel Wallman, chercheur à l'IQC et professeur adjoint de mathématiques appliquées à l'Université de Waterloo, vient de mettre au point un protocole qui contribuera à surmonter le problème du bruit dans les ordinateurs quantiques, permettant à ceux-ci d'effectuer des calculs plus complexes.

« Le bruit inhérent aux ordinateurs quantiques nuit à la fiabilité de leurs résultats », dit M. Wallman, cofondateur de Quantum Benchmark, entreprise issue de l'essaimage à

partir de l'IQC. « À l'heure actuelle, les problèmes que nous savons résoudre à l'aide d'un ordinateur quantique sont mieux résolus à l'aide d'ordinateurs classiques. Pour produire des ordinateurs quantiques capables de faire quelque chose d'utile, nous devons en construire de plus gros et nous devons apprendre à mieux les contrôler. » [traduction]

Joel Wallman, en collaboration avec Robin Harper et Steve Flammia, de l'Université de Sydney, a mis au point un nouveau protocole qui fonctionne dans de grands systèmes — des ordinateurs quantiques ayant de nombreux qubits (version quantique des bits des ordinateurs classiques). Ce protocole permet aux chercheurs de caractériser d'une manière efficace et fiable le bruit quantique qui affecte les qubits.

Auparavant, les chercheurs utilisaient des protocoles d'évaluation qui ne pouvaient détecter des erreurs que sur de petits sous-ensembles de qubits. La nouvelle méthode donne une estimation du bruit effectif et peut détecter des corrélations d'erreurs dans des ensembles quelconques de qubits.

« La raison pour laquelle ce protocole est si important est que si le bruit n'agit pas que localement dans un système, les techniques actuelles de correction et d'atténuation des erreurs ne fonctionnent tout simplement pas », dit M. Wallman. « Et nos données ont montré que de telles erreurs non locales sont présentes dans de véritables ordinateurs quantiques. » [traduction]

L'équipe de recherche de M. Wallman à l'Université de Waterloo et chez Quantum Benchmark perfectionne cette technique, afin de caractériser et de supprimer les erreurs dans des opérations spécifiques sur des données.

Des outils fondés sur cette méthode sont inclus dans True-Q, logiciel de Quantum Benchmark et chef de file mondial de la caractérisation des erreurs quantiques.

UTILISATION DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE POUR LA CONCEPTION D'UN SIMULATEUR DE SPIN QUANTIQUE À IONS PIÉGÉS

Machine learning design of a trapped-ion quantum spin simulator
Publié le 21 janvier 2020 dans *Quantum Science and Technology*
https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab657a

« Je ne crois pas que ceci sera remplacé par un ordinateur quantique dans l'avenir » [traduction], déclare Rajibul Islam, professeur à l'IQC ainsi qu'au Département de physique et d'astronomie, en désignant son ordinateur de bureau.

Il voit plutôt des ordinateurs classiques comme celui de son bureau travailler de concert avec des ordinateurs quantiques pour résoudre des problèmes actuellement hors de portée des seuls ordinateurs classiques. Grâce à de nouvelles recherches, M. Islam croit que des réseaux neuronaux entraînés — des systèmes d'apprentissage automatique classiques qui ont « appris » à résoudre un problème en analysant des exemples — pourraient jouer un rôle important dans cet avenir hybride.

Rajibul Islam, en collaboration avec Roger Melko, membre affilié de l'IQC ainsi que professeur au Département de physique et d'astronomie, a démontré qu'un réseau

neuronal entraîné peut rapidement déterminer le bon montage pour exécuter une simulation quantique donnée. Il s'agit d'une étape vers des ordinateurs hybrides classiques-quantiques qui seront utilisés pour résoudre les problèmes les plus difficiles en physique et en science des matériaux.

Facile dans un sens, pas si facile dans l'autre

Dans presque tous les domaines de l'informatique, il y a un vaste ensemble de problèmes, appelés problèmes inverses, qui sont très faciles à résoudre dans un sens, mais extrêmement difficiles à résoudre dans le sens opposé. Les expérimentateurs qui tentent de simuler un système quantique avec un simulateur à ions piégés font face à un problème inverse.

En fixant les paramètres du simulateur — comme la fréquence et l'intensité des lasers —, il est facile de résoudre une équation et de déterminer quelle interaction est reproduite dans le simulateur avec ces paramètres. Par contre, lorsque des chercheurs veulent calculer comment régler leurs lasers pour simuler une interaction quantique précise telle que les interactions entre électrons dans un matériau quantique, un ordinateur classique doit faire des calculs, parfois pendant des heures dans le cas d'un système de grande taille, pour chaque interaction à simuler.

Après s'être rendu compte que ce problème est en réalité un problème inverse, MM. Islam et Melko ont eu une idée : pourrait-on entraîner un réseau neuronal à reconnaître un éventuel modèle parmi les paramètres expérimentaux et les interactions entre ions piégés? Impossible de le savoir sans essayer. Ils ont demandé à Marina Drygala et à Yi Hong Teoh, étudiants de 1er cycle à l'Université de Waterloo, de travailler sur la question.

Mise à l'épreuve d'une idée

Les 2 étudiants ont trouvé que le réseau neuronal, entraîné avec des milliers et des milliers de paramètres synthétisés et les interactions résultantes, convergeait vers un modèle reliant les premiers aux secondes.

Même si l'entraînement peut prendre des heures ou des jours selon la taille du système à ions piégés, une fois que cet entraînement est fait, un ordinateur de bureau ordinaire peut donner en moins d'une milliseconde les paramètres expérimentaux requis pour simuler une interaction quantique précise. De plus, comme la difficulté du réseau neuronal est de résoudre un problème inverse, il est très facile de vérifier que les résultats sont exacts une fois que le travail difficile est complété.

« Ce problème inverse peut s'appliquer à un grand nombre de situations différentes en informatique quantique, dit M. Islam. Dans le cas des puces ioniques très complexes utilisées par des entreprises comme Honeywell et IonQ, les problèmes concernant les tensions et le potentiel électriques appliqués à leurs ions sont essentiellement les mêmes. » [traduction]

Rajibul Islam espère que d'autres applications de cette démarche d'apprentissage automatique feront surface, et qu'un jour des ordinateurs quantiques assistés de systèmes d'apprentissage automatique pourront résoudre les problèmes les plus difficiles en physique et en science des matériaux.

« Je crois que l'avenir de l'informatique quantique combinera les forces du calcul classique comme l'apprentissage automatique et celles de la physique quantique afin de résoudre des problèmes qui sont difficiles pour l'un des deux, poursuit-il. Le résultat que nous venons d'obtenir constitue un grand pas dans cette direction. » [traduction]

UN AVANTAGE QUANTIQUE AVEC DES CIRCUITS PEU PROFONDS BRUYANTS
Quantum advantage with noisy shallow circuits
Publié le 6 juillet 2020 dans *Nature Physics*
https://www.nature.com/articles/s41567-020-0948-z

De nouvelles recherches montrent que les ordinateurs quantiques limités disponibles à court terme pourraient être plus puissants qu'il n'y paraît pour résoudre un problème insoluble à l'aide d'ordinateurs classiques comparables.

Une équipe réunissant des collaborateurs de l'IQC, d'IBM, de l'Université technique de Munich et de l'Université technologique de Sydney a élaboré un algorithme permettant de résoudre un problème avec un circuit quantique bruyant dont la profondeur est fixe, et qui doit donc résoudre le problème en un nombre maximal déterminé d'étapes.

« Nous nous intéressons aux circuits d'une profondeur fixe, parce que plus ils fonctionnent longtemps, plus les ordinateurs quantiques disponibles à court terme accumulent un grand nombre d'erreurs », déclare David Gosset, professeur à l'IQC ainsi qu'au Département de combinatoire et d'optimisation de la Faculté de mathématiques de l'Université de Waterloo. « Nous voulons donc étudier des modèles restreints de calcul quantique qui profitent le plus possible du caractère quantique en faisant le moins possible de calculs. » [traduction]

La correction des erreurs dues au bruit dans un circuit quantique exige normalement des étapes supplémentaires, ce qui fait perdre l'avantage quantique de la résolution de problèmes dans un laps de temps limité. L'algorithme mis au point par les chercheurs corrige les erreurs en même temps qu'il résout le problème, ce qui permet au circuit de conserver une profondeur fixe. Aucun algorithme classique ne permet de résoudre le même problème avec un circuit de profondeur fixe, même en l'absence de bruit. À mesure que la quantité de données en entrée augmente, le circuit classique doit croître de manière logarithmique.

C'est comme une piste de course automobile d'une longueur fixe, mais dont la pente augmente à mesure que la course progresse. Une voiture quantique — le nouvel algorithme des chercheurs — peut continuer d'avancer, même si elle doit éviter les nids-de-poule en chemin. Une voiture classique devra être de plus en plus puissante à mesure que la pente augmente, même si la surface de la piste est parfaite.

Cet algorithme pourrait être mis en œuvre dans l'avenir avec des ordinateurs quantiques capables d'effectuer certains éléments de base de la correction d'erreurs quantiques.

Les ordinateurs quantiques que les scientifiques arriveront à construire dans un avenir rapproché seront très limités et bruyants. Si des théoriciens mettent au point de

meilleurs algorithmes capables de résoudre des problèmes à l'aide d'un circuit quantique dans un très petit nombre d'étapes, on pourra alors obtenir de meilleurs résultats avec les ordinateurs quantiques disponibles à court terme.

« Le problème que nous résolvons actuellement avec ce circuit n'est pas nécessairement utile en soi, dit M. Gosset, mais le fait qu'il y ait un avantage quantique est une autre preuve que les ordinateurs quantiques pourraient un jour surpasser les ordinateurs classiques pour certaines tâches. » [traduction]

OBTENIR LA RÉSOLUTION TEMPORELLE QUANTIQUE ULTIME
Achieving the Ultimate Quantum Timing Resolution
Publié le 4 janvier 2021 dans *PRX Quantum: A Physical Review Journal*
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.2.010301

La mesure précise d'intervalles de temps et de différences de couleur est au cœur de nombreuses technologies modernes, dont celles de la spectroscopie et du radar. Des recherches menées par John Donohue, gestionnaire principal, vulgarisation scientifique, à l'IQC, font appel à des techniques d'inspiration quantique pour atteindre un nouveau degré de précision dans les mesures.

En 2017 et 2018, M. Donohue a été postdoctorant au sein du groupe d'optique quantique intégrée de la professeure Christine Silberhorn, à l'Université de Paderborn, en Allemagne. Cette équipe, avec des collaborateurs de l'Université Palacký d'Olomouc et de l'Université Complutense de Madrid, vient de démontrer une nouvelle méthode de mesure et de caractérisation d'impulsions de lumière avec une précision temporelle améliorée.

La clé de cette technique est un guide d'ondes maison, appelé *porte d'impulsions quantiques*, mis au point à l'Université de Paderborn. Cette petite puce confine et guide la lumière comme une fibre optique, mais elle a aussi d'autres capacités formidables.

Lorsqu'un rayon laser est focalisé sur un petit point, il reprend rapidement sa taille originale. Lorsque les rayons laser et les photons sont piégés dans un guide d'ondes, ils peuvent être confinés à l'intérieur d'une largeur de quelques micromètres et conserver cette propriété sur quelques centimètres.

« Avec les guides d'ondes, dit M. Donohue, il est beaucoup plus efficace et facile d'étudier certains effets, que l'on pourrait difficilement étudier en focalisant les rayons laser dans des cristaux ou d'autres dispositifs optiques. » [traduction]

Lorsqu'il n'est pas possible de mesurer physiquement la distance entre 2 objets, par exemple entre 2 étoiles dans l'espace, il faut la calculer indirectement. Une manière de calculer et d'estimer la distance entre 2 objets ou 2 signaux consiste à utiliser une mesure optique du temps pour détecter des impulsions lumineuses. Par contre, cela peut être incroyablement difficile si ces impulsions ne sont pas cohérentes.

« Si 2 impulsions sont si proches l'une de l'autre qu'elles se fondent l'une dans l'autre, je ne peux pas facilement les distinguer, dit M. Donohue. J'aurais besoin d'énormément d'information pour répondre avec précision à la simple question de savoir combien de

temps il y a entre les deux. En langage quantique, pour obtenir davantage d'information, il faut mesurer plus de photons. Comment peut-on alors obtenir cette information en mesurant le moins de photons possible? » [traduction]

John Donohue sait qu'avec des mesures de nature différente, inspirées de la recherche sur l'information quantique, il peut éliminer ce problème. Cela lui permet d'obtenir une information précise grâce à la projection de formes modales spécifiques.

S'inspirant de travaux effectués en optique spatiale, les membres de l'équipe ont appliqué cette idée à la mesure d'intervalles de temps. Au lieu de s'intéresser à la distance entre 2 objets, ils ont cherché à mesurer l'intervalle de temps entre 2 événements.

C'est là que le guide d'ondes s'est avéré primordial.

Ce dispositif est capable de décomposer des impulsions selon leur forme plutôt que selon le moment de leur arrivée. Au lieu de sonder à quel moment une impulsion arrive, le dispositif cherche à savoir à quelle superposition précise de moments elle aurait pu arriver. En décomposant l'impulsion en ces formes, on peut estimer efficacement des propriétés telles que les intervalles de temps entre les impulsions et les intensités relatives de celles-ci.

Dans sa démonstration expérimentale, l'équipe a mis l'accent sur la précision avec laquelle elle pouvait faire l'estimation de ces paramètres pour chaque photon mesuré. Les chercheurs se sont rendu compte que leur technique représentait une amélioration significative par rapport aux meilleures mesures standard existantes.

M. Donohue espère que ces outils pourront être utilisés et appliqués dans le domaine de l'information quantique, par exemple pour mesurer l'intrication de photons selon la forme des impulsions et étudier la communication quantique.

« Non seulement ces dispositifs sont très utiles en optique classique, dit M. Donohue, mais leur étude du point de vue de l'information quantique pourrait ouvrir beaucoup de nouvelles avenues. » [traduction]

UN CONTRÔLE DE DÉTECTEUR À LA LUMIÈRE VIVE ÉMULE LES LIMITES LOCALES D'INÉGALITÉS DE TYPE BELL

Bright-light detector control emulates the local bounds of Bell-type inequalities
Publié le 6 août 2020 dans *Scientific Reports*
https://www.nature.com/articles/s41598-020-70045-7

Nigar Sultana a les yeux tournés vers l'espace. Maintenant qu'elle a obtenu son doctorat en génie électrique et informatique (information quantique) à l'Université de Waterloo, elle travaille avec Thomas Jennewein sur les satellites de communication quantique. Cette recherche constitue une étape importante vers la mise sur pied d'un réseau mondial sécuritaire de communications par satellite.

Mme Sultana a commencé ses études universitaires dans son Bangladesh natal, où elle a obtenu un diplôme en génie. Elle a ensuite fait une maîtrise et travaillé comme chargée de cours. Ce n'est que lorsqu'elle est arrivée à l'Université de Waterloo en 2013 qu'elle

s'est découvert une passion aussi forte que celle de l'enseignement. Elle est venue à l'IQC à titre d'assistante de recherche de Thomas Jennewein, professeur à l'IQC ainsi qu'au Département de physique et d'astronomie de l'Université de Waterloo.

Nigar Sultana a pu mettre à profit sa formation en génie alors qu'elle se plongeait dans la photonique quantique. Elle a fait son doctorat tout en concevant des systèmes de détection de photons individuels pour un projet de satellite en collaboration avec l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign : CAPSat (*Cooling, Pointing and Annealing Satellite* – Satellite de refroidissement, pointage et recuisson).

« Je veux faire des expériences concrètes et en voir le résultat » [traduction], dit-elle.

Mme Sultana participe avec enthousiasme à la conception de systèmes qui seront lancés dans l'espace. Son parcours de six ans en physique quantique l'a amenée à concevoir et réaliser pour le CAPSat un détecteur quantique comprenant un système de cicatrisation par recuisson au laser. Les détecteurs lancés dans l'espace à bord du satellite pour tester des données doivent pouvoir s'autoréparer en cas de dommages dus au lancement et aux dangereux rayonnements présents dans l'espace.

Mme Sultana indique qu'elle n'avait aucune connaissance pratique des satellites lorsqu'elle a commencé son travail à l'IQC. Elle a dû tout apprendre sur la construction de la charge utile d'un satellite et les contraintes imposées par les rigueurs de l'espace. « Chaque chose compte, dit-elle, même les petits détails comme la colle utilisée. » [traduction]

Alors qu'elle se concentre sur la miniaturisation de la technologie — tout doit entrer dans un satellite de moins de 10 cm de côté —, Nigar Sultana sait que l'impact de ses travaux sera immense. La distribution quantique de clés (DQC) est un nouveau système de communication qui fait appel aux lois de la nature pour sécuriser l'information en résistant aux progrès de la technologie informatique, y compris les ordinateurs quantiques. En testant des satellites qui ont des capacités quantiques, les chercheurs préparent la mise sur pied d'un réseau mondial de communications et d'un Internet sécurisé par des moyens quantiques.

« Lorsque le Canada lancera son premier satellite quantique, dit-elle, je pourrai dire que j'ai travaillé sur ce projet. » [traduction]

RECONNAISSANCE DIRECTE PAR DES ÊTRES HUMAINS D'UNE LUMIÈRE STRUCTURÉE

Direct discrimination of structure light by humans
Publié le 30 juin 2020 dans les comptes rendus de l'Académie nationale des sciences des États-Unis (*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*)
https://www.pnas.org/content/117/26/14682

Une expérience qui a commencé avec des tests de propriétés de l'intrication quantique a mené à la découverte d'un nouvel outil diagnostique qui pourrait aider les optométristes

à détecter la dégénérescence maculaire d'une manière beaucoup plus précoce que ce qui est actuellement possible.

Des chercheurs de l'IQC ont entrepris de tester la capacité de l'œil humain à percevoir l'une des propriétés de l'intrication quantique. Ils se sont toutefois rapidement rendu compte que l'outil qu'ils avaient mis au point pour tester leur théorie avait une utilisation pratique immédiate.

Ils ont alors fait équipe avec des chercheurs de l'École d'optométrie et de visiologie pour concevoir à partir de leurs travaux une forme particulière de lumière, visible pour ceux qui ont des yeux en santé, mais non pour ceux dont la vision est en dégénérescence.

« Cela a commencé par une expérience visant à déterminer si les gens peuvent percevoir directement une propriété essentielle de l'intrication quantique », déclare Dusan Sarenac, chercheur principal du projet à l'IQC. « Mais nos travaux ont rapidement montré que ces applications quantiques peuvent aider des personnes dès maintenant. » [traduction]

Une personne dont les yeux sont sains peut détecter une lumière polarisée sous la forme d'un point flou dans son champ de vision — phénomène appelé *houppes de Haidinger*. Mais ceux qui ont une dégénérescence maculaire ne peuvent pas du tout voir cela.

Les chercheurs se sont dit que les personnes ayant un risque accru d'avoir une dégénérescence maculaire pourraient avoir plus de difficulté à voir et à suivre des profils de lumière polarisée. Intéressée par cette hypothèse, l'équipe a préparé une forme particulière de lumière ayant des propriétés de polarisation spécifiques rarement vues dans la nature.

L'équipe de visiologie, dirigée par Andrew Silva, a mené une expérience avec cette technologie quantique auprès de participants humains. Là où une caméra ne percevait qu'un point lumineux, la plupart des participants ont pu reconnaître les profils filtrés par une macula saine.

À partir de ces constatations, l'équipe met actuellement au point un microscope à lumière structurée qui permettra aux optométristes de faire l'imagerie et le suivi de la physiologie oculaire — notamment la dégénérescence maculaire — de patients. Même si elle est difficile, la détection précoce de la dégénérescence maculaire est importante afin d'assurer un meilleur résultat des traitements. Les chercheurs comptent étudier si ce test permettra de détecter la maladie plus tôt que les tests actuels.

MM. Sarenac et Silva collaborent à l'IQC avec des équipes de Technologies quantiques transformatrices (TQT) dirigées par David Cory, professeur de chimie, et Dmitry Pushin, professeur de physique et d'astronomie, ainsi qu'avec une équipe dirigée par Ben Thompson, professeur à l'École d'optométrie et de visiologie.

MIROIR À CRISTAL PHOTONIQUE CHIRAL CONSERVANT LE SPIN
Spin-Preserving Chiral Photonic Crystal Mirror
Publié le 20 février 2020 dans *Light Science and Applications*
https://www.nature.com/articles/s41377-020-0256-5

Des chercheurs de l'IQC ont mis au point un nouveau type de miroir qui pourrait servir à détecter de faux billets de banque.

