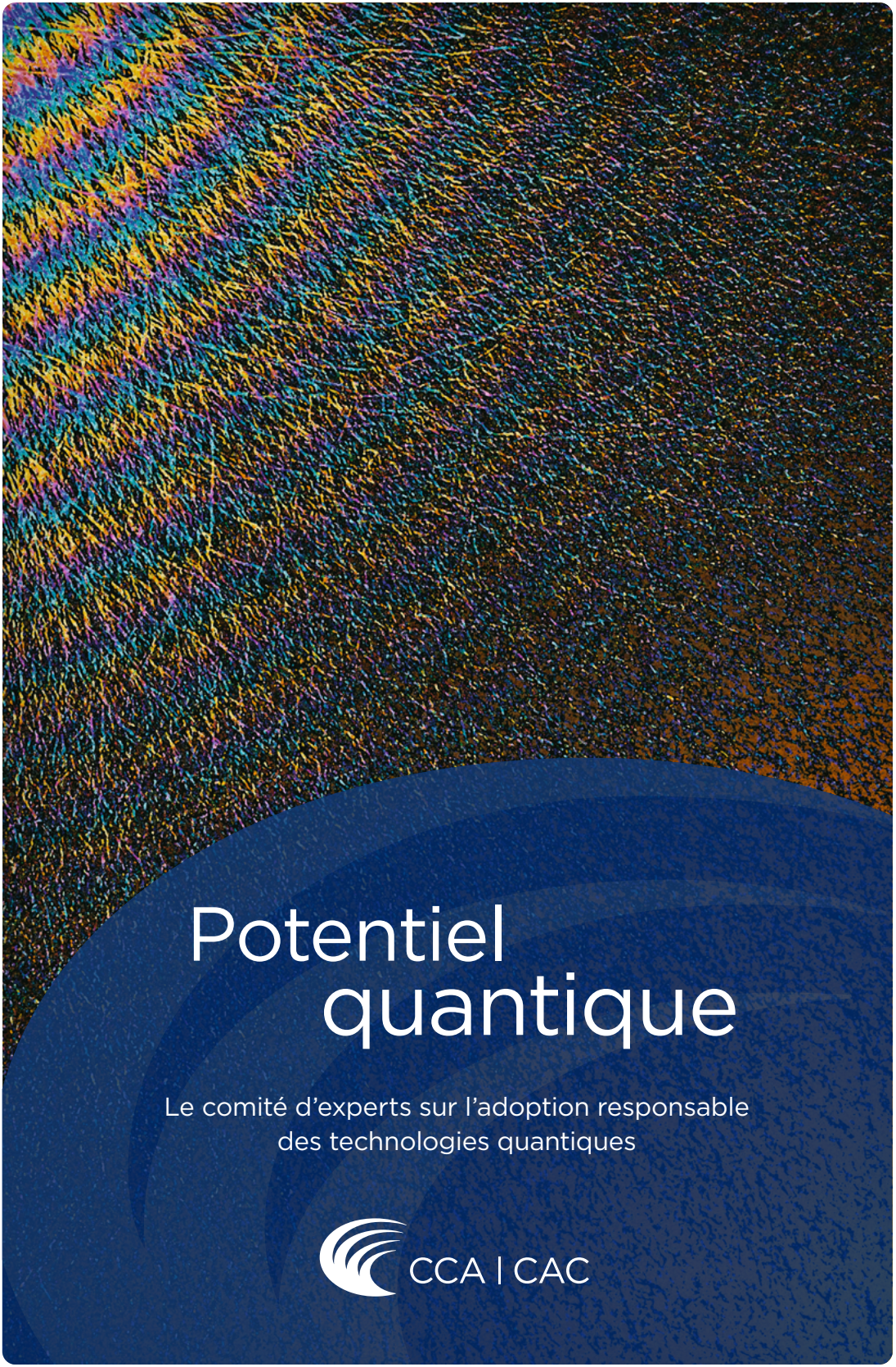


Potentiel quantique

Le comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques

CCA | CAC

Potentiel quantique

Le comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques

CCA | CAC

CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES
180, rue Elgin, bureau 1401, Ottawa (Ontario) Canada K2P 2K3

Le projet sur lequel porte ce rapport a été entrepris avec l'approbation du conseil d'administration et du Conseil des académies canadiennes (CAC). Les membres du comité d'experts responsables du rapport ont été choisis par le CAC en raison de leurs compétences particulières et dans le but d'obtenir un éventail équilibré de points de vue.