Comme les êtres humains, les photons — particules quantiques de lumière — peuvent être droitiers ou gauchers. Dans certaines applications, les chercheurs ont besoin de distinguer les photons droitiers des photons gauchers, par exemple pour étudier l'arrangement des molécules dans un médicament.

Dans de récents travaux dirigés par Behrooz Semnani, chercheur en 2e année de postdoctorat à l'IQC ainsi qu'au Département de génie électrique et informatique de l'Université de Waterloo, des scientifiques ont créé une structure 2D qui, tout comme un miroir, réfléchit les photons d'un type (droitiers ou gauchers), mais, à la différence d'un miroir ordinaire, laisse traverser les photons de l'autre type. Cette structure est un miroir à cristal photonique : une fine membrane ayant un motif chiral répétitif de perforations et ressemblant à un filtre très fin. L'adjectif *chiral* signifie que le motif n'est pas identique à son image dans un miroir. Par exemple, les lettres *S* et *Z* sont chirales.

La mise au point de ce nouveau miroir permettra de distinguer les photons dans un grand nombre d'applications, notamment la détection de fausse monnaie. Comme cette structure a une épaisseur inférieure à un micromètre, on peut l'imprimer sur des documents officiels — tels que des billets de banque —, où elle constitue une caractéristique invisible de sécurité permettant de détecter la contrefaçon.

« Cette structure est invisible à l'œil nu, dit M. Semnani. Grâce à ses propriétés caractéristiques, elle ne peut être détectée que lors d'une inspection avec une lumière ayant la longueur d'onde et le sens de polarisation appropriés. Elle peut être produite en série, ce qui est important pour des applications pratiques comme la détection de fausse monnaie. » [traduction]

Ces travaux prouvent que l'on peut distinguer les photons selon leur caractère droitier ou gaucher à l'aide d'une structure 2D fine, alors qu'auparavant on pensait avoir besoin de structures 3D épaisses et complexes.

Ces recherches ont été menées en partie grâce à l'appui du Fonds d'excellence en recherche Apogée Canada (FERAC).

LA MAGNÉTOMÉTRIE *IN SITU* RÉVÈLE UNE CAPACITÉ SUPPLÉMENTAIRE DE STOCKAGE DANS LES BATTERIES AUX IONS DE LITHIUM ET AUX OXYDES DE MÉTAUX DE TRANSITION
Extra storage capacity in transition metal oxide lithium-ion batteries revealed by in situ magnetometry
Publié le 17 août 2020 dans *Nature Materials*
https://www.nature.com/articles/s41563-020-0756-y

Ainsi que

SONDAGE PAR MAGNÉTOMÉTRIE DU MÉCANISME DE STOCKAGE DE CHARGES DANS LES BATTERIES AUX IONS DE LITHIUM ET À L'OXYDE DE COBALT
Operando Magnetometry Probing the Charge Storage Mechanism of CoO Lithium Ion Batteries
Publié le 12 février 2021 dans *Advanced Materials*
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202006629

Une énigme déconcerte le secteur industriel des batteries depuis des décennies : certains matériaux utilisés dans les batteries aux ions de lithium qui alimentent nos ordinateurs portatifs, nos téléphones et nos automobiles emmagasinent beaucoup plus d'énergie que ce que prévoit la théorie.

Grâce à une recherche menée en collaboration dans 3 pays, cette énigme vient d'être résolue, et les chercheurs y voient des occasions de développer de nouvelles technologies allant des batteries aux dispositifs quantiques.

Des chercheurs de l'IQC, de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) et de l'Université du Texas à Austin, ainsi que de l'Université de Qingdao et de l'Université du Shandong en Chine, ont exploité une technique normalement utilisée en physique pour sonder des batteries et découvrir leur fonctionnement interne.

« Le défi consiste à étudier ce qui se passe à l'intérieur d'une batterie pendant qu'elle fonctionne, mais de manière non destructive » [traduction], a déclaré Guo-Xing Miao, professeur agrégé à l'IQC ainsi qu'au Département de génie électrique et informatique de l'Université de Waterloo.

Lorsque l'on charge une batterie en la branchant, ou qu'on la décharge en l'utilisant, cela peut en même temps modifier le magnétisme à l'intérieur de la batterie. Les chercheurs ont profité de ce fait et utilisé une technique de magnétométrie *in situ* pour sonder en temps réel le magnétisme interne d'une batterie.

Selon un article publié en août 2020 dans la revue *Nature Materials*, les auteurs ont constaté que la capacité supplémentaire d'oxydes de métaux de transition — souvent employés dans les électrodes de batteries aux ions de lithium — réside surtout dans des nanoparticules qui se rassemblent près de la surface de ces matériaux après une utilisation régulière de la batterie. Ces nuages de nanoparticules contiennent la charge supplémentaire qui a déconcerté pendant des années les chercheurs, car ceux-ci ne prenaient en considération que les réactions chimiques.

Les chercheurs ont poursuivi leurs travaux en étendant leurs résultats de l'oxyde de fer à l'oxyde de cobalt — autre matériau qui possède une capacité de stockage de charges électriques plus élevée que prévu.

Publiés en février 2021 dans la revue *Advanced Materials*, ces nouveaux travaux montrent qu'un polymère se forme à la surface de l'oxyde de cobalt pendant une utilisation normale de la batterie. Les chercheurs ont utilisé la technique de magnétométrie pour montrer que ce polymère, avec l'aide des propriétés catalytiques du cobalt, contribue à la capacité supplémentaire de stockage des électrodes en oxyde de cobalt, en plus des mêmes nanoparticules que l'on trouve avec l'oxyde de fer.

« La plupart des batteries commercialisées contiennent un mélange de différents métaux de transition, en vue d'un équilibre optimal entre leur capacité, leur stabilité et leur coût, a déclaré M. Miao. Lorsqu'on leur applique des champs magnétiques, les batteries qui font appel à ces divers éléments ont des signatures magnétiques qui constituent une méthode de mesure non destructive. » [traduction]

La possibilité d'observer les modifications magnétiques qui surviennent dans de nombreux matériaux employés dans les électrodes ouvre de nouvelles avenues de connaissance et de développement de la technologie des batteries.

M. Miao aimerait également voir comment cette technique de magnétométrie peut avoir des effets sur la prochaine génération de dispositifs quantiques. « Nous avons emprunté cette technique à la spintronique, où elle fonctionne de la même manière, dit-il, mais avec des applications différentes. » [traduction]

Qiang Li, auteur principal de l'article et ancien membre de l'équipe de M. Miao, poursuit maintenant ses propres recherches en spintronique, à titre de professeur à l'Université de Qingdao et membre affilié de l'IQC. « Je me suis beaucoup intéressé au magnétisme pendant mon séjour à l'IQC, dit-il. Les manipulations magnétiques sur les ions de lithium sont si puissantes qu'elles ouvrent aussi une nouvelle voie vers le contrôle de dispositifs de spintronique. » [traduction]

La spintronique, aussi appelée *électronique de spin* ou *magnétoélectronique*, est l'étude des spins électroniques dans des dispositifs à semi-conducteur. En utilisant la même technique de magnétométrie qui leur permet de sonder les batteries, les chercheurs peuvent lire et écrire de l'information magnétique à l'échelle de l'électron dans des dispositifs spintroniques, les ions jouant le rôle de boutons de commande.

« De la même manière que nous pouvons utiliser un champ électrique pour amener le mouvement des ions à modifier le magnétisme dans une batterie, dit M. Miao, nous pouvons modifier le magnétisme dans un dispositif spintronique pour lire ou écrire de l'information, ou même traiter de l'information à l'aide de portes logiques. » [traduction]

Qu'il s'agisse de sonder des matériaux pour trouver un avantage quantitatif dans les batteries que nous utilisons, ou de construire les puissants dispositifs quantiques de l'avenir, ces nouveaux résultats prouvent que la pièce manquante pour résoudre un casse-tête est parfois déjà disponible. Il suffit de la placer au bon endroit.

CODES DE SURFACE : VERS L'INFORMATIQUE QUANTIQUE PRATIQUE À GRANDE ÉCHELLE [Contribution à la recherche fondamentale]
Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation
Publié en 2020 dans *Physical Review A 50th Anniversary Milestones*
Publié à l'origine le 18 septembre 2012 dans *Physical Review A*
https://journals.aps.org/pra/50th

Un article de recherche publié en 2012 par Matteo Mariantoni, professeur à l'IQC ainsi qu'au Département de physique et d'astronomie de l'Université de Waterloo, fait partie de la liste des articles marquants publiée pour le 50e anniversaire de *Physical Review A*.

Cette prestigieuse revue célèbre son 50e anniversaire en publiant une liste d'articles qui ont apporté une contribution importante aux domaines de la physique relevant de son champ d'action.

L'article intitulé *Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation* (Codes de surface : vers l'informatique quantique pratique à grande échelle) présentait à la communauté de l'informatique quantique une méthode nouvelle et plus accessible de correction d'erreurs quantiques et fournissait une première estimation de l'infrastructure nécessaire pour fabriquer un ordinateur quantique pratique fondé sur cette méthode.

Cet article a été cité plus d'un millier de fois.

« Quand nous avons écrit cet article, dit M. Mariantoni, je ne pensais pas qu'il aurait un tel impact. Il est devenu pour la communauté de l'informatique quantique un guide de référence sur la correction d'erreurs quantiques et sur la difficulté de construire un ordinateur quantique pratique. » [traduction]

Cet article a également marqué le début du passage du laboratoire à l'industrie de la recherche en informatique quantique. « Il a amené de nombreuses entreprises telles que Google et IBM à investir massivement en informatique quantique, poursuit M. Mariantoni, parce qu'il y avait ce nouvel aspect positif sur lequel travailler. » [traduction]

Ironiquement, l'article qui a eu tant d'impact a d'abord été un rapport interne. L'équipe de recherche de John Martinis et Andrew Cleland, au sein de laquelle M. Mariantoni faisait un postdoctorat, essayait de comprendre ce qui semblait être un article très prometteur sur la correction d'erreurs quantiques publié par les mathématiciens Robert Raussendorf et Jim Harrington en 2007. À l'époque, M. Raussendorf travaillait à l'Institut Périmètre, à Waterloo, en Ontario.

L'équipe a passé environ 9 mois à interpréter l'article et à traduire son langage mathématique complexe en quelque chose de concret pour des physiciens expérimentateurs. Quand elle a commencé à présenter ses travaux lors de diverses rencontres et qu'elle a vu l'enthousiasme des participants, elle a su qu'il valait la peine de soumettre ses travaux en vue de leur publication.

La suite fait partie de l'histoire.

Matteo Mariantoni était à l'Université de la Californie à Santa Barbara au moment de la publication de l'article, et ces travaux ont influencé depuis lors son parcours de

chercheur. « Cet article, dit-il, m'a aidé à prendre conscience de ce sur quoi je devais me concentrer. » [traduction]

Les 2 principales idées de l'article avaient un goût doux-amer pour les scientifiques qui cherchaient à construire le premier ordinateur quantique pratique.

D'une part, ils découvraient une méthode plus accessible de correction des erreurs quantiques, qui leur permettait de commencer à travailler sans tarder avec le matériel qu'ils avaient déjà. D'autre part, ils constataient que cette méthode exigeait un nombre astronomique de qubits — au moins un demi-milliard — pour donner un ordinateur quantique pratique doté d'un mécanisme de correction des erreurs quantiques.

Cette double révélation a suggéré une avenue de recherche à M. Mariantoni : peut-être que le matériel lui-même pourrait être suffisamment amélioré pour réduire le nombre et le caractère insoluble d'erreurs quantiques, de sorte que des calculs utiles avec correction des erreurs quantiques seraient possibles avec un nombre plus raisonnable de qubits.

À l'heure actuelle, M. Mariantoni et son équipe travaillent sur une manière entièrement nouvelle de déjouer les erreurs à l'aide de matériaux à bandes interdites phononiques.

« Nous essayons, dit-il, de combiner plusieurs techniques que nous connaissons pour améliorer les dispositifs supraconducteurs. Il ne s'agit pas d'éliminer ces erreurs mais d'en faire de *meilleures erreurs*. » [traduction]

Les erreurs quantiques demeurent un obstacle latent à l'informatique quantique pratique. Mais ces travaux fondamentaux sur la correction des erreurs quantiques par la méthode des codes de surface ont montré ce qui était possible et ce qui demeurait hors de portée, guidant des milliers de chercheurs pendant une décennie.

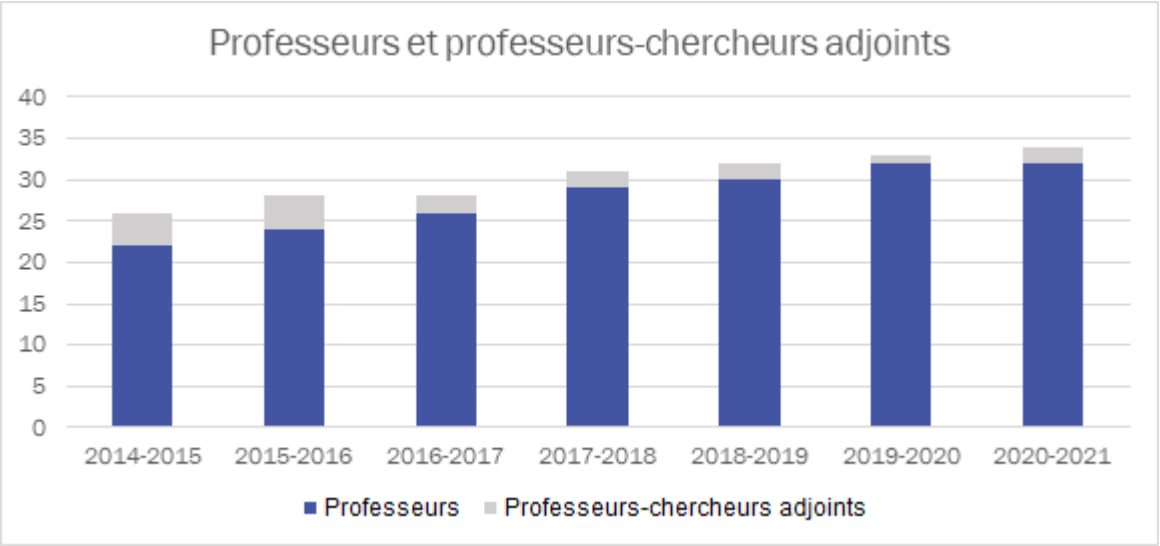
Recrutement — Corps professoral

En plus de la recherche et de la formation, l'IQC accorde chaque année une place importante aux activités de recrutement, afin de continuer d'attirer des théoriciens et expérimentateurs de premier plan dans une variété de disciplines. L'Institut compte actuellement 32 professeurs qui travaillent en équipe pour résoudre des problèmes difficiles concernant l'extension de systèmes quantiques complexes. En 2019-2020, l'IQC a accueilli un nouveau professeur-chercheur adjoint au sein de son équipe de scientifiques.

Après avoir obtenu des diplômes de 1er cycle en mathématiques et en informatique à l'Université de technologie de Sharif, à Téhéran, en Iran (2009), Pooya Ronagh a obtenu une maîtrise ès sciences et un doctorat en mathématiques à l'Université de la Colombie-Britannique, respectivement en 2011 et en 2016. Il s'est joint à l'IQC en 2017 à titre de postdoctorant, travaillant sous la direction de Raymond Laflamme et de Roger Melko, avant de devenir professeur-chercheur adjoint à l'IQC ainsi qu'au Département de physique et d'astronomie de l'Université de Waterloo.

M. Ronagh travaille sur les aspects algorithmiques du calcul quantique. Il étudie de nouvelles applications du calcul quantique en concevant et en analysant des algorithmes quantiques pour résoudre des problèmes de calcul qui, dans l'état actuel du calcul classique, exigent un apprentissage automatique coûteux et des ordinateurs à haute performance. La relation symbiotique entre calcul classique et calcul quantique est non seulement importante pour ouvrir des applications des ordinateurs quantiques, mais également cruciale pour les réaliser. Pooya Ronagh s'intéresse donc en outre à la théorie de l'optimisation et du contrôle afin d'améliorer les mécanismes hybrides quantiques-classiques employés pour le contrôle quantique, la correction d'erreurs quantiques et le calcul quantique insensible aux défaillances.

Le graphique ci-après montre la croissance du nombre de professeurs et de professeurs-chercheurs adjoints à l'IQC au cours des 7 dernières années.

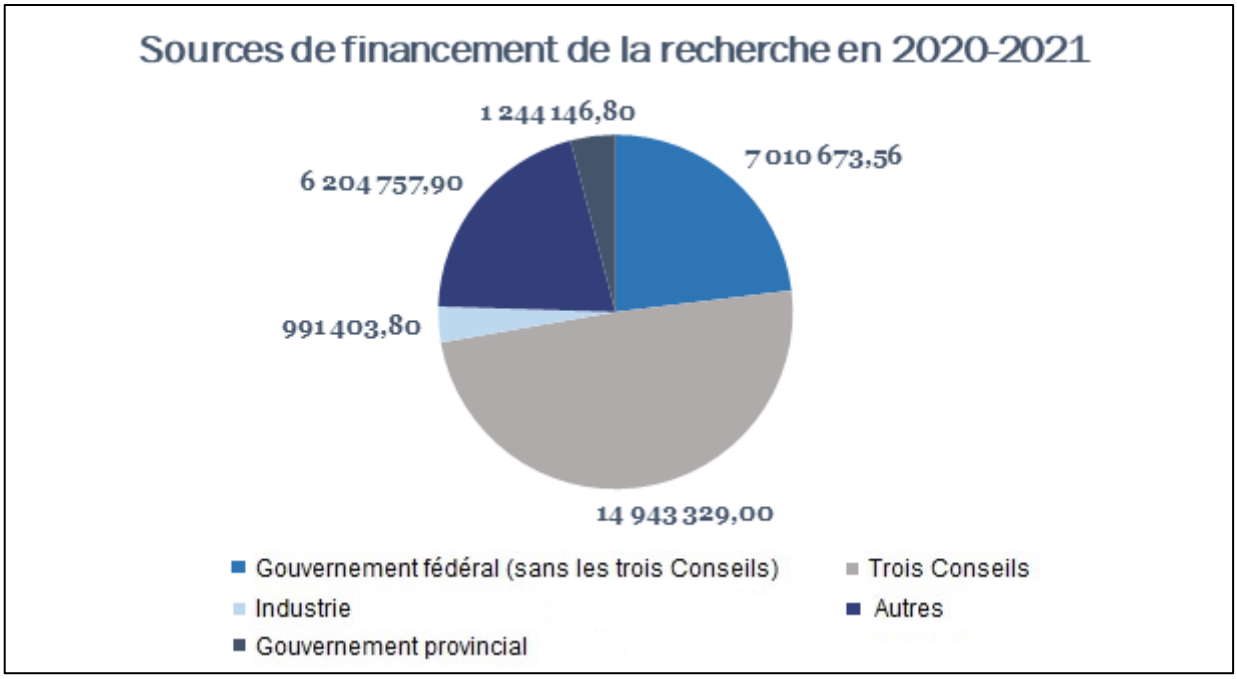


Recrutement — Associés de recherche

Dans le contexte du ralentissement des voyages internationaux en raison de la COVID-19, l'IQC a pu poursuivre des projets de recherche de classe mondiale en recrutant un certain nombre d'associés de recherche dans la cohorte de postdoctorants et de doctorants récemment diplômés présents à l'IQC. Sur les 15 associés de recherche que compte actuellement l'IQC, 7 ont été embauchés en 2020-2021. Trois de ces sept associés de recherche sont d'anciens postdoctorants à l'IQC, et un a obtenu son doctorat à l'IQC, ce qui témoigne de l'excellence des programmes d'études supérieures offerts par l'IQC depuis 20 ans. Les associés de recherche travaillent avec les chercheurs principaux de l'IQC à l'avancement de programmes et initiatives de recherche. L'IQC compte actuellement 32 professeurs, 2 professeurs-chercheurs adjoints et 15 associés de recherche, dont les noms sont énumérés à l'annexe C, à la page 74.

Prix, distinctions et chaires de recherche

Du 1er avril 2020 au 31 mars 2021, les chercheurs de l'IQC ont obtenu des fonds de recherche pour un montant total de 30 394 311 $. Les sources de financement sont diversifiées et comprennent des chaires de recherche, ainsi que des subventions du gouvernement du Canada, de la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), de partenaires industriels et d'autres organismes.



Les professeurs de l'IQC mènent des recherches de fort calibre sur l'information quantique qui continuent d'avoir un impact à l'échelle mondiale. Non seulement leurs recherches, mais aussi les nombreux prix et distinctions qu'ils reçoivent, témoignent de la qualité et des capacités de ces scientifiques. Dans un contexte de concurrence à l'échelle planétaire, ces prix et distinctions s'ajoutent à l'excellente réputation de l'IQC et du Canada en informatique quantique. Voici un résumé des prix et distinctions obtenus par des professeurs de l'IQC en 2020-2021 :

Professeur	Distinction	Source
Michal Bajcsy	Bourse de nouveau chercheur de l'Ontario	Ministère de la Recherche, de l'Innovation et des Sciences de l'Ontario
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG

Professeur	Distinction	Source
Jonathan Baugh	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Raffi Budakian	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Kyung Soo Choi	Fonds d'exploitation des infrastructures	Fondation canadienne pour l'innovation (FCI)
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Richard Cleve	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
David Cory	Fonds des leaders John-R.-Evans	FCI — Fonds des leaders John-R.-Evans
	Bourse de nouveau chercheur de l'Ontario	Ministère de la Recherche, de l'Innovation et des Sciences de l'Ontario
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
	Convention de recherche	Université du Maryland à College Park
Joseph Emerson	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
David Gosset	Programme *Informatique quantique*	ICRA
	Bourse IBM Q	IBM États-Unis
	Supplément d'accélération à la découverte du CRSNG	CRSNG
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Kazi Rajibul Islam	Bourse de nouveau chercheur de l'Ontario	Ministère de la Recherche, de l'Innovation et des Sciences de l'Ontario
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG

Professeur	Distinction	Source
Thomas Jennewein	Technologies quantiques Canada–Royaume-Uni	Honeywell International inc.
	Bourse de nouveau chercheur de l'Ontario	Ministère de la Recherche, de l'Innovation et des Sciences de l'Ontario
	Subvention Alliance du CRSNG	CRSNG
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Na Young Kim	Bourse de nouveau chercheur de l'Ontario	Ministère de la Recherche, de l'Innovation et des Sciences de l'Ontario
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Raymond Laflamme	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Debbie Leung	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Adrian Lupascu	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Norbert Lütkenhaus	Subvention de recherche et développement coopérative du CRSNG	CRSNG — RDC
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Matteo Mariantoni	Supplément d'accélération à la découverte du CRSNG	CRSNG
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Guo-Xing Miao	Bourse de nouveau chercheur de l'Ontario	Ministère de la Recherche, de l'Innovation et des Sciences de l'Ontario
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG

Professeur	Distinction	Source
Michele Mosca	Technologies quantiques Canada–Royaume-Uni	Crypto4A Technologies inc.
	Subvention Alliance du CRSNG	CRSNG
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
	Technologies quantiques Canada–Royaume-Uni	Qeynet inc.
	Technologies quantiques Canada–Royaume-Uni	Groupe Rhea
	MC-RCE — Réseau intelligent de cybersécurité	Université de Montréal
Christine Muschik	Bourse du programme des chercheurs mondiaux Azrieli de l'ICRA	ICRA
	Simulations quantiques d'interactions fondamentales à l'aide de l'intelligence artificielle	FNFR
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Ashwin Nayak	Puissance et limites des algorithmes quantiques	Fujitsu Laboratories of America inc.
Vern Paulsen	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Dmitry Pushin	Technologies quantiques pour l'imagerie de l'œil humain	FNFR
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Michael Reimer	Bourse de nouveau chercheur de l'Ontario	Ministère de la Recherche, de l'Innovation et des Sciences de l'Ontario
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Kevin Resch	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG

Professeur	Distinction	Source
Crystal Senko	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
William Slofstra	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
	Bourse de recherche Alfred-P.-Sloan en mathématiques	Fondation Alfred-P.-Sloan
Adam Wei Tsen	Bourse de nouveau chercheur de l'Ontario	Ministère de la Recherche, de l'Innovation et des Sciences de l'Ontario
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
	Bureau de la recherche de l'Armée des États-Unis	Armée des États-Unis
John Watrous	Programme *Traitement de l'information quantique*	ICRA
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
Christopher Wilson	Fonds des leaders John-R.-Evans	FCI — Fonds des leaders John-R.-Evans
	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG
	Démonstration de télémétrie d'objectif à l'aide de l'illumination quantique micro-ondes	Qubic inc.
Jon Yard	Subvention à la découverte du CRSNG	CRSNG

Remarque : Cette liste n'est pas exhaustive.

L'IQC compte également les titulaires de chaire de recherche suivants :

- Crystal Senko, chaire de recherche du Canada (2020-2025)
- Raymond Laflamme, chaire Mike-et-Ophelia-Lazaridis (2017-2027)
- David Cory, lauréat d'une chaire d'excellence en recherche du Canada (2017)
- Debbie Leung, chaire de recherche de l'université (2015-2022)
- Kevin Resch, chaire de recherche du Canada (2013-2023)

- Raffi Budakian, chaire financée par un fonds de dotation de l'Institut de nanotechnologie de Waterloo (2014-)
- Michele Mosca, chaire de recherche de l'université (2012-2022)
- Raymond Laflamme, chaire de recherche du Canada (2002-2022)

Infrastructure — Centre Quantum-Nano Mike-et-Ophelia-Lazaridis

En date de mars 2021, le Centre Lazaridis comptait 16 laboratoires de recherche opérationnels, et un autre laboratoire était en cours de finition pour Alan Jamison.

M. Jamison, qui est l'un des plus récents expérimentateurs à s'être joint à l'IQC, exploite actuellement un laboratoire existant pendant que les rénovations nécessaires pour aménager son laboratoire personnalisé se terminent. Parmi les laboratoires de recherche en activité, mentionnons les suivants :

- Laboratoire de photonique quantique
- Laboratoire de distribution quantique de clés par satellite
- Laboratoire de vérification quantique
- Laboratoire de matière quantique numérique
- Laboratoire de nanophotonique et d'optique quantique
- Laboratoire de contrôle quantique des ions piégés
- Laboratoire d'ingénierie de systèmes quantiques
- Laboratoire de nanoélectronique intégrée
- Laboratoire de matière quantique et de lumière ultrafroides
- Laboratoire d'optique quantique du groupe d'information quantique
- Laboratoire d'informatique quantique avec des ions piégés

En plus de construire de nouveaux laboratoires, l'IQC continue d'améliorer la qualité de ses infrastructures existantes. À titre d'exemple, le laboratoire de vulgarisation de la physique quantique s'est vu ajouter un studio d'enregistrement virtuel pour intéresser les élèves et d'autres publics avec des présentations en direct, y compris des démonstrations visuelles et un projecteur panneau. Une imprimante 3D a en outre été installée pour appuyer la réalisation de trousses pédagogiques pour élèves et professeurs.

Pour la communauté de l'IQC et la communauté élargie du campus, notre espace de 2 étages réservé aux séminaires (QNC 0101) est en cours de rénovation : mise à niveau de l'éclairage, amélioration des installations audiovisuelles, remise à neuf de l'espace physique. Lorsque les travaux seront terminés, cet espace pourra accueillir des activités de taille moyenne pour des auditoires variés.

Enfin, pour appuyer le milieu commercial et industriel, l'IQC a consacré des sommes importantes à l'acquisition d'un nouveau microscope électronique en transmission à balayage (METB) pour remplacer un appareil vieillissant dont l'entretien n'est plus assuré par son fabricant d'origine. Le nouveau METB JEM-F200 de JEOL — qui est muni d'un système GIF ER Continuum[MC] 1065 de Gatan pour l'analyse par spectroscopie de pertes d'énergie d'électrons (EELS) et par microscopie électronique en transmission filtrée en énergie (EFTEM) — sera livré au 1er trimestre de 2022. Il s'agit d'une acquisition majeure qui procurera à l'IQC l'un de ses appareils les plus polyvalents. L'ajout de cet instrument à nos grandes capacités d'analyse bénéficiera sans aucun doute aux membres actuels et futurs de nos laboratoires.

Infrastructure — Installation de fabrication et caractérisation nanométriques quantiques

L'Installation de fabrication et caractérisation nanométriques quantiques (en abrégé QNFCF pour *Quantum-Nano Fabrication and Characterization Facility*) prend en charge 3 laboratoires de la section de métrologie du Centre Quantum-Nano : le laboratoire TEM, le laboratoire FIB et le laboratoire de préparation d'échantillons secs. Ouverte aux chercheurs des milieux gouvernemental, industriel et universitaire, la QNFCF a enregistré au cours de la dernière année 15 326 heures d'utilisation d'équipement consignées par les utilisateurs du laboratoire. La baisse du nombre d'heures d'utilisation est due à la pandémie de COVID-19 :

- les laboratoires ont été forcés de fermer le 18 mars 2020, et la QNFCF est restée complètement fermée jusqu'au 13 juillet 2020 en raison des mesures sanitaires;
- depuis juillet 2020, les heures d'ouverture de l'installation sont réduites de 64 %; plus précisément, la QNFCF n'est ouverte que 60 heures par semaine, alors qu'elle était auparavant ouverte en permanence (168 heures par semaine);
- les restrictions liées à la distanciation physique ont également pu avoir des effets sur l'utilisation de l'équipement de la QNFCF.

Par contre, les données récentes montrent une tendance à une utilisation croissante et élargie de la QNFCF. En voici quelques exemples :

- malgré la réduction des heures d'ouverture, le nombre d'heures d'utilisation d'équipement augmente tous les mois depuis janvier 2021;
- le nombre d'heures d'utilisation d'équipement consignées a été de 2 769 en mars 2021, davantage que les 2 697 heures consignées en février 2020 (avant la pandémie); c'est beaucoup, compte tenu des heures d'ouverture encore limitées (seulement 60 heures par semaine);
- les heures d'ouverture seront probablement augmentées plus tard au cours de l'exercice 2021-2022, avec l'amélioration de la situation sanitaire;

- plus de 700 heures de formation pratique à l'utilisation de l'équipement; de plus, le personnel d'ingénierie des procédés fournit dans le cadre de son travail des centaines d'heures de soutien et de conseils aux membres de la QNFCF;
- plus de 2 400 heures d'activités d'élaboration de procédés ont résulté en la création et la caractérisation de nombreux nouveaux procédés, et par plusieurs nouveaux rapports techniques, pour le bénéfice de tous les utilisateurs.

Au cours de l'année écoulée, 154 personnes affiliées à 62 groupes de recherche distincts de l'Université de Waterloo et de partout au Canada ont utilisé les installations de la QNFCF pour leurs projets de recherche respectifs.

Il vaut également la peine de mentionner que pendant la pandémie, la QNFCF a fourni une infrastructure cruciale pour de multiples efforts de recherche sur la COVID-19. En voici quelques exemples :

- recherches sur des particules semblables au virus ou sur des protéines virales (p. ex. les spicules du SRAS-CoV-2) en solution; l'objectif visé est de mieux comprendre le mécanisme d'entrée du SRAS-CoV-2 dans la cellule hôte et l'interaction entre la protéine externe du SRAS-CoV-2 (le spicule) et les médicaments ou les anticorps;
- mise au point de détecteurs et autres dispositifs aux rayons X en contraste de phase, qui sont cruciaux pour la recherche sur la COVID-19, en particulier l'efficacité de masques réutilisables;
- imagerie de revêtements métalliques et d'oxydes de métal antivirus sur les tissus de polypropylène utilisés dans les masques N95.

En mettant à profit le résonateur térahertz (THz) de haute qualité, les chercheurs visent à créer un environnement fiable pour la détection et l'identification biomoléculaires *in vivo*, en temps réel et à faible coût. Les biocapteurs THz pourraient jouer un rôle crucial dans les efforts contre la pandémie de COVID-19.

L'IQC ainsi que les programmes de TQT (Technologies quantiques transformatrices) et du FERAC appuient le fonctionnement de la QNFCF et ont fourni en 2020-2021 plus de 760 000 $ en salaires du personnel, acquisitions d'équipement et contrats de service portant sur l'équipement.

Infrastructure — Centres d'avancement de la recherche (RAC)

Au 31 mars 2021, les bâtiments RAC1 et RAC2 abritaient les 7 laboratoires de recherche opérationnels suivants :

- Laboratoire de matériaux et dispositifs quantiques (QMAD)
- Laboratoire de dispositifs photoniques quantiques
- Laboratoire d'innovation quantique (QuIN)
- Laboratoire de photonique quantique
- Laboratoire d'électronique de spin cohérente
- Laboratoire d'imagerie nanométrique par résonance magnétique
- Laboratoire d'exploration quantique

Dans le bâtiment RAC1, la conception et la mise sur pied d'un espace d'exploration quantique sont terminées. Cet espace servira aux étudiants à la nouvelle maîtrise en physique (technologie quantique) offerte à l'Université de Waterloo en partenariat avec l'IQC et TQT. Ce laboratoire donne aux étudiants et aux visiteurs un accès à des systèmes quantiques d'un véritable calibre de recherche, pour l'acquisition de connaissances et la réalisation d'expériences de laboratoire. Les élèves du secondaire et les étudiants de 1er cycle universitaire qui participent à des programmes tels que QCSYS (*Quantum Cryptography School for Young Students* – École de cryptographie quantique pour jeunes étudiants) et USEQIP (*Undergraduate School on Experimental Quantum Information Processing* – École de 1er cycle sur le traitement quantique expérimental de l'information) acquièrent une expérience pratique diversifiée avec de vrais systèmes. Dans l'avenir, un grand nombre d'experts de l'industrie et de visiteurs pourront y voir de véritables dispositifs quantiques en action.

Collaborations et recherche de nouveaux partenariats

La communauté scientifique de l'IQC apprécie les occasions de collaboration, que ce soit avec d'autres équipes de recherche et universités ou avec des administrations gouvernementales, des organismes à but non lucratif et des entreprises privées. En 2020-2021, les professeurs de l'IQC ont fait état de 113 collaborations actives avec 103 organisations distinctes partout dans le monde. Voici quelques exemples de telles organisations, qui comprennent des universités, des instituts de recherche, des entreprises privées et des organismes gouvernementaux. L'annexe D, à la page 75, donne la liste complète de ces collaborations pour chaque membre du corps professoral de l'Institut.

- Anyon Systems
- Honeywell (auparavant ComDev)
- Conseil national de recherches du Canada
- Agence spatiale canadienne
- Xiphos Systems
- Institut national d'optique, Canada
- Université de la Californie du Sud
- Institut fédéral suisse de technologie
- InfoSec Global
- Université d'Ottawa
- DARPA
- Académie chinoise des sciences
- Excelitas
- Institut Périmètre de physique théorique
- Université du Maryland
- Mitacs
- Laboratoires nationaux Sandia
- Laboratoires du NIST à Boulder
- Université Cornell
- Université de Vienne
- Université de Montréal
- ID Quantique
- Centre de technologies quantiques
- Technion, Institut de technologie d'Israël
- Université du Texas à Austin
- Université de Calgary

En plus de maintenir et d'intensifier les liens établis, les scientifiques et parties prenantes de l'IQC cherchent continuellement à conclure de nouveaux partenariats à l'appui des objectifs stratégiques de recherche de l'Institut. Cette année, l'IQC a eu des contacts et des discussions menant à des partenariats avec les organismes suivants :

- Des rencontres entre l'IQC et le Bureau de la conseillère scientifique en chef à Ressources naturelles Canada (RNCan) ont mené à des discussions sur les applications possibles des recherches actuelles et futures de l'IQC dans le secteur des ressources naturelles. Comme ce secteur est bien placé pour être l'un des premiers à adopter des technologies quantiques, ces discussions ont permis d'identifier des domaines potentiels de collaboration. Dans cette optique, l'IQC et le RNCan ont prévu une série de rencontres entre chercheurs et des tables rondes prévues sous forme virtuelle en mai 2021.

- L'IQC a participé à l'atelier de la NSF (Fondation nationale des sciences des États-Unis) sur l'enseignement du génie quantique, qui s'est tenu les 25 et 26 février 2021. Cet atelier a porté sur les manières d'introduire l'enseignement de la physique quantique au 1er cycle dans des universités américaines. L'IQC et l'Université de Waterloo ont été reconnus comme chefs de file à l'échelle internationale dans ce domaine : Martin Laforest, anciennement de l'IQC, a été invité à présenter un exposé intitulé *Building a Quantum Workforce Starts Early* (Il faut commencer tôt à former des travailleurs dans le domaine quantique); John Donohue, actuellement gestionnaire principal, vulgarisation scientifique, a été invité à participer à la rédaction d'un article décrivant une feuille de route pour l'enseignement du génie quantique, qui sera publié dans *Physical Review X Quantum*.
- L'IQC a mis l'accent sur l'établissement de relations avec des incubateurs d'entreprises et des sociétés canadiennes de capital de risque, afin de mettre en évidence des occasions d'apprentissage et de formation pour les chercheurs de l'IQC intéressés à apprendre comment commercialiser leurs travaux. Voir à la page 62, dans la section sur l'objectif E, des renseignements plus détaillés sur les rencontres et activités qui se sont tenues en 2020-2021.

Objectif B

Offrir aux étudiants des occasions d'acquérir et d'appliquer de nouvelles connaissances, pour le bénéfice du Canada, afin de stimuler l'innovation et les investissements dans les activités de R-D grâce à la formation d'un personnel hautement qualifié.

Résultats visés : Soutenir les étudiants et leur offrir des occasions d'acquérir et d'appliquer de nouvelles connaissances.

Activités prévues

- Poursuivre la croissance des programmes d'études supérieures de l'IQC et y attirer les meilleurs talents.
- Lancer un nouveau programme — M.Sc. en physique (technologie quantique) — qui procurera aux étudiants un apprentissage pratique des environnements quantiques, afin de les préparer à mener la croissance dans de nouvelles industries quantiques.
- Susciter au moins 200 demandes d'admission dans les programmes d'études supérieures de l'Université de Waterloo et de l'IQC.
- Intensifier les liens avec les programmes de 1er cycle d'universités ontariennes et canadiennes.
- Continuer d'organiser des conférences, ateliers, séminaires et cours ciblés et opportuns, en fonction de la levée des restrictions logistiques.
- Tenir jusqu'à 10 ateliers et séminaires virtuels.
- Organiser jusqu'à 10 ateliers et conférences en partenariat avec des organismes canadiens et étrangers.

Recrutement de postdoctorants

Les postes de boursier postdoctoral donnent à de jeunes scientifiques l'occasion de bénéficier d'un mentorat supplémentaire, de publier des travaux et d'acquérir de l'expérience en recherche et en enseignement. En 2020-2021, l'IQC a recruté 17 nouveaux postdoctorants — dont 4 ont récemment complété leur doctorat à l'IQC. Cette capacité de recrutement interne est due à la force des programmes d'études supérieures de l'IQC, qui permet à l'Institut de poursuivre des recherches de classe mondiale et d'offrir à ses récents diplômés la possibilité d'entreprendre la prochaine étape de leur carrière, malgré les restrictions draconiennes en matière de voyages.

Au cours de l'année écoulée, l'IQC a eu en tout à son emploi 85 postdoctorants, dont 15 femmes. Comme le souligne le tableau ci-après, les nouvelles recrues sont venues d'institutions canadiennes et étrangères de premier plan.

L'annexe E, à la page 78, donne la liste complète des postdoctorants à l'IQC.

Canada	Outre-mer	États-Unis
Université de Sherbrooke	Université de Warwick, Royaume-Uni	Université de la Louisiane
Université de Toronto	Centre de technologies de l'information sécuritaires, Université Queen's de Belfast, Royaume-Uni	Université de la Californie à Los Angeles
Université de Waterloo	Institut national de la recherche scientifique (INRS), doctorat conjoint avec l'Université´ de Bordeaux, France	

Depuis 2015, 14 anciens doctorants de l'IQC ont obtenu des bourses postdoctorales. Ils forment un groupe de jeunes chercheurs qui se sont engagés à faire progresser leurs travaux en information quantique à l'IQC. En plus d'attirer des candidats hautement qualifiés, les bourses postdoctorales de l'IQC constituent une méthode éprouvée de recrutement de futurs professeurs. Avant de devenir professeur-chercheur adjoint à l'IQC, Pooya Ronagh a fait un postdoctorat à l'IQC.