Ce rapport répond à une demande du Conseil national de recherches Canada (CNRC) et d'Innovation, Science et Développement économique Canada (ISDE). Le CNRC et ISDE n'ont participé ni à la sélection des membres du comité d'experts ni à l'élaboration du rapport. Les opinions, constatations et conclusions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs, du comité d'experts sur l'adoption des technologies quantiques, et ne représentent pas nécessairement le point de vue de leurs organisations d'affiliation ou d'emploi.

Bibliothèque et Archives Canada

ISBN : 978-1-990592-42-3 (livre)
978-1-990592-43-0 (livre électronique)

Le rapport doit être cité de la façon suivante :

CAC — Conseil des académies canadiennes, 2023. *Potentiel quantique.* Ottawa, ON, Comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques, CAC.

Avis de non-responsabilité

Les données et l'information Internet mentionnées dans le présent rapport étaient exactes, à la connaissance du CAC, au moment de la publication. En raison de la nature dynamique d'Internet, des ressources gratuites et accessibles au public peuvent subséquemment faire l'objet de restrictions ou de frais d'accès, et l'emplacement des éléments d'information peut changer lorsque les menus et les pages Web sont modifiés.

Les mentions faites dans le présent rapport à une entreprise, un produit commercial, un processus ou un service donné par le biais d'un nom commercial, d'une marque de commerce, d'un fabricant ou autre ne constituent pas l'approbation ou la recommandation de celui-ci ou une marque de favoritisme à son égard.

CCA | CAC

Imprimé à Ottawa, Canada

Canada

Ce projet a été rendu possible grâce au soutien du gouvernement du Canada

Le comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques aimerait remercier les Inuits, les Métis et les Premières Nations d'avoir, depuis toujours, assuré l'intendance du territoire qu'on appelle aujourd'hui le Canada.

Le Conseil des académies canadiennes (CAC) reconnaît que ses bureaux d'Ottawa sont situés sur le territoire ancestral non cédé et non abandonné de la Nation algonquine Anishinaabe, qui a pris soin de l'environnement de ce territoire depuis des millénaires. Bien que les bureaux du CAC se trouvent à cet endroit, ses travaux en faveur de la prise de décision éclairée par des données probantes peuvent avoir des bienfaits plus étendus dans tout le Canada. Le CAC reconnaît l'importance de s'appuyer sur un large éventail de connaissances et d'expériences pour élaborer des politiques qui permettront de bâtir une société plus forte, plus équitable et plus juste.

Le CAC

Le CAC est un organisme sans but lucratif qui réalise des évaluations indépendantes, fondées sur la science et faisant autorité, par l'entremise de comités d'experts, afin de guider l'élaboration de politiques publiques au Canada. Dirigés par un conseil d'administration et guidés par un comité consultatif scientifique, les travaux du CAC répondent à une large définition de la science, qui intègre les sciences naturelles, sociales et de la santé, ainsi que le génie et les sciences humaines. Les évaluations du CAC sont réalisées par des comités multidisciplinaires et indépendants d'experts canadiens et étrangers. Ces évaluations cherchent à cerner les problèmes nouveaux, les lacunes de connaissances, les forces du Canada, et les tendances et pratiques internationales. Ces études fournissent aux décideurs gouvernementaux, aux chercheurs et aux parties prenantes l'information de grande qualité dont ils ont besoin pour élaborer des politiques publiques éclairées et innovatrices.

Tous les rapports d'évaluation du CAC sont soumis à un examen formel et sont publiés et mis à la disposition du public sans frais. Les évaluations peuvent être entreprises à la demande de fondations, d'organismes non gouvernementaux, du secteur privé et de tout ordre de gouvernement.

www.rapports-cac.ca

@cca_reports

Comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques

Guidé par son comité consultatif scientifique et son conseil d'administration, le CAC a constitué le **comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques** pour mener à bien cette évaluation. Chacun des membres de ce comité a été choisi pour son expertise, son expérience et son leadership éprouvé dans des domaines pertinents pour le projet.