Recrutement d'étudiants diplômés

Au cours de la dernière année, l'IQC a accueilli 48 nouveaux étudiants diplômés sur un total de 434 candidatures, ce qui porte à 197 le nombre total d'étudiants à la maîtrise et au doctorat (respectivement 84 et 113). Comme pour les postdoctorants, l'IQC a connu en 2020-2021 une légère baisse du nombre d'étudiants diplômés. Cette baisse est due aux restrictions accrues sur les voyages, aux exigences incertaines envers les arrivants, ainsi qu'à l'accès réduit aux laboratoires et aux salles de classe. Avec l'amélioration des conditions sanitaires au cours des 4 prochains mois, l'IQC s'attend à ce que ces nombres retrouvent leur tendance à l'augmentation.

Canada	Outre-mer	États-Unis
Université McGill	Université d'État de Moscou	Université Dartmouth College
Université de Toronto	Université Jiaotong de Beijing et Université de Waterloo (2+2)	Université de la Californie à Berkeley
Université de Waterloo	Institut indien de technologie de Kharagpur	Institut de technologie du Massachusetts
Université Memorial de Terre-Neuve	Université de Cambridge	Université Harvard
Université de la Colombie-Britannique	Université Monash	Université Yale

L'annexe F, à la page 79, donne la liste complète des étudiants diplômés inscrits à l'IQC au cours du dernier exercice.

Bourses accordées à des étudiants diplômés

Les esprits les meilleurs et les plus brillants font des études et des recherches à l'IQC, se méritant des prix et des bourses pour leurs travaux. Non seulement ces distinctions procurent aux étudiants le financement nécessaire pour qu'ils se consacrent à leurs études, mais elles témoignent aussi de leur excellence en recherche. Au cours de la dernière année, 166 étudiants de l'IQC ont obtenu en tout 452 bourses (en plus de 18 extensions de bourse accordées à des étudiants de l'IQC en raison de la COVID-19).

Sur les 166 étudiants de l'IQC qui ont obtenu des bourses, 31 étaient des femmes et 10 autres n'avaient pas indiqué leur sexe. Ces étudiants ont obtenu 127 (28 %) des 452 bourses, ce qui témoigne de l'engagement de l'IQC envers l'équité, la diversité et l'inclusion. Afin de promouvoir ces objectifs, l'IQC a doté et attribué en 2020-2021 la *bourse d'études supérieures Raymond-Laflamme-et-Janice-Gregson pour les femmes en informatique quantique* en 2020-2021. Pour rendre compte de ses progrès en la matière, l'IQC a annoncé en mars 2021 son inscription au Défi 50-30 d'Innovation, Sciences et Développement économique Canada.

Voici quelques-unes des bourses majeures reçues par nos étudiants à la maîtrise et au doctorat :

- 16 bourses Mike-et-Ophelia-Lazaridis
- 1 bourse d'admission de l'IQC
- 47 bourses pour étudiants étrangers – Doctorat
- 30 bourses pour étudiants étrangers – Maîtrise
- 1 bourse d'excellence de l'IQC
- 2 bourses David-Johnston de l'IQC pour le rayonnement scientifique
- 6 bourses d'études supérieures Alexander-Graham-Bell du CRSNG – Doctorat
- 8 bourses d'études supérieures Alexander-Graham-Bell du CRSNG – Maîtrise
- 6 bourses d'études supérieures du CRSNG – Doctorat
- 2 bourses d'études supérieures du Canada Vanier du CRSNG
- 5 bourses d'études supérieures de l'Ontario
- 33 bourses d'études supérieures du recteur
- 1 bourse d'études supérieures Raymond-Laflamme-et-Janice-Gregson pour les femmes en informatique quantique
- 1 bourse Trillium de l'Ontario
- 3 bourses d'études supérieures Reine-Elizabeth-II en science et technologie

Recrutement d'étudiants de 1er cycle

L'IQC offre aux étudiants de 1er cycle universitaire de nombreuses occasions d'être en contact avec la recherche. En même temps qu'ils posent leur candidature à l'USEQIP (*Undergraduate School for Experimental Quantum Processing* – École de 1er cycle sur le traitement quantique expérimental de l'information), ils peuvent aussi solliciter un stage de recherche qui se déroulera après l'école d'été. Les étudiants de 1er cycle peuvent de plus poser directement leur candidature à une bourse de recherche. Les incertitudes concernant les voyages, les séjours et l'accès aux bâtiments au début de la pandémie de COVID-19 ont entraîné l'annulation de l'USEQIP pour mai 2020, mais le programme de stages de recherche de 1er cycle s'est poursuivi à distance. Les postes d'assistant de recherche de 1er cycle offrent une occasion unique de travailler avec un professeur ou un professeur-chercheur adjoint et d'entrer en relation avec notre communauté de recherche interdisciplinaire.

Des programmes tels que l'USEQIP incitent d'anciens participants à revenir à l'IQC pour y poursuivre leurs études. Depuis la création de l'USEQIP en 2009, 22 anciens participants sont revenus à l'IQC pour y faire des études supérieures. Les participants à l'USEQIP font souvent remarquer que les études supérieures semblent plus accessibles après la participation au programme, et qu'ils sont particulièrement attirés par l'IQC :

> *« L'USEQIP est un programme rare, formé d'une combinaison d'exposés et de séances de laboratoire, qui plonge au cœur de l'information quantique d'une manière à laquelle nous n'avons pas accès par ailleurs dans nos études de 1er cycle […] j'ai l'impression que tous les participants ont beaucoup rehaussé leurs ambitions universitaires. Des choses qui semblaient hors de portée dans le passé ne le sont plus maintenant. » [traduction]*

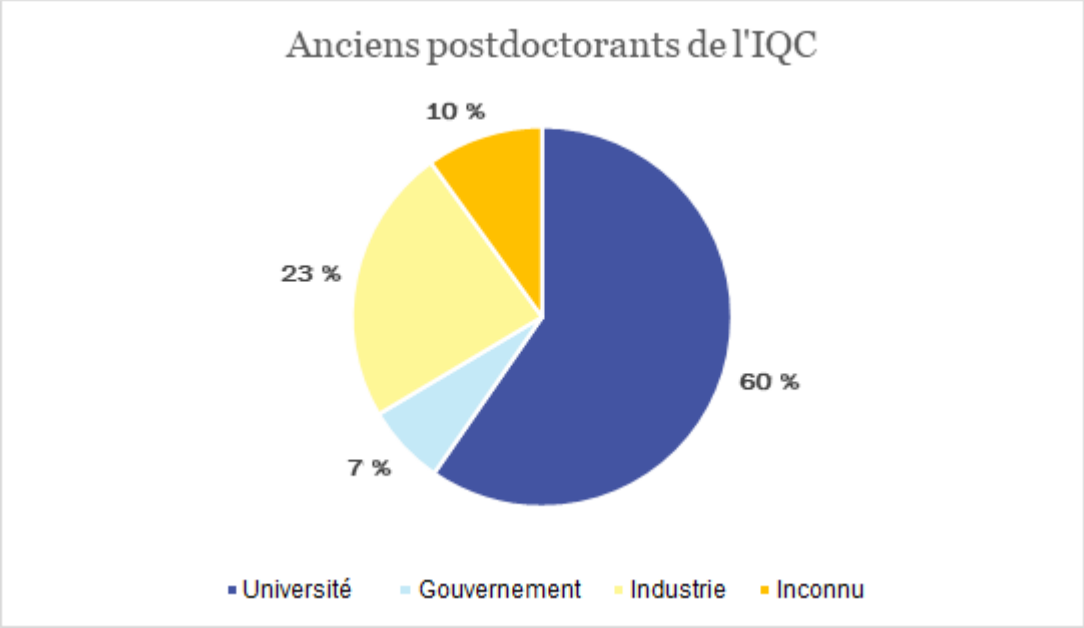
> *« L'USEQIP m'a beaucoup appris sur le traitement de l'information quantique et m'a aussi beaucoup révélé sur la vie universitaire — ce qui sera très utile pour ma carrière à venir, peu importe ce qu'elle sera!*
>
> *« J'ai beaucoup aimé mon expérience à l'IQC et j'envisage sérieusement d'y faire ma maîtrise. » [traduction]*

Anciens de l'IQC : Former la main-d'œuvre du secteur quantique

Après avoir quitté le campus, les anciens étudiants et postdoctorants de l'IQC ont une influence dans les secteurs universitaire, industriel et gouvernemental partout dans le monde. Ils contribuent au progrès du monde quantique dans des secteurs tels que les opérations bancaires, les communications et la technologie, et ils inspirent de futures générations d'innovateurs par leur passion, leur action et leur ingéniosité.

Anciens postdoctorants

Après avoir quitté le milieu universitaire, les anciens postdoctorants de l'IQC sont considérés par leurs pairs comme des modèles, des visionnaires et des chefs de file de l'industrie quantique. Après avoir quitté le campus, nos anciens ont une influence dans les secteurs universitaire, industriel et gouvernemental partout dans le monde. Le graphique ci-après résume où les anciens postdoctorants de l'IQC œuvraient au 31 mars 2021.



Profils d'anciens postdoctorants

Dave Touchette

Après avoir fait un stage postdoctoral à l'IQC en 2019, Dave Touchette est retourné dans son Québec natal, où il a accepté un poste de professeur adjoint à l'Université de Sherbrooke. Il est devenu le premier professeur du Département d'informatique à se joindre à l'Institut quantique, dans le prolongement naturel des recherches qu'il a effectuées à l'IQC.

À l'IQC, M. Touchette a travaillé avec divers professeurs, dont Ashwin Nayak, Debbie Leung et Norbert Lütkenhaus. Ses recherches actuelles portent sur la complexité algorithmique, la théorie de l'information et la communication quantique. Il vise à former non seulement de futurs chercheurs, mais aussi une main-d'œuvre capable de répondre rapidement aux besoins d'une industrie en pleine évolution dans le domaine quantique.

Jay Gambetta

Jay Gambetta a terminé en 2011 son stage postdoctoral à l'IQC, où ses recherches portaient sur le traitement de l'information quantique à l'aide de qubits supraconducteurs. Pendant son séjour à l'IQC, il a obtenu une bourse junior de l'Institut canadien de recherches avancées (ICRA, 2009). Depuis qu'il a quitté l'IQC, il continue de faire des recherches sur le traitement de l'information quantique au Centre de recherches Thomas-J.-Watson à Yorktown Heights, dans l'État de New York, où il est Fellow et vice-président, informatique quantique, chez IBM.

Les travaux de M. Gambetta, entre autres sur les qubits supraconducteurs, sont prometteurs pour l'avenir du calcul quantique et la mise au point d'un ordinateur quantique. Analogue quantique de la loi de Moore, l'idée selon laquelle le volume quantique double tous les ans est connue sous le nom de « loi de Gambetta ».

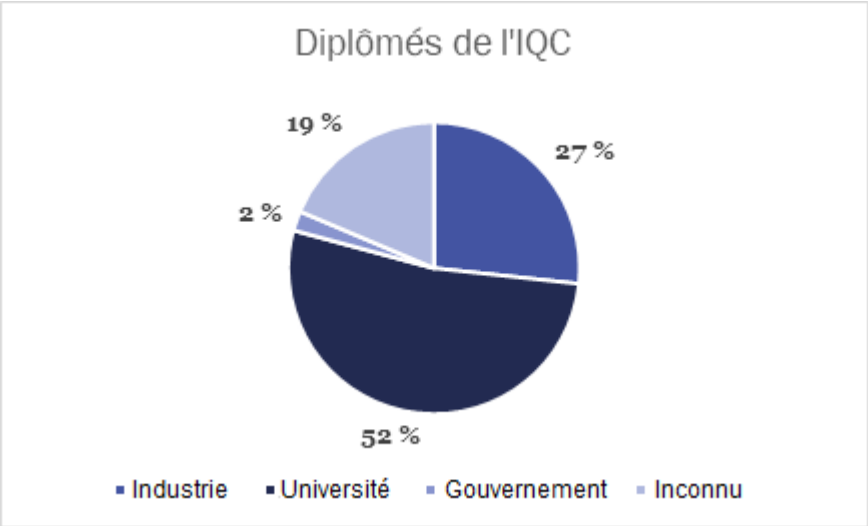
Razieh Annabestani

Razieh Annabestani a obtenu son doctorat à l'IQC en 2016, sous la direction du professeur David Cory. Ses recherches se situaient principalement à la jonction de la théorie de l'information quantique et de la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire. Elle a ensuite poursuivi ses travaux à l'IQC à titre de postdoctorante, se concentrant sur l'IRM nanométrique, qui vise la détection ultrasensible de spins électroniques et nucléaires, et qui pourrait avoir des répercussions dans des domaines allant de la médecine à la science des matériaux.

Actuellement conseillère en matière de stratégie quantique au gouvernement du Canada, Mme Annabestani travaille à faire en sorte que le Canada et l'IQC développent leurs solides programmes quantiques et maintiennent leur position de chefs de file de la recherche dans le domaine.

Anciens étudiants diplômés

Cette année, l'IQC est fier de rapporter la remise de 17 diplômes de maîtrise et de 21 doctorats, ce qui porte à 307 le nombre total de diplômés de l'IQC. Ces chercheurs occupent des postes variés, dans des universités, des entreprises et des administrations publiques, en Ontario et dans le monde entier. Au 31 mars 2021, 34 diplômés de l'IQC, dont 6 femmes, travaillaient dans le domaine de l'information quantique au Canada, et 18 autres étaient postdoctorants dans des universités canadiennes. Le graphique ci-après montre les secteurs où les diplômés de l'IQC sont allés après leurs études.



Profils d'anciens étudiants diplômés

Helen Percival (M.Sc.A. en génie électrique et informatique — information quantique)

Maintenant ingénieure de systèmes chez SED Systems, entreprise de gestion et de communications satellitaires, Helen Percival utilise les compétences qu'elle a acquises en travaillant à l'IQC sur de grands projets avec son directeur de recherche, Christopher Wilson. Son mémoire de maîtrise portait sur l'utilisation expérimentale de qubits supraconducteurs pour le contrôle de micro-ondes.

« C'est pendant mon séjour à l'IQC, que j'ai trouvé ma passion pour la conception technique, dit-elle. La formation que j'y ai acquise m'a préparée à travailler dans un domaine interdisciplinaire, en m'apprenant à faire le lien entre différents concepts tout en ayant un portrait global en tête. » [traduction]

Mária Kieferová (Ph.D. en physique — information quantique)

Pendant ses études en physique théorique à l'Université Comenius de Bratislava, en Slovaquie, Mária Kieferová a fait des stages à l'IQC, à titre d'étudiante à la maîtrise, avec Michele Mosca et Nathan Wiebe, ce qui a facilité sa venue à Waterloo pour faire un doctorat en physique au Département de physique et d'astronomie ainsi qu'à l'IQC.

Pendant ses études de doctorat, elle s'est concentrée sur la conception de nouvelles techniques algorithmiques pouvant servir dans une variété d'applications, par exemple en apprentissage automatique ou en chimie. « J'aime pouvoir faire une différence en m'instruisant sur de nouvelles applications de l'informatique quantique » [traduction], dit-elle.

Mme Kieferová a senti que ses travaux étaient reconnus lorsqu'elle a reçu en 2019 un prix d'excellence en recherche de l'IQC. « Je suis très heureuse d'avoir étudié à l'IQC, dit-elle. Étant une femme et originaire d'un petit pays, je n'ai jamais eu le sentiment d'appartenir

à la communauté scientifique. Être ainsi récompensée pour mes recherches signifie que, tout compte fait, je me débrouille assez bien. » [traduction]

Après avoir obtenu son doctorat, Mariá Kieferová a commencé un postdoctorat à l'Université technologique de Sydney, en Australie, où elle continue de travailler sur les algorithmes quantiques, mais où elle étudie aussi la théorie de la complexité et la possibilité de relier un jour des ordinateurs quantiques dans un réseau Internet quantique. Elle reste également en contact avec l'industrie, en travaillant à temps partiel pour Zapata Computing, à la mise au point de logiciels pour les ordinateurs quantiques qui verront le jour à court terme.

Corey Rae McRae (Ph.D. en physique — information quantique)
Pendant ses études de doctorat à l'IQC, Corey Rae McRae faisait des recherches sur l'encapsulage 3D et l'intégration de circuits quantiques supraconducteurs, de même que sur les matériaux employés dans ces circuits. Ses travaux expérimentaux effectués dans le laboratoire de matière quantique numérique avec le chercheur Matteo Mariantoni comprenaient la simulation, la conception et la mise au point de processus de fabrication de résonateurs hyperfréquences à supraconductivité, ainsi que la conception d'une méthode d'encapsulage et de liaison compatible avec des circuits quantiques supraconducteurs.

Actuellement postdoctorante à l'Institut national des normes et de la technologie des États-Unis (NIST) à Boulder, au Colorado, Mme McRae utilise des techniques de fabrication de pointe pour construire des qubits robustes, poursuivant ainsi ses recherches en vue de la réalisation d'un ordinateur quantique universel extensible. Elle dirige en outre le Banc d'essai quantique cryogénique de Boulder à l'Institut JILA du Colorado.

Mme McRae attribue à l'IQC le mérite de l'avoir préparée à une carrière en informatique quantique : « Quand je suis arrivée à l'IQC, je connaissais très peu de choses sur le calcul et l'information quantiques. L'IQC m'a donné une bonne vision de ces domaines et de leurs liens, ce qui est essentiel pour entreprendre une carrière en informatique quantique. » [traduction]

Un nouveau programme de M.Sc. en physique (technologie quantique)

L'IQC est né d'un investissement de lancement effectué par un entrepreneur visionnaire dans un domaine qui commençait tout juste à émerger en 2002. Au bout de 20 ans de recherches de classe mondiale dans 3 disciplines, l'informatique quantique commence à faire partie des plans d'affaires de grandes organisations multinationales et suscite la création d'entreprises à un rythme impressionnant.

L'IQC passe à l'étape suivante pour soutenir une industrie émergente qui est en grande partie à l'origine de la conception et de la mise sur pied d'un nouveau programme de maîtrise visant à fournir la main-d'œuvre hautement qualifiée dont ces nouvelles entreprises auront besoin. Ce programme, qui sera lancé en septembre 2021, préparera

ses étudiants à se joindre à l'industrie quantique, à participer au lancement d'entreprises dans ce domaine, à effectuer des analyses et à soutenir l'adoption des technologies quantiques, ainsi qu'à entreprendre des études de doctorat. Ce programme de 12 mois constitué de cours fournira à ses participants une connaissance approfondie de la science et de la technologie des systèmes quantiques, de même qu'un apprentissage pratique sur des systèmes supraconducteurs, atomiques, moléculaires, optiques et à l'état solide. L'IQC tient à poursuivre son œuvre de pionnier dans le domaine de l'information quantique et a hâte de former le personnel hautement qualifié qui fera progresser cette industrie naissante.

Intensification des liens

L'IQC a poursuivi en mode virtuel ses efforts de recrutement d'étudiants diplômés, grâce à des rencontres de son personnel avec des étudiants lors d'activités telles que la Conférence canadienne des étudiants de 1er cycle en physique (CUPC), la Conférence canadienne des étudiantes de 1er cycle en physique (CCUWiP), la Conférence de physique et d'astronomie des universités de l'Atlantique (AUPAC), de même que les salons de recrutement de l'Université McGill et de l'Université de Waterloo.

Pendant la pandémie, des chercheurs de l'IQC ont continué de faire de nombreux exposés en format virtuel partout au Canada et dans le monde. En voici quelques exemples.

- Six professeurs de l'IQC ont participé aux Journées quantiques en janvier 2021, avec une présence lors de chacune des 3 journées de la conférence : Michele Mosca, Norbert Lütkenhaus, Thomas Jennewein, Richard Cleve, David Gosset et Christopher Wilson.
- John Donohue, gestionnaire principal, vulgarisation scientifique, à l'IQC, a animé une table ronde sur les défis à relever au cours des 5 prochaines années en matière de recherche et développement dans le domaine quantique.

Pour recruter et conserver des scientifiques de talent, il faut entre autres créer un milieu de recherche solide et stimulant. À titre d'institut de premier plan, l'IQC est fier de participer à de nombreuses conférences, ateliers et séminaires nationaux et internationaux animés par et pour des chercheurs. Il s'agit là d'une priorité importante, car les conférences et exposés favorisent la collaboration et les échanges d'idées.

Même si la pandémie a eu des répercussions importantes sur les activités de l'IQC à ce chapitre, il vaut la peine de mentionner que le passage à des présentations en ligne a permis de mesurer le grand intérêt pour le domaine quantique, et les résultats ont été encourageants. Certains engagements ont dû être annulés, mais d'autres ont été adaptés en format virtuel et ont rejoint un public sensiblement plus nombreux, grâce à la levée des obstacles géographiques et financiers à la participation.

Ateliers

Atelier Schrödinger, du 30 novembre au 6 décembre

À la fin novembre et au début décembre, l'IQC a tenu son 6e atelier annuel Schrödinger pour enseignants. Ceux-ci ont assisté à des exposés en mode virtuel sur les fondements de la physique quantique et ont étudié des manières d'intégrer la technologie quantique dans leur programme d'enseignement. Cet atelier a également donné aux participants la capacité de se renseigner sur les progrès récents dans le domaine.

En 2020-2021, l'atelier Schrödinger a eu lieu en ligne et a connu une importante hausse de participation. En 2019-2020, l'IQC avait pu accueillir 39 participants en personne. En 2020-2021, l'IQC a accueilli 130 personnes, dont 112 enseignants très intéressés[2] par le programme. Cela représente une augmentation de près de 300 % de la participation — ce qui ne serait pas possible en personne à l'heure actuelle. Des instructeurs géographiquement éloignés, dont au moins un de l'Arizona, ont pu participer à l'atelier.

Conférences majeures

L'IQC maintient son engagement à organiser des conférences à Waterloo et planifie activement des conférences pour le moment où elles pourront se tenir en toute sécurité pour une grande variété de participants. Le moment où cela pourra se produire dépend de la fin de la pandémie actuelle. Dans le passé, l'IQC a organisé des conférences majeures pour des enseignants du secondaire, de jeunes postdoctorants et des chercheurs couvrant tout le spectre de l'informatique quantique.

Séminaires et colloques

Avec de fréquentes activités, le calendrier de séminaires et colloques de l'IQC maintient l'intérêt des chercheurs de l'IQC et des scientifiques invités. Au cours de la dernière année, l'IQC a organisé 34 séminaires, dont 17 ont été animés par et pour des étudiants, et 10 colloques. La série de séminaires d'étudiants lancée en 2019-2020 continue de créer des liens entre les membres de l'IQC, en permettant aux étudiants de faire connaître les résultats de leurs recherches actuelles, de prendre connaissance des travaux menés en dehors de leur domaine immédiat de recherche, et d'avoir une occasion de perfectionner leurs techniques de présentation. La diminution du nombre de séminaires est due à des annulations liées à la COVID en avril ainsi qu'à l'incertitude persistante quant à l'accès au campus, avant que les séminaires ne passent à un format en ligne au cours de l'été 2020.

Ces séminaires (à l'exception des séminaires d'étudiants) et colloques ont été téléversés dans le canal YouTube de l'IQC, où ils ont fait l'objet de plus de 5 000 accès et plus de 500 heures de visionnement, ce qui constitue un ajout significatif à la participation en

[2] Ils ont assisté à au moins 2/3 des séances, et à au moins 90 % du temps d'instructeur lors de chaque séance.

personne. En raison de l'intérêt manifesté pour ces activités, l'IQC continuera de téléverser ces séances dans l'avenir.

Conférences et ateliers parrainés

Chaque année, l'IQC s'engage à parrainer des conférences et ateliers tenus à l'extérieur de ses murs, afin de susciter des occasions de collaboration au sein d'un réseau mondial de chercheurs. Les restrictions de voyage et la pandémie de COVID-19 ont limité à la fois le nombre de conférences et les besoins de financement pendant l'exercice écoulé. Pour l'avenir, l'IQC maintient son engagement d'appuyer des activités externes dans le domaine quantique; même cette année, l'IQC a parrainé les 4 activités externes énumérées dans le tableau ci-après.

Mois	Activité	Lieu
Juin	Congrès de l'Association canadienne des physiciens et physiciennes (ACP)	Virtuel
Octobre	Défi international des applications spatiales	Virtuel
Janvier	Conférence canadienne pour les étudiantes de 1er cycle en physique (CCUWiP)	Virtuel
Février	Conférence de physique et d'astronomie des universités de l'Atlantique (AUPAC)	Virtuel

Objectif C

Faire du Canada la destination de choix pour la recherche sur les technologies quantiques et y attirer les meilleurs au monde, en mettant sur pied des partenariats avec la communauté internationale de l'information quantique, et en favorisant à l'échelle mondiale l'excellence en science et technologie de l'information quantique.

Résultats visés : Positionner le Canada comme destination de recherche sur les technologies quantiques.

Activités prévues

- Promouvoir le Canada à l'échelle internationale comme lieu de recherches sur les technologies quantiques, en participant à des initiatives mondiales dans le domaine (conférences, exposés, séminaires et autres activités).
- Agir comme catalyseur de collaborations entre scientifiques de l'information quantique d'un bout à l'autre du Canada et dans le monde entier.
- Promouvoir la collaboration par la participation à des conférences nationales et internationales.
- Produire des publications de haut calibre, reconnues à l'échelle internationale, dont les auteurs comprennent des chercheurs de l'IQC.
- Organiser au moins 4 conférences comportant une participation pluridisciplinaire.
- Poursuivre le programme de visites de scientifiques et d'universitaires étrangers.

Promouvoir le Canada à l'échelle internationale comme lieu de recherches sur les technologies quantiques, en participant à des initiatives mondiales dans le domaine.

Le Canada est reconnu dans le monde entier comme un chef de file de la recherche en science et technologie de l'information quantique. Chaque année, des professeurs, des postdoctorants et des étudiants diplômés de l'IQC représentent le Canada sur la scène internationale, mettant en évidence le talent et les capacités que possède le pays. Plusieurs réalisations en la matière sont soulignées ci-après et dans les annexes.

La communauté élargie de l'IQC a participé à d'autres initiatives, dont la compétition Canada–Royaume-Uni de technologies quantiques, où les professeurs de l'IQC sont à l'origine de 3 projets gagnants sur 8. Cette compétition résulte d'un partenariat entre les 2 pays mis sur pied par l'industrie pour développer des technologies quantiques. Voici les projets gagnants de l'IQC.

Communication quantique indépendante d'un cadre de référence pour des réseaux satellitaires (ReFQ) — Chercheur principal à l'IQC : Thomas Jennewein; collaborateur à l'IQC : Norbert Lütkenhaus

Ce projet réunit des experts du Canada et du Royaume-Uni, afin de montrer l'utilisation de la technologie quantique pour protéger des réseaux de communications commerciaux et nationaux. Il consistera à mettre en œuvre une méthode et un protocole nouveaux améliorant l'intégration et l'alignement d'un transmetteur quantique à bord d'un satellite. La technologie britannique et canadienne de distribution quantique de clés (DQC) mise au point dans le cadre de ce projet devrait être installée à bord du QEYSSat (*Quantum Encryption and Science Satellite* – Satellite de cryptographie et physique quantiques), ce qui étendra la portée de cette mission et fera la démonstration de liens avec des stations au sol des 2 côtés de l'Atlantique.

Rendre utiles les ordinateurs quantiques bruyants : de la théorie aux applications — Chercheur principal à l'IQC : Raymond Laflamme

Ce projet réunit des experts de l'industrie et du milieu universitaire qui ont une longue expérience du calcul quantique, pour élaborer des mises en œuvre robustes d'algorithmes quantiques capables de fonctionner correctement dans les ordinateurs quantiques actuels vulnérables aux erreurs. Il accélérera la démonstration de l'avantage quantique pour des problèmes qui intéressent l'industrie, tels que la simulation de systèmes quantiques.

Élaboration d'une architecture de réseau normalisée à l'épreuve des attaques quantiques — Chercheur principal à l'IQC : Michele Mosca; collaborateur à l'IQC : Norbert Lütkenhaus

Ce projet réunit des partenaires des milieux universitaire, industriel et gouvernemental, afin d'unifier les technologies de distribution quantique de clés (DQC) et de cryptographie postquantique (CPQ) des 2 pays et de les combiner pour mettre sur pied un réseau canado-britannique sûr, fondé sur les principes de sécurité des technologies à l'épreuve des attaques quantiques.

Agir comme catalyseur de collaborations entre scientifiques de l'information quantique.

L'IQC offre une ambiance qui encourage et salue la collaboration à tous les échelons. Voici quelques projets menés en collaboration qui ont commencé ou se sont poursuivis au cours de l'année écoulée. L'annexe D, à la page 75, donne la liste de ces collaborations (noter que cette liste ne comprend pas les publications à plusieurs auteurs).

Programme d'informatique quantique de l'ICRA
Ce programme réunit des physiciens, des mathématiciens, des informaticiens, etc., pour aborder les questions les plus fondamentales en informatique quantique. Il compte en tout 34 membres — dont 3 sont professeurs à l'IQC et 2 sont affiliés à l'IQC. Le programme d'informatique quantique a été mis sur pied en 2002, puis renouvelé en 2007 et en 2012.

Le programme *Défi « Réseaux sécurisés à haut débit »* du CNRC
Thomas Jennewein, professeur à l'IQC, collabore avec l'équipe du Conseil national de recherches du Canada chargée de la mise au point de technologies qui permettront de réaliser les prochaines générations de réseaux de télécommunications à haut débit.

Le programme *Défi « Internet des objets : capteurs quantiques »* du CNRC
Ce programme est conçu pour mettre le Canada à l'avant-garde mondiale des nouveaux capteurs quantiques à haute précision. Kevin Resch, professeur à l'IQC, a été invité à siéger au sein du groupe d'experts pour ce programme. Cette invitation constitue une reconnaissance de la renommée du corps professoral de l'IQC en matière quantique au Canada.

Promouvoir la collaboration par la participation à des conférences nationales et internationales.

L'IQC cherche des occasions de participer à des conférences nationales et internationales. Les professeurs de l'IQC ont été invités à prendre la parole à plus de 100 conférences mises sur pied par des organismes du monde entier. Quelques-unes d'entre elles sont énumérées ci-après. L'annexe G, à la page 82, donne la liste complète des conférences auxquelles les professeurs de l'IQC ont participé cette année. Veuillez noter que, cette année, toutes ces conférences ont eu lieu en mode virtuel.

- Interface entre des boîtes quantiques et des ensembles atomiques refroidis au laser, Capteurs optiques et quantiques et métrologie de précision
- Architecture de réseau pour le calcul quantique à base de silicium, Séminaire de physique de l'Université de Nouvelles-Galles du Sud
- Détournement de l'intrication, Groupe de lecture du Département de mathématiques de l'Université de la Californie à Berkeley
- Activités de l'ETSI en matière de profil de protection de critères communs, Rencontre de l'ETSI et de l'UIT sur la normalisation
- Simulation rapide de circuits de Clifford planaires, Séminaire quantique du midi, Laboratoire national de Los Alamos
- Progrès des canaux de communication quantiques à bord de satellites, Qtech 2020
- Nouvelles avenues pour des communications quantiques robustes en espace libre, Colloque de l'Institut Max-Planck d'optique quantique

- Détournement et applications, Colloque Tutte, Université de Waterloo
- Compression de données quantiques, Atelier 2021 de l'Université Stanford sur la compression
- Mise en œuvre d'une porte de Walsh-Hadamard avec des qutrits supraconducteurs, Université de Calgary, Canada
- Résolution de valeurs propres à l'aide d'un outil quantique variationnel fondé sur des mesures, Université de Toronto
- Applications au calcul quantique de la méthode de la théorie de l'information, Séminaire de l'IQUIST, Centre de la science et de la technologie de l'information quantique, Université de l'Illinois à Urbana-Champaign
- Jouer à des jeux avec des probabilités quantiques, Université scientifique et technologique du Missouri
- Cartes détruisant l'intrication et conjecture de Zauner, Séminaire Codex
- Détecteurs de photons individuels à haut rendement, fondés sur des nanofils semiconducteurs, Techniques avancées de comptage de photons XIV, Conférence *Defense + Commercial Sensing* de SPIE
- Outils de simulation quantique faisant appel à des ions piégés, Division de physique nucléaire de l'APS
- Sondage à effet tunnel de magnétisme bidimensionnel, Université d'État de Californie à Long Beach
- Simulation et calcul quantiques à l'aide de photons micro-ondes, Colloque de physique, Université Purdue
- Conférence Canada–Corée 2020 sur la science et la technologie
- Polaritons excitoniques de Bloch et excitons de Rydberg, Université de Strathclyde

Organiser des conférences comportant une participation pluridisciplinaire.

Lorsque l'IQC planifie des conférences majeures, il reste fidèle à son engagement à promouvoir l'aspect pluridisciplinaire de l'informatique quantique. En raison des restrictions liées à la pandémie, l'IQC n'a pas pu organiser de conférences majeures en 2020-2021. L'Institut a plutôt piloté des rencontres virtuelles et tables rondes de moindre ampleur avec des organismes canadiens et étrangers. Pour 2021-2022, l'IQC explore les modèles possibles et les moyens techniques de conférences hybrides. L'Institut espère renouveler les succès antérieurs des congrès de l'Association des enseignants de physique de l'Ontario, de même que les conférences *Innovateurs dans le domaine quantique* en sciences et génie ainsi qu'en informatique et mathématiques.

Universitaires et scientifiques invités à long terme

L'IQC reçoit des visiteurs scientifiques de premier plan, qui appartiennent à des organisations du monde entier. Ces collègues et collaborateurs viennent pour différentes raisons et restent à l'IQC pour des durées variables, afin de faire de la recherche, collaborer, partager leurs connaissances et faire des exposés. En 2020-2021, les chercheurs de l'IQC ont accueilli sous forme virtuelle 18 scientifiques du monde entier. Voici quelques-unes des institutions d'appartenance de ces visiteurs :

Canada	Outre-mer	États-Unis
Université de l'Alberta	Université de Copenhague	Institut de technologie du Massachusetts
Université York	Université Complutense de Madrid, Espagne	Université du Maryland
	Institut indien de technologie de Bombay	Université de la Californie à Berkeley
	Université Tsinghua	

Au cours de la dernière année, l'IQC a créé et renforcé des liens avec d'autres universités et organismes canadiens en science et technologie de l'information quantique. L'Institut a mis à profit la technologie pour poursuivre son programme de scientifiques invités et amener à l'IQC des chercheurs de premier plan à l'échelle internationale. En 2020-2021, 89 % (16/18) des scientifiques invités étaient de l'extérieur du Canada.

L'annexe H, à la page 92, donne la liste complète des scientifiques qui ont rendu visite à l'IQC.

L'IQC en ligne : visite guidée virtuelle innovatrice

L'organisation de visites guidées personnalisées pour des représentants des secteurs industriel, universitaire et gouvernemental a toujours constitué une part importante des activités de rayonnement de l'IQC. Les mesures sanitaires ont interdit les visites guidées en personne, mais l'IQC a élaboré une visite guidée virtuelle innovatrice qui continuera de servir pour des personnes éloignées même après la levée des restrictions actuelles.

La visite guidée virtuelle a été créée à l'interne à l'aide de matériel spécialisé et est hébergée en ligne dans un environnement de visite virtuelle. Comme la visite en personne du Centre Quantum-Nano Mike-et-Ophelia-Lazaridis, la visite virtuelle est guidée par du personnel de l'IQC. Elle met en évidence la QNFCF (*Quantum Nanofabrication and Characterization Facility* – Installation de fabrication et caractérisation nanométriques quantiques), ainsi que les espaces de collaboration et de réflexion de l'IQC, et emmène les visiteurs dans des laboratoires pour montrer l'équipement et les locaux des chercheurs. Les 3 laboratoires visités sont le laboratoire d'ingénierie de systèmes quantiques, le laboratoire de photonique quantique et le laboratoire d'informatique quantique avec des ions piégés. La visite guidée est enrichie d'éléments multimédias comprenant des photos et vidéos supplémentaires qui ajoutent un contexte à l'ampleur de la recherche fondamentale effectuée à l'IQC.

Une fois la visite guidée à 360° terminée avant la fin de 2020, l'IQC a mené plusieurs visites guidées avec des participants du Conseil national de recherches du Canada, de Ressources naturelles Canada et d'entreprises privées. Les visites virtuelles ont conduit à des rencontres de collaboration et à un potentiel de partenariat qui continue de se manifester en 2021-2022.

Objectif D

Améliorer et étendre les activités publiques de formation et de diffusion des connaissances de l'IQC, afin de promouvoir effectivement la science et l'informatique quantique, et de montrer comment la recherche sur l'information quantique peut être appliquée, en vue de soutenir et d'attirer des scientifiques de classe mondiale.

Résultats visés : Faire connaître davantage la science et la technologie de l'information quantique, de même que l'IQC, dans la communauté scientifique et chez les Canadiens en général.

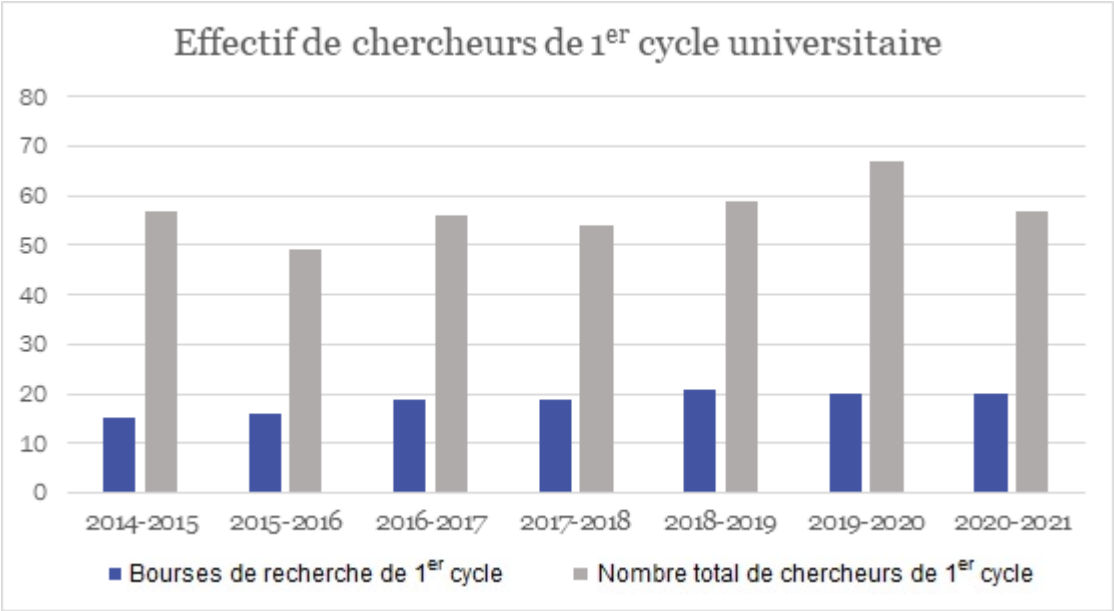
Activités prévues

- Organiser les écoles d'été USEQIP (1er cycle universitaire) et QCSYS (niveau secondaire).
- Organiser le 6e atelier Schrödinger annuel pour enseignants.
- Organiser des activités de vulgarisation, notamment des conférences publiques, afin d'accroître les connaissances des participants sur l'information quantique et l'IQC.
- Présenter une programmation de STGM réservée aux femmes et aux filles.
- Établir des liens avec d'importants partenaires stratégiques, afin de diffuser davantage les découvertes résultant des recherches de l'IQC.
- Continuer de faire connaître les recherches effectuées à l'IQC au moyen de publications, de nouvelles et de communiqués de presse, ainsi que par le Web et les médias sociaux.
- Continuer de mettre à profit des ressources et du contenu en ligne, afin d'attirer de nouveaux visiteurs dans le site Web de l'IQC.

USEQIP

En 2020-2021, l'IQC avait prévu tenir du 25 mai au 5 juin sa 11e école d'été annuelle USEQIP (*Undergraduate School for Experimental Quantum Information Processing* – École de 1er cycle sur le traitement quantique expérimental de l'information). Normalement, cette école comprend des exposés sur la théorie de l'information quantique et les méthodes expérimentales liées aux dispositifs quantiques, suivis de plus de 30 heures d'étude pratique du traitement de l'information quantique dans les installations d'expérimentation de l'IQC.

Malheureusement, en raison des incertitudes au début de la pandémie de COVID-19, à partir de la mi-mars 2020, l'IQC n'a pas eu le temps de mettre sur pied une version virtuelle de l'USEQIP et a dû l'annuler complètement. Par contre, le programme de bourses de recherche de 1er cycle a pu se poursuivre presque sans réduction, et 20 des 21 candidats à l'USEQIP et à une bourse de recherche de 1er cycle ont pu travailler à distance avec des chercheurs de classe mondiale de l'IQC.



QCSYS

L'IQC a tenu sa 12e école d'été annuelle QCSYS (*Quantum Cryptography School for Young Students* – École de cryptographie quantique pour jeunes étudiants) du 3 au 14 août. Comme la QCSYS a été transformée en format virtuel, le programme final a consisté en 19 leçons réparties sur 10 jours de semaine.

En août 2019, l'IQC avait pu accepter 44 participants sur 309 candidats. En août 2020, l'IQC a pu accueillir en format virtuel 110 élèves du secondaire très intéressés[3] répartis dans le monde entier. Comme dans le cas des conférences publiques de l'IQC et de l'atelier Schrödinger, le bond des inscriptions à la QCSYS témoigne d'un intérêt extraordinaire pour le monde quantique chez les jeunes étudiants comme dans le grand public, ainsi que de la réputation de l'IQC en tant qu'institut de recherche de classe mondiale en informatique quantique.

Dans un sondage mené auprès des participants après l'école d'été, 97,47 % d'entre eux ont qualifié d'excellente (73,42 %) ou de bonne (24,04 %) leur expérience de la QCSYS. Tous les répondants ont dit qu'ils encourageraient activement d'autres personnes à se porter candidats (71,60 %) ou qu'ils le feraient si on leur posait la question (28,40 %). Parmi les répondants, 82,5 % se sont dits fortement d'accord avec le fait que la QCSYS les a exposés à des idées non abordées dans leur cours secondaire.

> *« C'était vraiment un excellent programme, et je suis très heureux d'avoir été accepté et d'avoir pu faire la QCSYS. J'ai énormément appris et je me sens beaucoup mieux préparé à mon avenir avec tout ce que j'ai*

[3] Ils ont assisté à plus de 75 % des cours; 127 étudiants ont assisté à au moins la moitié des cours.

découvert sur l'informatique quantique. Les 2 dernières semaines ont été les meilleures de tout mon été. » [traduction]

« J'ai vraiment aimé participer à la QCSYS en ligne. Ça a été extrêmement plaisant de rencontrer d'autres étudiants de diverses origines, intéressés eux aussi par la mécanique quantique, ainsi que d'apprendre au contact de conférenciers et de chercheurs experts dans ce domaine. Ce fut une expérience extraordinaire, et je suis très heureux d'avoir pu y participer. » [traduction]

Atelier Schrödinger

L'IQC a tenu son 6e atelier annuel Schrödinger pour enseignants du 30 novembre au 6 décembre.

En 2019, l'IQC avait reçu 112 demandes d'inscription à l'atelier Schrödinger, ce qui témoignait d'un intérêt croissant pour le programme, mais n'avait pu accueillir que 39 participants. Compte tenu de la demande, l'IQC avait déjà prévu accueillir en 2020 2 groupes de participants. L'organisation de 2 groupes virtuels de participants a été un grand succès; comme on l'a mentionné plus haut (voir à la page 44), l'IQC a constaté une augmentation marquée du nombre d'enseignants intéressés qui ont pu suivre l'atelier en format virtuel.

Le 1er groupe a suivi l'atelier pendant 3 soirs sur semaine, entre le 30 novembre et le 4 décembre. Le 2e groupe a suivi l'atelier pendant la fin de semaine des 5 et 6 décembre. Dans les 2 cas, il y a eu 3 séances de 90 minutes comprenant des exposés faits par John Donohue, ainsi que de multiples discussions. Voici les sujets abordés au cours des 3 séances : la superposition quantique et la polarisation de la lumière; la dualité onde-particule et l'interférence; le principe d'incertitude.

Dans un sondage mené auprès des participants, 96,71 % d'entre eux ont estimé que le programme était excellent (63,74 %) ou bon (32,97 %). À la question « À combien d'enseignants allez-vous faire connaître les documents de l'atelier Schrödinger? », les participants ont en moyenne répondu que ce nombre serait de 14. Parmi les répondants, 98,9 % ont dit qu'ils encourageraient activement d'autres personnes à se porter candidats (75,82 %) ou qu'ils le feraient si on leur posait la question (23,08 %).

« Les cours présentent une méthode originale et efficace d'apprentissage de la mécanique quantique. Le matériel est impeccable : des diapos avec des animations de phénomènes quantiques, des figures explicatives, un langage approprié et accessible au public visé. C'est impossible de ne pas aimer ces cours, ils sont tout simplement fantastiques! Je participerais à cet atelier tous les ans si c'était possible. De plus, je vais répandre les connaissances acquises et les approfondir avec mes élèves ici dans mon pays (le Brésil). C'était parfait! » [traduction]

« L'atelier avait une conception originale. Il encourageait d'une manière particulière la réflexion. Les sujets très intéressants permettront d'initier les élèves à la mécanique quantique et à ses applications. La dynamique de l'atelier nous a permis de partager nos réflexions et de promouvoir une discussion approfondie avec d'autres enseignants sur la théorie sous-jacente. Les documents fournis proposent des activités très attrayantes, ce qui facilite leur mise en œuvre en classe. » [traduction]

Conférences publiques

Cette année, l'IQC a lancé dans YouTube des « conversations au coin du feu », série d'entrevues mensuelles en direct et en ligne avec des scientifiques et des diplômés de l'IQC, afin d'inviter le public à se renseigner davantage sur la recherche et les carrières dans le domaine de l'information quantique. Au cours de l'année écoulée, 8 conversations ont été suivies en direct par plus de 300 personnes, et il y a eu plus de 4 000 visionnements à la demande. Ce grand nombre de visionnements a contribué à une augmentation substantielle du nombre d'abonnés à notre canal YouTube. Cette série a mis en vedette les 8 personnes suivantes :

- Twesh Upadhyaya, étudiant diplômé à l'IQC et ancien de la QCSYS
- Chris Ferrie, diplômé de l'IQC (doctorat)
- David Gosset, professeur agrégé à l'IQC
- Kristine Boone, doctorante à l'IQC
- Raymond Laflamme, professeur titulaire et ancien directeur général de l'IQC
- Shayan Majidy, doctorant à l'IQC
- Shohini Ghose, affiliée à l'IQC
- Thomas McConkey, diplômé de l'IQC

En novembre, l'IQC a également organisé, sous le thème de la physique quantique et de l'espace, une conférence publique de Katanya Kuntz, associée de recherche au projet QEYSSat (*Quantum Encryption and Science Satellite* – Satellite de cryptographie et physique quantiques). Plus de 120 participants ont assisté à la conférence en direct qui, au 31 mars 2021, avait fait l'objet de plus de 2 000 visionnements supplémentaires.

De plus, l'équipe de vulgarisation scientifique de l'IQC a présenté des conférences publiques virtuelles en partenariat avec Association Quantum, réseau de sensibilisation à la physique quantique dont le siège est à Toronto, ainsi qu'à des organismes d'éducation permanente et à des associations d'anciens en Ontario. Cette équipe a aussi organisé une projection virtuelle du festival *Quantum Shorts* du court métrage quantique, en collaboration avec l'Université nationale de Singapour, l'Université Wilfrid-Laurier et des cinémas locaux.

Visites scolaires

Depuis mai 2020, l'IQC offre des visites virtuelles à des groupes de physique d'écoles secondaires de partout au Canada. Au cours de ces visites, des experts en physique quantique se joignent virtuellement à une classe et font une présentation sur la physique et l'information quantiques. Ils répondent aux questions des élèves sur le domaine et sur les voies menant à des carrières en recherche. Ces visites virtuelles ont touché cette année plus de 800 élèves de l'Ontario, du Québec, de l'Alberta et du Manitoba, ainsi que des États-Unis et du Brésil. En outre, plus de 200 élèves albertains de la 7e à la 9e année ont bénéficié d'un partenariat avec Skype-A-Scientist.

Promotion des sciences auprès des femmes et des filles

La promotion des sciences auprès des femmes et des filles est également une priorité-clé de l'IQC. Entre autres initiatives en ce sens, l'IQC crée des occasions de réseautage entre femmes scientifiques, par exemple en parrainant la Conférence canadienne des étudiantes de 1er cycle en physique et en y tenant un stand sur les études supérieures.

Le 3 mars 2021, en partenariat avec le groupe FemPhys de l'Université de Waterloo, l'IQC a organisé une activité de mentorat en ligne pour des étudiantes de 1er cycle et des étudiantes diplômés à l'Université de Waterloo. Les mentores, entre autres membres de minorités, ont fait part de leur expérience dans les STGM afin de stimuler les prochaines générations de scientifiques et professionnels dans ces domaines.

Plus tard au cours du même mois, l'IQC a également tenu, avec la participation exclusive de panélistes féminines, une table ronde virtuelle sur les carrières en STGM dans le domaine quantique. Cette table ronde a montré diverses occasions que ces femmes avaient saisies au cours de leur carrière, ainsi que certains des obstacles qu'elles avaient dû surmonter. Il y a eu 1 300 visionnements en direct et à la demande. Les panélistes étaient :

- Na Young Kim, professeure agrégée à l'IQC ainsi qu'au Département de génie électrique et informatique;
- Kristine Boone, doctorante en information quantique à l'IQC et à l'Université de Waterloo;
- Adele Newton, directrice générale de CS-Can|Info-Can et ancienne membre du personnel de l'IQC.

Dans le cadre de son engagement envers l'équité et la diversité, l'IQC s'efforce d'ouvrir des portes aux filles et aux femmes avant qu'elles ne se portent candidates aux études supérieures, afin que les études supérieures en STGM représentent pour elles une possibilité viable. Dans la foulée d'un mouvement vers la parité des sexes, QCSYS (pour les élèves du secondaire) a eu 30 % de candidates et 36 % de participantes s'identifiant comme femmes, et l'atelier Schrödinger (pour les enseignants du secondaire) a eu 38 % de candidates et 44 % de participantes s'identifiant comme femmes. En aidant les filles et les jeunes femmes à prendre en considération l'informatique quantique, l'IQC

s'efforce d'élargir grandement le réservoir de talents pour ses programmes, et les programmes de STGM en général, dans l'avenir.

Partenariats stratégiques de rayonnement

L'IQC a conclu des partenariats avec des organismes tels que l'Institut royal canadien des sciences et Sciences jeunesse Canada pour amener la physique quantique dans des espaces publics virtuels. L'IQC a également formé des partenariats avec des entreprises locales comme le cinéma Apollo pour organiser des activités virtuelles, par exemple une projection spéciale de courts métrages sur des thèmes quantiques. L'IQC maintient en outre des relations avec TelusSpark et la CAGIS (*Canadian Association of Girls in Science* – Association canadienne des filles en sciences), et continue de collaborer avec des entreprises et des organismes à but non lucratif pour promouvoir de manière élargie la physique quantique. L'IQC se concentre sur la conclusion de nouveaux partenariats en 2021-2022, dont certains ont déjà commencé à porter fruit.

Communications

L'IQC veille à ce que les chercheurs et leurs travaux soient reconnus dans le monde entier, par le truchement d'articles, de communiqués de presse ainsi que de documents imprimés et en ligne. Les communications sont adaptées de manière à être accessibles à une vaste gamme d'auditoires allant du grand public à la communauté du domaine quantique.

Articles et couverture médiatique

Avec des résultats de recherche publiés chaque année, l'IQC s'efforce de promouvoir les travaux de sa communauté dans les principaux médias. Cette année, on a relevé environ 308 mentions de l'IQC dans les médias, pour un total de 1,4 milliard d'impressions (nombre de visionnements d'une publication dans une source). Même si le nombre de mentions dans les médias a été inférieur à celui de 2019-2020, celles-ci sont parues dans des publications d'une portée potentiellement plus grande, ce qui a augmenté le nombre d'impressions par mention.

Les médias dans lesquels ces mentions sont parues comprennent entre autres : le *National Post*, CBC, *Forbes*, *The Independent*, *Yahoo! Finance*, l'*International Business Times*, *Businesswire*, *University Affairs*, le *National Observer* et l'*Hindustan Times*. Tous ont mentionné ou cité l'IQC ou des chercheurs de l'IQC au cours de la dernière année, ce qui témoigne de la présence mondiale de l'IQC dans l'industrie quantique en émergence à l'échelle internationale.

Publications imprimées

En juin 2020, l'IQC a fait paraître le *Rapport d'impact 2019*. Il s'agit d'une version revue et recentrée de l'ancien *Rapport annuel* qui met en valeur les développements passionnants et les applications potentielles des travaux de nos chercheurs, à l'aide d'histoires simples et claires ainsi que de données présentées d'une manière accessible.

Avec un retard dû au début de la pandémie, l'IQC a posté la version imprimée du *Rapport d'impact 2019* à plus de 200 destinataires à l'université, dans la collectivité et les administrations gouvernementales. De plus, des exemplaires sont mis à la disposition des membres de l'IQC, qui peuvent les distribuer aux intervenants avec qui ils sont en contact. La mise en pages attrayante du *Rapport d'impact 2019* et sa présentation avaient pour but d'attirer l'attention des publics-clés visés et à leur rappeler l'importance constante de la recherche en science et technologie de l'information quantique. Cette publication a remporté la médaille d'argent du CASE (*Council for Advancement and Support of Education* – Conseil pour l'avancement et le soutien de l'éducation). Cela témoigne du travail accompli et des normes élevées de communication des réalisations de l'IQC.

Parallèlement à cela, l'IQC a commencé à planifier le *Rapport d'impact 2021*, qui paraîtra surtout sous forme numérique, avec une plus petite production imprimée servant de vitrine pour montrer aux intervenants-clés l'importance pour le Canada des recherches effectuées à l'IQC.

Site Web

Le site Web de l'IQC est un moyen important de diffuser les connaissances, les recherches et les succès de l'IQC, ainsi que de mieux faire connaître l'IQC comme un chef de file mondial de la recherche sur les technologies quantiques.

Pendant toute l'année écoulée, le rythme de consultation du site Web de l'IQC est demeuré semblable à ce qu'il était l'année précédente, à une exception près. À la fin octobre 2019, la publication par Google de son article sur la suprématie quantique (*Quantum Supremacy using a programmable superconducting processor* – Suprématie quantique avec un processeur supraconducteur programmable), paru le 23 octobre dans la revue *Nature*, et la couverture médiatique qui s'en était suivie, avaient entraîné une forte pointe de consultation du site Web de l'IQC. Cette pointe a montré que ce site constitue une source importante et faisant autorité pour ceux qui cherchent à comprendre les manchettes à propos de l'informatique quantique. Cette pointe unique a amené des milliers de nouveaux utilisateurs au site Web de l'IQC, ce qui ne s'est pas reproduit en octobre 2020. Par conséquent, la consultation du site Web de l'IQC a légèrement diminué au cours de la dernière année par rapport à la précédente — avec 108 510 visiteurs distincts en 2020-2021, contre 119 641 en 2019-2020.

Il sera important de surveiller l'utilisation du site Web au cours du prochain exercice, afin de mesurer les effets de la rénovation du site et de la publication prochaine d'une nouvelle section *Quantum 101*, toutes deux décrites dans la suite de la présente section.

Au cours du dernier exercice, environ 74 % des visites du site Web se sont faites de l'extérieur du Canada, les visiteurs de l'Inde, de la Chine et du Royaume-Uni étant les plus nombreux. Le référencement naturel a été à l'origine de 59 % des consultations du site Web de l'IQC. Cela signifie que la majorité des visiteurs de ce site ont trouvé celui-ci à l'aide de moteurs de recherche. Le terme *quantum computing* (informatique quantique) est celui qui a amené le plus de consultations du site. Cela montre que l'IQC constitue une ressource importante et faisant autorité pour ceux qui veulent en savoir davantage sur cette application de la physique quantique.

Afin d'améliorer l'expérience des visiteurs en ligne et d'optimiser son site Web pour les moteurs de recherche, l'IQC a rénové des composantes de ce site, y compris la structure des menus, et a réécrit ou mis à jour la plupart des pages du site. L'IQC travaille maintenant à la conception et à la réalisation d'une nouvelle section du site intitulée *Quantum 101*, qui sera lancée au cours du prochain exercice et remplacera la page actuelle *Quantum Computing 101*, afin de procurer une expérience plus intéressante, accessible et instructive.

Cette nouvelle section sera annoncée au moyen de publications payantes et gratuites dans les médias sociaux, et sera en vedette dans la page d'accueil du site Web. Le suivi du rendement de cette nouvelle section et du site Web rénové sera une priorité pendant le prochain exercice, afin d'évaluer et d'améliorer la nouvelle mouture du site.

En plus de rénover son site Web, l'IQC a mis sur pied un nouveau site de publications numériques pour le *Rapport d'impact 2019* en français et en anglais, avec les récits et d'autres extraits importants du rapport imprimé. La publication numérique a multiplié par 5 environ la diffusion du rapport, avec 1 344 visites et 5 148 pages consultées au cours de l'année écoulée.

Avant le lancement du site de publications numériques, des indicateurs de performance ont été mis sur pied pour mesurer la capacité du site à encourager les gens à se renseigner sur les répercussions des recherches de l'IQC en science et technologie de l'information quantique au Canada et dans le monde. Les résultats ont montré que le *Rapport d'impact 2019* en ligne a suscité un intérêt bien supérieur à la moyenne observée dans l'industrie.

Médias sociaux

Pendant toute la période du 1er avril 2020 au 31 mars 2021, l'IQC a continué de poster du contenu instructif et intéressant à l'intention de ses abonnés dans les médias sociaux. Près de 700 éléments de contenu postés dans Facebook, Twitter et Instagram ont produit 1,17 million d'impressions et 8 167 interactions. Au cours de la même période, le canal YouTube de l'IQC a fait l'objet de plus de 240 000 visionnements totalisant plus de 33 000 heures.

L'IQC a particulièrement attiré l'attention sur les réalisations de ses chercheurs et leurs répercussions, avec une campagne consacrée à son rapport d'impact dans Facebook, Twitter et Instagram. Cette campagne de 89 messages dans les médias sociaux a produit 117 830 impressions et 1 257 interactions, dont des centaines de clics vers le rapport en format numérique.

Pendant toute l'année écoulée, l'IQC a bénéficié d'une croissance soutenue de l'activité dans tous ses comptes de médias sociaux. Voici quelques points saillants de la présence de l'IQC dans les médias sociaux pour la période allant du 1er avril 2020 au 31 mars 2021.

	Nouveaux abonnés	**Nombre total d'abonnés**	**Augmentation**
YouTube	3 837	21 400	21,9 %
Facebook	132	5 432	2,5 %
Twitter	1 597	15 300	11,7 %
Instagram	297	1 189	33,3 %

La croissance constante de la présence en ligne est un signe positif qui témoigne de la position de l'IQC comme autorité dans son domaine.

L'IQC continue de planifier de nouvelles stratégies de production, pour les médias sociaux, de contenu lié à la physique quantique qui soit utile pour son public. L'IQC compte aussi utiliser de nouvelles fonctions et possibilités afin d'étendre la portée de son contenu. Avec un contenu valable atteignant un public toujours plus nombreux, l'IQC pourra maintenir sa position comme autorité en physique quantique, ainsi que la position du Canada comme chef de file mondial dans ce domaine, tout en montrant que la science et la technologie de l'information quantique valent la peine d'être davantage comprises, soutenues et développées.

Objectif E

Traduire de plus en plus les résultats de la recherche en produits quantiques commercialisables qui apporteront des bénéfices économiques et sociétaux au Canada, et favoriser du même coup les projets conjoints et la collaboration avec des partenaires du secteur privé tout en suscitant des occasions de commercialisation.

Résultats visés : Permettre au Canada de tirer parti des bénéfices économiques et sociétaux de l'informatique quantique en saisissant les occasions de commercialiser les percées réalisées.

Activités prévues

- Soutenir la création d'une nouvelle industrie quantique.
- Fournir aux chercheurs de l'IQC des possibilités de tisser des liens avec l'écosystème entrepreneurial de Waterloo, grâce au réseautage et à des activités officielles en partenariat avec les réseaux étendus d'entreprises en démarrage de la région de Waterloo.

Soutien à l'industrie quantique et liens avec l'écosystème quantique

L'IQC est un acteur crucial dans l'écosystème de la science, de la technologie et de l'innovation en physique quantique au Canada. Il continue de favoriser un milieu d'entrepreneuriat, et il réunit des universitaires, des entreprises en démarrage, des incubateurs et des investisseurs pour accélérer la commercialisation de la technologie quantique.

En mars 2021, les chercheurs de l'IQC détenaient collectivement plus de 40 brevets et 30 licences, dont 3 nouveaux brevets accordés en 2020-2021[4]. En tout, les professeurs de l'IQC ont 45 demandes de brevet en attente d'approbation.

Les recherches et nouvelles technologies innovatrices issues de l'IQC donnent naissance à des entreprises et se retrouvent sur les marchés. À ce jour, les 16 entreprises ci-après sont nées par suite de recherches menées à l'IQC.

[4] La réduction du nombre total de brevets, actifs ou en attente d'approbation, est principalement due au changement d'état de brevets accordés, qui sont devenus expirés.

Entreprises issues de l'essaimage à partir de l'IQC :

- EvolutionQ
- Neutron Optics
- QuantumLaf inc.
- Universal Quantum Devices
- SoftwareQ inc.
- SpinQ
- Aquabits
- Northern Quantum Lights
- High Q Technologies LP
- Quantum Benchmark inc.
- QuSpin Technologies inc.
- Single Quantum Systems
- QEYnet
- Everettian
- Q-Block Computing inc.
- Aegis Quantum

Remarque : *Auparavant, les chercheurs n'étaient pas tenus de rapporter leurs activités en matière de brevets et de commercialisation. Les brevets et licences pourraient donc être plus nombreux que ce qui est mentionné plus haut.*

Alors que plus de 30 % des chercheurs principaux de l'IQC ont commercialisé leur expertise et leurs recherches par le truchement d'entreprises issues de l'essaimage à partir de l'IQC et par des brevets, davantage de chercheurs soutiennent d'autres manières le développement d'une industrie quantique. Ces contributions peuvent consister à donner des conseils à des entreprises (œuvrant ou non dans le domaine quantique), à accompagner de jeunes diplômés qui visent une carrière dans l'industrie, ainsi qu'à collaborer avec des incubateurs et des pôles de développement d'entreprises dans la *Quantum Valley* et au-delà.

Transformer des idées quantiques en technologies percutantes

À l'IQC, l'excellence en recherche et l'innovation vont de pair. Sa riche culture entrepreneuriale attire et soutient des experts du domaine quantique qui choisissent d'aller au-delà de leurs aspirations pour mettre au point des technologies percutantes. De plus, cet environnement unique combiné à des programmes comme *Alliance quantique* a permis l'émergence de plusieurs applications technologiques. En voici quelques points saillants :

- commercialisation d'outils de caractérisation et de validation de processeurs quantiques améliorés (Joseph Emerson, Quantum Benchmark inc.);
- utilisation d'un nouveau matériau quantique pour détecter des photons individuels et fabriquer les circuits de contrôle en vue d'applications de ce capteur dans les domaines de la défense et de la santé (Michael Reimer, Single Quantum Systems);

- mise au point d'une nouvelle structure quantique invisible à l'œil nu et imprimée directement sur des documents officiels (p. ex. des billets de banque) à titre de dispositif de sécurité (Michal Bajcsy, IQC);
- mise en œuvre de nouveaux outils de biologie structurale permettant d'étudier directement pour la première fois la structure de protéines dans des membranes (David Cory, High Q Technologies LP);
- étude des répercussions de la physique quantique sur des processus logistiques, avec des partenaires gouvernementaux et industriels (Jon Yard, IQC).

Promotion de possibilités dans des écosystèmes d'entreprises

Pour veiller à ce que ses scientifiques aient l'orientation et le soutien voulus pour apprendre à commercialiser leurs recherches, l'IQC a entrepris de conclure des partenariats avec divers organismes de la *Quantum Valley* et du corridor technologique Waterloo–Toronto, afin d'établir des relations avec diverses parties prenantes.

- En janvier 2021, l'IQC a conclu un partenariat avec Velocity, incubateur de jeunes pousses de l'Université de Waterloo et d'ailleurs dans le monde, pour organiser une séance d'information sur le programme Velocity. Cette séance ne fait que commencer une série de séminaires conjoints prévus entre l'IQC et Velocity, pour aider les étudiants et les chercheurs de l'IQC dans leur processus décisionnel visant à commercialiser leurs travaux.
- En mai 2021, l'IQC a conclu un partenariat avec Creative Destruction Lab pour mettre en évidence son programme visant à aider de jeunes pousses dans le domaine quantique à croître et à mettre au point un prototype prêt à annoncer. Un séminaire organisé en partenariat avec TQT et avec l'Institut Périmètre a permis aux instituts et programmes participants de présenter aux étudiants, scientifiques et chercheurs principaux présents les différentes modalités d'appui disponibles dans la *Quantum Valley* pour les aspirants entrepreneurs.
- L'IQC a eu des rencontres avec Raiven Capital en février 2021 et avec Good News Ventures en août 2020, dans le but de définir les relations avec des firmes canadiennes de capital de risque. Ces rencontres ont été vues comme le début d'une conversation visant à présenter ces firmes à l'écosystème florissant de jeunes pousses issues de l'IQC. Les 2 firmes ont demandé à visiter en personne le campus de l'IQC lorsque cela sera à nouveau permis. D'autres discussions auront lieu en 2021-2022.

B. Publications

Du 1er avril 2020 au 31 mars 2021

1. Adjei, E; Resch, KJ; Branczyk, AM. (2020) Quantum simulation of Unruh-DeWitt detectors with nonlinear optics. Physical Review A
2. Agne, S; Jin, J; Kuntz, KB; Miatto, FM; Bourgoin, JP; Jennewein, T. (2020) Hong-Ou-Mandel interference of unconventional temporal laser modes. Optics Express
3. Agusti, A; Chang, CWS; Quijandria, F; Johansson, G; Wilson, CM; Sabin, C. (2020) Tripartite Genuine Non-Gaussian Entanglement in Three-Mode Spontaneous Parametric Down-Conversion. Physical Review Letters
4. Al Maruf, R; Bharadwaj, D; Anderson, P; Qiu, JW; Zeeshan, M; Poole, P; Dalacu, D; Reimer, M; Bajcsy, M. (2020) High Efficiency Fiber-Coupled Single-Photon Source Based on Quantum Dot Embedded in a Semiconductor Nanowire. 2020 Conference On Lasers And Electro-Optics (Cleo)
5. Albrecht, M.R., Gheorghiu, V., Postlethwaite, E.W., Schanck, J.M.. (2020) Estimating Quantum Speedups for Lattice Sieves. Lecture Notes In Computer Science (Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics)
6. Alhambra, AM; Anshu, A; Wilming, H. (2020) Revivals imply quantum many-body scars. Physical Review B
7. Allgaier, M; Ansari, V; Donohue, JM; Eigner, C; Quiring, V; Ricken, R; Brecht, B; Silberhorn, C. (2020) Pulse shaping using dispersion-engineered difference frequency generation. Physical Review A
8. Amy, M; Gheorghiu, V. (2020) staq-A full-stack quantum processing toolkit. Quantum Science And Technology
9. Amy, M., Gheorghiu, V.. (2020) Staq - A full-stack quantum processing toolkit. Quantum Science And Technology
10. Andriamirado, M; Balantekin, AB; Band, HR; Bass, CD; Bergeron, DE; Berish, D; Bowden, NS; Brodsky, JP; Bryan, CD; Classen, T; Conant, AJ; Deichert, G; Diwan, MV; Dolinski, MJ; Erickson, A; Foust, BT; Gaison, JK; Galindo-Uribarri, A; Gilbert, CE; Goddard, BW; Hackett, BT; Hans, S; Hansell, AB; Heeger, KM; Jaffe, DE; Ji, X; Jones, DC; Kyzylova, O; Lane, CE; Langford, TJ; LaRosa, J; Littlejohn, BR; Lu, X; Maricic, J; Mendenhall, MP; Meyer, AM; Milincic, R; Mitchell, I; Mueller, PE; Mumm, HP; Napolitano, J; Nave, C; Neilson, R; Nikkel, JA; Norcini, D; Nour, S; Palomino, JL; Pushin, DA; Qian, X; Romero-Romero, E; Rosero, R; Surukuchi, PT; Tyra, MA; Varner, RL; Venegas-Vargas, D; Weatherly, PB; White, C; Wilhelmi, J; Woolverton, A; Yeh, M; Zhang, A; Zhang, C; Zhang, X. (2021) Improved short-baseline neutrino oscillation search and energy spectrum measurement with the PROSPECT experiment at HFIR. Physical Review D
11. Ansari, V; Donohue, JM; Brecht, B; Silberhorn, C. (2020) Remotely projecting states of photonic temporal modes. Optics Express
12. Anshu, A. (2020) Improved local spectral gap thresholds for lattices of finite size. Physical Review B
13. Anshu, A; Arad, I; Gosset, D. (2020) Entanglement Subvolume Law for 2D Frustration-Free Spin Systems. Proceedings Of The 52Nd Annual Acm Sigact Symposium On Theory Of Computing (Stoc '20)
14. Anshu, A; Berta, M; Jain, R; Tomamichel, M. (2020) Partially Smoothed Information Measures. IEEE Transactions On Information Theory
15. Anshu, A; Hayashi, M; Warsi, NA. (2020) Secure Communication Over Fully Quantum Gel'fand-Pinsker Wiretap Channel. IEEE Transactions On Information Theory
16. Anshu, A; Hsieh, MH; Jain, R. (2020) Noisy Quantum State Redistribution With Promise and the Alpha-Bit. IEEE Transactions On Information Theory
17. Anshu, A; Yao, PH. (2020) On the Compression of Messages in the Multi-Party Setting. IEEE Transactions On Information Theory
18. Anshu, A., Arunachalam, S., Kuwahara, T., Soleimanifar, M.. (2020) Sample-efficient learning of quantum many-body systems. Proceedings - Annual IEEE Symposium On Foundations Of Computer Science, Focs
19. Anshu, A., Gosset, D., Morenz, K.. (2020) Beyond product state approximations for a quantum analogue of max cut. Leibniz International Proceedings In Informatics, Lipics
20. Antoine, X; Fillion-Gourdeau, F; Lorinc, E; MacLean, S. (2020) Pseudospectral computational methods for the time-dependent Dirac equation in static curved spaces. Journal Of Computational Physics
21. Appleby, M; Flammia, S; Mcconnell, G; Yard, J. (2020) Generating ray class fields of real quadratic fields via complex equiangular lines. Acta Arithmetica
22. Arnault, P; Pepper, B; Perez, A. (2020) Quantum walks in weak electric fields and Bloch oscillations. Physical Review A

23. Atas, YY; Safavi-Naini, A; Kheruntsyan, KV. (2020) Nonequilibrium quantum thermodynamics of determinantal many-body systems: Application to the Tonks-Girardeau and ideal Fermi gases. Physical Review A
24. Azarderakhsh, R., Jao, D., Koziel, B., LeGrow, J.T., Soukharev, V., Taraskin, O.. (2020) How Not to Create an Isogeny-Based PAKE. Lecture Notes In Computer Science (Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics)
25. Balantekin, AB; Band, HR; Bass, CD; Bergeron, DE; Berish, D; Bowden, NS; Brodsky, JP; Bryan, CD; Classen, T; Conant, AJ; Deichert, G; Diwan, MV; Dolinski, MJ; Erickson, A; Foust, BT; Gaison, JK; Galindo-Uribarri, A; Gilbert, CE; Hackett, BT; Hans, S; Hansell, AB; Heeger, KM; Heffron, B; Jaffe, DE; Ji, X; Jones, DC; Kyzylova, O; Lane, CE; Langford, TJ; LaRosa, J; Littlejohn, BR; Lu, X; Maricic, J; Mendenhall, MP; Milincic, R; Mitchell, I; Mueller, PE; Mumm, HP; Napolitano, J; Neilson, R; Nikkel, JA; Norcini, D; Nour, S; Palomino-Gallo, JL; Pushin, DA; Qian, X; Romero-Romero, E; Rosero, R; Surukuchi, PT; Tyra, MA; Varner, RL; White, C; Wilhelmi, J; Woolverton, A; Yeh, M; Zhang, A; Zhang, C; Zhang, X. (2020) Nonfuel antineutrino contributions in the ORNL High Flux Isotope Reactor (HFIR). Physical Review C
26. Balonin, N.A., Đoković, D.Ž.. (2020) Conference matrices from Legendre C-pairs | Конференц-матрицы на основе C-пар Лежандра. Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy
27. Baranwal, A; Schaeffer, L; Shallit, J. (2021) Ostrowski-automatic sequences: Theory and applications. Theoretical Computer Science
28. Barnum, H; Graydon, MA; Wilce, A. (2020) Composites and Categories of Euclidean Jordan Algebras. Quantum
29. Bindel, N., Schanck, J.M.. (2020) Decryption Failure Is More Likely After Success. Lecture Notes In Computer Science (Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics)
30. Bonnetain, X., Bricout, R., Schrottenloher, A., Shen, Y.. (2020) Improved Classical and Quantum Algorithms for Subset-Sum. Lecture Notes In Computer Science (Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics)
31. Bornman, N; Forbes, A; Kempf, A. (2020) Random number generation and distribution out of thin (or thick) air. Journal Of Optics
32. Bourassa, J; Wilson, CM. (2020) Amplification Requirements For Quantum Radar Signals. 2020 IEEE International Radar Conference (Radar)
33. Bourassa, J; Wilson, CM. (2020) Progress Toward an All-Microwave Quantum Illumination Radar. IEEE Aerospace And Electronic Systems Magazine
34. Bourassa, JE; Alexander, RN; Vasmer, M; Patil, A; Tzitrin, I; Matsuura, T; Su, DQ; Baragiola, B; Guha, S; Dauphinais, G; Sabapathy, KK; Menicucci, NC; Dhand, I. (2021) Blueprint for a Scalable Photonic Fault-Tolerant Quantum Computer. Quantum
35. Brannan, M; Chirvasitu, A; Eifler, K; Harris, S; Paulsen, V; Su, XY; Wasilewski, M. (2020) Bigalois Extensions and the Graph Isomorphism Game. Communications In Mathematical Physics
36. Bravyi, S; Gosset, D; Konig, R; Tomamichel, M. (2020) Quantum advantage with noisy shallow circuits. Nature Physics
37. Bravyi, S; Gosset, D; Movassagh, R. (2021) Classical algorithms for quantum mean values. Nature Physics
38. Buks, E; Brookes, P; Ginossar, E; Deng, CQ; Orgiazzi, JLFX; Otto, M; Lupascu, A. (2020) Driving-induced resonance narrowing in a strongly coupled cavity-qubit system. Physical Review A
39. Buonacorsi, B; Shaw, B; Baugh, J. (2020) Simulated coherent electron shuttling in silicon quantum dots. Physical Review B
40. Burniston, J; Grabowecky, M; Scandolo, CM; Chiribella, G; Gour, G. (2020) Necessary and sufficient conditions on measurements of quantum channels. Proceedings Of The Royal Society A-Mathematical Physical And Engineering Sciences
41. Burniston, J., Grabowecky, M., Scandolo, C.M., Chiribella, G., Gour, G.. (2020) Necessary and sufficient conditions onmeasurements of quantum channels. Proceedings Of The Royal Society A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences
42. Chen, JH; Zhou, YH; Bian, J; Li, J; Peng, XH. (2020) Subspace controllability of symmetric spin networks. Physical Review A
43. Chitambar, E; de Vicente, JI; Girard, MW; Gour, G. (2020) Entanglement manipulation beyond local operations and classical communication. Journal Of Mathematical Physics
44. Cong, W; Qian, C; Good, MRR; Mann, RB. (2020) Effects of horizons on entanglement harvesting. Journal Of High Energy Physics
45. Crann, J; Kribs, DW; Levene, RH; Todorov, IG. (2020) State Convertibility in the von Neumann Algebra Framework. Communications In Mathematical Physics
46. Dawkins, H; Wallman, J; Emerson, J. (2020) Combining T-1 and T-2 estimation with randomized benchmarking and bounding the diamond distance. Physical Review A

47. Dawkins, H., Wallman, J., Emerson, J.. (2020) Combining T1 and T2 estimation with randomized benchmarking and bounding the diamond distance. Physical Review A
48. Deimert, C; Goulain, P; Manceau, JM; Pasek, W; Yoon, T; Bousseksou, A; Kim, NY; Colombelli, R; Wasilewski, ZR. (2020) Realization of Harmonic Oscillator Arrays with Graded Semiconductor Quantum Wells. Physical Review Letters
49. Di Matteo, O; Gamble, J; Granade, C; Rudinger, K; Wiebe, N. (2020) Operational, gauge-free quantum tomography. Quantum
50. Du, H., Xue, Q., Li, S., Miao, G.-X., Chu, X.-M., Dai, Y., Yu, M., Zhao, G., Yan, S.. (2020) <inf>N</inf> superlattice multilayer: A real optical mode ferromagnetic resonance thick-film. Applied Physics Letters
51. Du, HL; Xue, Q; Li, SD; Miao, GX; Chu, XM; Dai, YY; Yu, MJ; Zhao, GX; Yan, SS. (2020) [(FeCoB/Ru/FeCoB)/ZnO](n) superlattice multilayer: A real optical mode ferromagnetic resonance thick-film. Applied Physics Letters
52. Edwards, M; Mashatan, A; Ghose, S. (2020) A review of quantum and hybrid quantum/classical blockchain protocols. Quantum Information Processing
53. Ekinci, H; Jahed, NMS; Soltani, M; Cui, B. (2021) The Role of Oxygen on Anisotropy in Chromium Oxide Hard Mask Etching for Sub-Micron Fabrication. IEEE Transactions On Nanotechnology
54. Ekinci, H., Cui, B., Pushin, D.. (2020) Fabrication of sub-micron trenches with surfactant-added KOH. Proceedings Of The IEEE Conference On Nanotechnology
55. Esfahani, AN; Malcolm, AJ; Xu, LZ; Yang, H; Storwick, T; Kim, NY; Pope, MA. (2020) Ultra-thin films of solution-exfoliated hexagonal boron nitride by Langmuir deposition. Journal Of Materials Chemistry C
56. Espinosa, DHG; Awan, KM; Odungide, M; Harrigan, SR; Sanchez, DR; Dolgaleva, K. (2021) Tunable four-wave mixing in AlGaAs waveguides of three different geometries. Optics Communications
57. Fang, K; Liu, ZW. (2020) No-Go Theorems for Quantum Resource Purification. Physical Review Letters
58. Fillion-Gourdeau, F; Levesque, P; MacLean, S. (2020) Plunging in the Dirac sea using graphene quantum dots. Physical Review Research
59. Fillion-Gourdeau, F; Lorin, E; MacLean, S. (2021) Numerical quasiconformal transformations for electron dynamics on strained graphene surfaces. Physical Review E
60. Garcia-Escartin, JC; Sajeed, S; Makarov, V. (2020) Attacking quantum key distribution by light injection via ventilation openings. Plos One
61. Garrow, T; Webb, JJ; Bovy, J. (2020) The effects of dwarf galaxies on the orbital evolution of galactic globular clusters. Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society
62. Ghashghaei, F; Rashedi, A; Sarreshtedari, F; Sabooni, M. (2020) Effect of the magnetically induced dichroism on the distribution of atomic polarization in Cesium vapor cells. Advanced Optical Technologies
63. Girard, M; Kye, SH; Stormer, E. (2021) Convex cones in mapping spaces between matrix algebras. Linear Algebra And Its Applications
64. Goldberg, A. (2021) Synchronous linear constraint system games. Journal Of Mathematical Physics
65. Gopalakrishnan, S; Biswas, S; Handa, S. (2020) Landau quantization of a circular Quantum Dot using the BenDaniel-Duke boundary condition. Superlattices And Microstructures
66. Govia, LCG; Bunandar, D; Lin, J; Englund, D; Lütkenhaus, N; Krovi, H. (2020) Clifford-group-restricted eavesdroppers in quantum key distribution. Physical Review A
67. Grier, D; Schaeffer, L. (2020) Interactive Shallow Clifford Circuits: Quantum Advantage against NC1 and Beyond. Proceedings Of The 52Nd Annual Acm Sigact Symposium On Theory Of Computing (Stoc '20)
68. Gunderman, LG. (2020) Local-dimension-invariant qudit stabilizer codes. Physical Review A
69. Haase, JF; Dellantonio, L; Celi, A; Paulson, D; Kan, A; Jansen, K; Muschik, CA. (2021) A resource efficient approach for quantum and classical simulations of gauge theories in particle physics. Quantum
70. Hadiashar, SB; Nayak, A. (2020) On the Entanglement Cost of One-Shot Compression. Quantum
71. Hanasoge, S; Horiuchi, N; Huang, CC; Jia, HP; Kim, NY; Murao, M; Seo, M; Tan, R; Wilkinson, J. (2020) Visibility challenges for Asian scientists. Nature Reviews Physics
72. Harper, R; Flammia, ST; Wallman, JJ. (2020) Efficient learning of quantum noise. Nature Physics
73. He, X; Wen, Y; Zhang, CH; Li, P; Zheng, DX; Chen, AT; Manchon, A; Zhang, XX. (2021) Spin transport in multilayer graphene away from the charge neutrality point. Carbon
74. Heacock, B; Sarenac, D; Cory, DG; Huber, MG; MacLean, JPW; Miao, H; Wen, H; Pushin, DA. (2020) Neutron sub-micrometre tomography from scattering data. IUCRJ
75. Henderson, LJ; Belenchia, A; Castro-Ruiz, E; Budroni, C; Zych, M; Brukner, C; Mann, RB. (2020) Quantum Temporal Superposition: The Case of Quantum Field Theory. Physical Review Letters
76. Henderson, LJ; Menicucci, NC. (2020) Bandlimited entanglement harvesting. Physical Review D
77. Higgins, BL; Bourgoin, JP; Jennewein, T. (2020) Numeric estimation of resource requirements for a practical polarization-frame alignment scheme for quantum key distribution (QKD). Advanced Optical Technologies

78. Hotta, M; Kempf, A; Martin-Martinez, E; Tomitsuka, T; Yamaguchi, K. (2020) Duality in the dynamics of Unruh-DeWitt detectors in conformally related spacetimes. Physical Review D
79. Hou, SY; Cao, NP; Lu, SR; Shen, Y; Poon, YT; Zeng, B. (2020) Determining system Hamiltonian from eigenstate measurements without correlation functions. New Journal Of Physics
80. Huang, YC; Zhang, SH; Sang, T; Zhao, GX; Jin, ZJ; Zong, WH; Wang, X; Xu, J; Cao, DR; Miao, GX; Li, SD. (2021) Orientation control of optical mode ferromagnetic resonance: From uniaxial to omni-directional. Applied Physics Letters
81. Hutchinson, A., LeGrow, J., Koziel, B., Azarderakhsh, R.. (2020) Further Optimizations of CSIDH: A Systematic Approach to Efficient Strategies, Permutations, and Bound Vectors. Lecture Notes In Computer Science (Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics)
82. Islam, R; Cui, B; Miao, GX. (2020) Dry etching strategy of spin-transfer-torque magnetic random access memory: A review. Journal Of Vacuum Science & Technology B
83. Jin, WC; Kim, HH; Ye, ZP; Ye, GH; Rojas, L; Luo, XP; Yang, BW; Yin, FZ; Horng, JSA; Tian, SJ; Fu, Y; Xu, GJ; Deng, H; Lei, HC; Tsen, AW; Sun, K; He, R; Zhao, LY. (2020) Observation of the polaronic character of excitons in a two-dimensional semiconducting magnet CrI3. Nature Communications
84. Jin, WC; Ye, ZP; Luo, XP; Yang, BW; Ye, GH; Yin, FZ; Kim, HH; Rojas, L; Tian, SJ; Fu, Y; Yan, SH; Lei, HC; Sun, K; Tsen, AW; He, R; Zhao, LY. (2020) Tunable layered-magnetism-assisted magneto-Raman effect in a two-dimensional magnet CrI3. Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America
85. Jonsson, RH; Aruquipa, DQ; Casals, M; Kempf, A; Martin-Martinez, E. (2020) Communication through quantum fields near a black hole. Physical Review D
86. Ketterle, W; Jamison, AO. (2020) An atomic physics perspective on the kilogram's new definition. Physics Today
87. Khalatpour, A; Paulsen, AK; Deimert, C; Wasilewski, ZR; Hu, Q. (2021) High-power portable terahertz laser systems. Nature Photonics
88. Kong, L; Lan, T; Wen, XG; Zhang, ZH; Zheng, H. (2020) Algebraic higher symmetry and categorical symmetry: A holographic and entanglement view of symmetry. Physical Review Research
89. Kong, L; Lan, T; Wen, XG; Zhang, ZH; Zheng, H. (2020) Classification of topological phases with finite internal symmetries in all dimensions. Journal Of High Energy Physics
90. Kribs, DW; Levick, J; Olfert, K; Pereira, R; Rahaman, M. (2021) Nullspaces of entanglement breaking channels and applications. Journal Of Physics A-Mathematical And Theoretical
91. Kribs, DW; Mintah, C; Nathanson, M; Pereira, R. (2020) One-way LOCC indistinguishable lattice states via operator structures. Quantum Information Processing
92. Kribs, DW; Mintah, C; Nathanson, M; Pereira, R. (2020) Vector representations of graphs and distinguishing quantum product states with one-way LOCC. Linear Algebra And Its Applications
93. Kuroiwa, K; Nakagawa, YO. (2021) Penalty methods for a variational quantum eigensolver. Physical Review Research
94. Kuroiwa, K; Yamasaki, H. (2020) General Quantum Resource Theories: Distillation, Formation and Consistent Resource Measures. Quantum
95. Lan, T; Wen, XD; Kong, L; Wen, XG. (2020) Gapped domain walls between 2+1D topologically ordered states. Physical Review Research
96. Leung, D., Winter, A., Yu, N.. (2021) LOCC protocols with bounded width per round optimize convex functions. Reviews In Mathematical Physics
97. Li, CW; Liu, Y; Ma, C; Pelejo, DC. (2020) A NOTE ON PARALLEL DISTINGUISHABILITY OF TWO QUANTUM OPERATIONS. Electronic Journal Of Linear Algebra
98. Li, HS; Hu, ZQ; Xia, QT; Zhang, H; Li, ZH; Wang, HZ; Li, XK; Zuo, FK; Zhang, FL; Wang, XX; Ye, WN; Li, QH; Long, YZ; Li, Q; Yan, SS; Liu, XS; Zhang, XG; Yu, GH; Miao, GX. (2021) Operando Magnetometry Probing the Charge Storage Mechanism of CoO Lithium-Ion Batteries. Advanced Materials
99. Li, NKH; Lütkenhaus, N. (2020) Improving key rates of the unbalanced phase-encoded BB84 protocol using the flag-state squashing model. Physical Review Research
100. Li, P; Han, AL; Zhang, CH; He, X; Zhang, JW; Zheng, DX; Cheng, L; Li, LO; Miao, GX; Zhang, XX. (2020) Mobility-Fluctuation-Controlled Linear Positive Magnetoresistance in 2D Semiconductor Bi2O2Se Nanoplates. ACS Nano
101. Li, P., Han, A., Zhang, C., He, X., Zhang, J., Zheng, D., Cheng, L., Li, L.-J., Miao, G.-X., Zhang, X.-X.. (2020) Mobility-Fluctuation-Controlled Linear Positive Magnetoresistance in 2D Semiconductor Bi<inf>2</inf>O<inf>2</inf>Se Nanoplates. ACS Nano
102. Li, Q; Li, HS; Xia, QT; Hu, ZQ; Zhu, Y; Yan, SS; Ge, C; Zhang, QH; Wang, XX; Shang, XT; Fan, ST; Long, YZ; Gu, L; Miao, GX; Yu, GH; Moodera, JS. (2021) Extra storage capacity in transition metal oxide lithium-ion batteries revealed by in situ magnetometry. Nature Materials

103. Li, ZH; Liu, HW; Wang, JP; Yang, SY; Dou, TQ; Qu, WX; Zhou, F; Huang, YQ; Sun, ZQ; Han, YX; Miao, GX; Ma, HQ. (2020) Reference-frame-independent measurement-device-independent quantum key distribution with mismatched-basis statistics. Optics Letters
104. Lin, J; Lütkenhaus, N. (2020) Trusted Detector Noise Analysis for Discrete Modulation Schemes of Continuous-Variable Quantum Key Distribution. Physical Review Applied
105. Lin, J., Mor, T.. (2020) Quantum Candies and Quantum Cryptography. Lecture Notes In Computer Science (Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics)
106. Liu, Z; Longa, P; Pereira, GCCF; Reparaz, O; Seo, H. (2020) Four$\mathbb {Q}$Q on Embedded Devices with Strong Countermeasures Against Side-Channel Attacks. IEEE Transactions On Dependable And Secure Computing
107. Lopp, R; Martin-Martinez, E. (2021) Quantum delocalization, gauge, and quantum optics: Light-matter interaction in relativistic quantum information. Physical Review A
108. Low, PJ; White, BM; Cox, AA; Day, ML; Senko, C. (2020) Practical trapped-ion protocols for universal qudit-based quantum computing. Physical Review Research
109. Luong, D; Chang, CWS; Vadiraj, AM; Damini, A; Wilson, CM; Balaji, B. (2020) Receiver Operating Characteristics for a Prototype Quantum Two-Mode Squeezing Radar. IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems
110. Madjarov, I.S., Covey, J.P., Shaw, A.L., Choi, J., Kale, A., Cooper, A., Pichler, H., Schkolnik, V., Williams, J.R., Endres, M.. (2021) Author Correction: High-fidelity entanglement and detection of alkaline-earth Rydberg atoms (Nature Physics, (2020), 16, 8, (857-861), 10.1038/s41567-020-0903-z). Nature Physics
111. Madjarov, IS; Covey, JP; Shaw, AL; Choi, J; Kale, A; Cooper, A; Pichler, H; Schkolnik, V; Williams, JR; Endres, M. (2020) High-fidelity entanglement and detection of alkaline-earth Rydberg atoms. Nature Physics
112. Martin-Martinez, E; Perche, TR; Torres, BDL. (2021) Broken covariance of particle detector models in relativistic quantum information. Physical Review D
113. Marwah, A; Touchette, D. (2020) Optical quantum communication complexity in the simultaneous-message-passing model. Physical Review A
114. Messaoudi, N; Chang, CWS; Vadiraj, AM; Bourassa, J; Balaji, B; Wilson, CM. (2020) Practical Advantage in Microwave Quantum Illumination. 2020 IEEE Radar Conference (Radarconf20)
115. Mills, K; Ronagh, P; Tamblyn, I. (2020) Finding the ground state of spin Hamiltonians with reinforcement learning. Nature Machine Intelligence
116. Mosca, M; Basso, JMV; Verschoor, SR. (2020) On speeding up factoring with quantum SAT solvers. Scientific Reports
117. Novodchuk, I; Bajcsy, M; Yavuz, M. (2021) Graphene-based field effect transistor biosensors for breast cancer detection: A review on biosensing strategies. Carbon
118. Novodchuk, I., Kayaharman, M., Ibrahim, K., Al-Tuairqi, S., Irannejad, M., Abdel-Rahman, E., Sanderson, J., Bajcsy, M., Yavuz, M.. (2020) B/N co-doped graphene oxide gel with extremely-high mobility and I<inf>ON</inf>/I<inf>OFF</inf> for large-area field effect transistors. Carbon
119. Osei, E; Lumini, J; Gunasekara, D; Osei, B; Asare, A; Laflamme, R. (2020) A review of predictive, prognostic and diagnostic biomarkers for non-small-cell lung cancer: towards personalised and targeted cancer therapy. Journal Of Radiotherapy In Practice
120. Pandey, SK; Paulsen, VI; Prakash, J; Rahaman, M. (2020) Entanglement breaking rank and the existence of SIC POVMs. Journal Of Mathematical Physics
121. Patel, T; Okamoto, J; Dekker, T; Yang, BW; Gao, JJ; Luo, X; Lu, WJ; Sun, YP; Tsen, AW. (2020) Photocurrent Imaging of Multi-Memristive Charge Density Wave Switching in Two-Dimensional 1T-TaS2. Nano Letters
122. Patel, T., Okamoto, J., Dekker, T., Yang, B., Gao, J., Luo, X., Lu, W., Sun, Y., Tsen, A.W.. (2020) Photocurrent Imaging of Multi-Memristive Charge Density Wave Switching in Two-Dimensional 1T-TaS<inf>2</inf>. Nano Letters
123. Paulsen, VI; Rahaman, M. (2021) Bisynchronous Games and Factorizable Maps. Annales Henri Poincare
124. Peterson, JPS; Sarthour, RS; Laflamme, R. (2020) Enhancing Quantum Control by Improving Shaped-Pulse Generation. Physical Review Applied
125. Plesha, CE; Kycia, JB. (2020) Resonant Frequency Adjusting of an MSA via Laser Ablation of the Input Coil. IEEE Transactions On Applied Superconductivity
126. Pugh, CJ; Lavigne, JF; Bourgoin, JP; Higgins, BL; Jennewein, T. (2020) Adaptive optics benefit for quantum key distribution uplink from ground to a satellite. Advanced Optical Technologies
127. Puri, S; St-Jean, L; Gross, JA; Grimm, A; Frattini, NE; Iyer, PS; Krishna, A; Touzard, S; Jiang, L; Blais, A; Flammia, ST; Girvin, SM. (2020) Bias-preserving gates with stabilized cat qubits. Science Advances
128. Qassim, H; Wallman, JJ. (2020) Classical vs quantum satisfiability in linear constraint systems modulo an integer. Journal Of Physics A-Mathematical And Theoretical

129. Qiu, JW; Bharadwaj, D; Anderson, P; Malik, S; Semnani, B; Zeeshan, M; Poole, P; Dalacu, D; Reimer, M; Bajcsy, M. (2020) Low-cost spectroscopy of individual quantum dots. 2020 Conference On Lasers And Electro-Optics (Cleo)
130. Rajabi, F; Chamma, MA; Wyenberg, CM; Mathews, A; Houde, M. (2020) A simple relationship for the spectro-temporal structure of bursts from FRB 121102. Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society
131. Rajabi, F; Houde, M. (2020) Astronomical masers and Dicke's superradiance. Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society
132. Rosset, D; Schmid, D; Buscemi, F. (2020) Type-Independent Characterization of Spacelike Separated Resources. Physical Review Letters
133. Sajeed, S; Sultana, N; Lim, CCW; Makarov, V. (2020) Bright-light detector control emulates the local bounds of Bell-type inequalities. Scientific Reports
134. Salek, F; Anshu, A; Hsieh, MH; Jain, R; Fonollosa, JR. (2020) One-Shot Capacity Bounds on the Simultaneous Transmission of Classical and Quantum Information. IEEE Transactions On Information Theory
135. Sarenac, D; Kapahi, C; Silva, AE; Cory, DG; Taminiau, I; Thompson, B; Pushin, DA. (2020) Direct discrimination of structured light by humans. Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America
136. Sarreshtedari, F; Rashedi, A; Ghashghaei, F; Sabooni, M. (2021) Engineering of the Cesium Zeeman sublevel populations using sequences of laser pulses and RF excitation. Physica Scripta
137. Schaeffer, L; Wu, KY. (2020) Two Infinite Words with Cubic Subword Complexity. Journal Of Integer Sequences
138. Schmid, D; Rosset, D; Buscemi, F. (2020) The type-independent resource theory of local operations and shared randomness. Quantum
139. Schwarz, S; Kapahi, C; Xu, R; Cameron, AR; Sarenac, D; MacLean, JPW; Kuntz, KB; Cory, DG; Jennewein, T; Resch, KJ; Pushin, DA. (2020) Talbot effect of orbital angular momentum lattices with single photons. Physical Review A
140. Shen, D; Duley, WW; Peng, P; Xiao, M; Feng, JY; Liu, L; Zou, GS; Zhou, YN. (2020) Moisture-Enabled Electricity Generation: From Physics and Materials to Self-Powered Applications. Advanced Materials
141. Shi, BW; Kato, K; Kim, IH. (2020) Fusion rules from entanglement. Annals Of Physics
142. Sikora, J; Selby, JH. (2020) Impossibility of coin flipping in generalized probabilistic theories via discretizations of semi-infinite programs. Physical Review Research
143. Son, H; Park, JJ; Ketterle, W; Jamison, AO. (2020) Collisional cooling of ultracold molecules. Nature
144. Stritzelberger, N; Henderson, LJ; Baccetti, V; Menicucci, NC; Kempf, A. (2021) Entanglement harvesting with coherently delocalized matter. Physical Review D
145. Teixido-Bonfill, A; Ortega, A; Martin-Martinez, E. (2020) First law of quantum field thermodynamics. Physical Review A
146. Tennant, DM; Orbach, RL. (2020) Collapse of the waiting time effect in a spin glass. Physical Review B
147. Tjoa, E; Mann, RB. (2020) Harvesting correlations in Schwarzschild and collapsing shell spacetimes. Journal Of High Energy Physics
148. Tjoa, E; Martin-Martinez, E. (2020) Vacuum entanglement harvesting with a zero mode. Physical Review D
149. Tratzmiller, B; Haase, JF; Wang, ZY; Plenio, MB. (2021) Parallel selective nuclear-spin addressing for fast high-fidelity quantum gates. Physical Review A
150. Vadiraj, AM; Ask, A; McConkey, TG; Nsanzineza, I; Chang, CWS; Kockum, AF; Wilson, CM. (2021) Engineering the level structure of a giant artificial atom in waveguide quantum electrodynamics. Physical Review A
151. Vasmer, M; Browne, DE; Kubica, A. (2021) Cellular automaton decoders for topological quantum codes with noisy measurements and beyond. Scientific Reports
152. Wang, CH; Wossnig, L. (2020) A QUANTUM ALGORITHM FOR SIMULATING NON-SPARSE HAMILTONIANS. Quantum Information & Computation
153. Wang, DS. (2020) Choi states, symmetry-based quantum gate teleportation, and stored-program quantum computing. Physical Review A
154. Wang, DS; Zhu, GY; Okay, C; Laflamme, R. (2020) Quasi-exact quantum computation. Physical Review Research
155. Wang, TJ; Ghose, S. (2020) Control power of quantum channels is not multiplicative. New Journal Of Physics
156. Wen, BY; Deimert, C; Wang, SY; Xu, C; Rassel, SS; Wasilewski, Z; Ban, DY. (2020) Six-level hybrid extraction/injection scheme terahertz quantum cascade laser with suppressed thermally activated carrier leakage. Optics Express

157. Willick, K; Baugh, J. (2020) Self-driven oscillation in Coulomb blockaded suspended carbon nanotubes. Physical Review Research
158. Wolfe, E; Schmid, D; Sainz, AB; Kunjwal, R; Spekkens, RW. (2020) Quantifying Bell: the Resource Theory of Nonclassicality of Common-Cause Boxes. Quantum
159. Xie, J; Zhang, AN; Cao, NP; Xu, HC; Zheng, KM; Poon, YT; Sze, NS; Xu, P; Zeng, B; Zhang, LJ. (2020) Observing Geometry of Quantum States in a Three-Level System. Physical Review Letters
160. Yamaguchi, K; Ahmadzadegan, A; Simidzija, P; Kempf, A; Martin-Martinez, E. (2020) Superadditivity of channel capacity through quantum fields. Physical Review D
161. Yang, X., Chen, X., Li, J., Peng, X., Laflamme, R.. (2021) Hybrid quantum-classical approach to enhanced quantum metrology. Scientific Reports
162. Yazdi, YK; Letizia, M; Kempf, A. (2021) Lorentzian spectral geometry with causal sets. Classical And Quantum Gravity
163. Yoon, T; Bajcsy, M. (2020) Simulating gravity-assisted loading of laser-cooled atoms into a hollow-core photonic-bandgap fiber. Journal Of Physics B-Atomic Molecular And Optical Physics
164. Yurtalan, MA; Shi, J; Kononenko, M; Lupascu, A; Ashhab, S. (2020) Implementation of a Walsh-Hadamard Gate in a Superconducting Qutrit. Physical Review Letters
165. Zadeh, IE; Los, JWN; Gourgues, RBM; Chang, J; Elshaari, AW; Zichi, JR; van Staaden, YJ; Swens, JPE; Kalhor, N; Guardiani, A; Meng, Y; Zou, K; Dobrovolskiy, S; Fognini, AW; Schaart, DR; Dalacu, D; Poole, PJ; Reimer, ME; Hu, XL; Pereira, SF; Zwiller, V; Dorenbos, SN. (2020) Efficient Single-Photon Detection with 7.7 ps Time Resolution for Photon-Correlation Measurements. Acs Photonics
166. Zhang, JS; Chen, AX. (2020) Large and robust mechanical squeezing of optomechanical systems in a highly unresolved sideband regime via Duffing nonlinearity and intracavity squeezed light. Optics Express
167. Zhang, JS; Chen, AX. (2020) Large mechanical squeezing beyond 3dB of hybrid atom-optomechanical systems in a highly unresolved sideband regime. Optics Express
168. Zhang, YB; Coles, PJ; Winick, A; Lin, J; Lütkenhaus, N. (2021) Security proof of practical quantum key distribution with detection-efficiency mismatch. Physical Review Research
169. Zhong, XQ; Wang, WY; Qian, L; Lo, HK. (2021) Proof-of-principle experimental demonstration of twin-field quantum key distribution over optical channels with asymmetric losses. npj Quantum Information
170. Zhou, F; Qu, WX; Wang, JP; Dou, TQ; Li, ZH; Yang, SY; Sun, ZQ; Miao, GX; Ma, HQ. (2020) Twin-field quantum key distribution with heralded single photon source. European Physical Journal D