Raymond Laflamme, O.C., MSRC (président), chaire Mike-et-Ophelia-Lazaridis-John-von-Neumann d'informatique quantique; professeur, Département de physique et d'astronomie, et Institut d'informatique quantique, Université de Waterloo; professeur agrégé, Institut Perimeter de physique théorique (Waterloo, Ont.)

Jacqueline Bartlett, professeure agrégée, secteur technologique, faculté de commerce, université Memorial de Terre-Neuve (St. John's, T.-N.-L.)

Sally Daub, fondatrice et associée directrice, Pool Global Partners (Coldwater, Ont.)

Shohini Ghose, titulaire d'une bourse supérieure TED; chaire pour les femmes en sciences et en génie du CRSNG; professeure de physique et d'informatique, Université Wilfrid Laurier; directrice, Recherche et programmes, Centre Laurier pour les femmes en sciences (Waterloo, Ont.)

Paul Gulyas, directeur principal de l'innovation, IBM Canada (Ottawa, Ont.)

Mark W. Johnson, vice-président principal, Technologies quantiques et produits de systèmes, D-Wave Systems Inc. (Burnaby, C.-B.)

Elham Kashefi, professeure d'informatique quantique, École d'informatique, Université d'Édimbourg; scientifique en chef, Centre national d'informatique quantique du Royaume-Uni; directrice de recherche au CNRS, LIP6 Sorbonne Université (Paris, France)

Mauritz Kop, directeur fondateur du Centre pour la technologie quantique responsable de Stanford, Université Stanford (Stanford, CA)

Dominic Martin, professeur, École des sciences de la gestion, Université du Québec à Montréal (Montréal, Qc)

Darius Ornston, professeur agrégé, École d'affaires mondiales et de politique publique Munk, Université de Toronto (Toronto, Ont.)

Barry C. Sanders, MSRC, directeur, Institut des sciences et technologies quantiques, Université de Calgary (Calgary, Alb.)

Eric Santor, conseiller du gouverneur, Banque du Canada (Ottawa, Ont.)

Christian Sarra-Bournet, directeur de la stratégie quantique et directeur exécutif, Institut quantique, Université de Sherbrooke (Sherbrooke, Qc)

Le CAC remercie également **Stephanie Simmons,** professeure agrégée, Université Simon Fraser; agente quantique en chef, Photonic Inc. (Coquitlam, C.-B.), pour sa contribution.

Message du président-directeur général

Tout au long du XXe siècle, les physiciens ont développé la théorie de la mécanique quantique, stimulant le progrès technologique qui a donné naissance à l'ère de l'information. Aujourd'hui, une nouvelle catégorie de technologies innovantes applique cette théorie aux multiples façons dont nous traitons l'information elle-même. Les technologies quantiques recèlent un potentiel de transformation pour un ensemble de secteurs, notamment la santé, les produits pharmaceutiques, la recherche scientifique, les télécommunications, la fabrication et la défense. Les prochaines années détermineront jusqu'à quel point cette transformation sera effective.

Le Canada bénéficie d'un solide environnement de recherche quantique et a priorisé la production et la commercialisation des technologies quantiques. Pour autant, alors que ces technologies se développent, il existe encore d'énormes occasions de se pencher sur une approche responsable de leur adoption et d'anticiper une série de préoccupations connexes allant de la sécurité de l'information à l'acceptation sociale. Si l'adoption généralisée des technologies quantiques reste une perspective lointaine, leurs conséquences possibles — sur la sécurité nationale, la prospérité économique et la sécurité publique — doivent être prises en compte rapidement et durablement.

Potentiel quantique détaille les possibilités et les problèmes que recèlent les technologies quantiques. On évalue aussi les conditions qui permettraient un large accès à ces technologies au Canada, ainsi que les données probantes et les connaissances sur leur adoption responsable.

Je suis reconnaissant aux membres du comité d'experts, présidé par Raymond Laflamme, pour leur contribution essentielle à l'état de préparation quantique du Canada et à l'élaboration des politiques qui le façonneront.

Eric M. Meslin, Ph. D., MSRC, MACSS, IAS.A
Président-directeur général, Conseil des académies canadiennes

Message du président

L'être humain est curieux. Cette curiosité nous pousse à observer la nature et à former des théories pour comprendre le monde. Ces théories décrivent non seulement les phénomènes physiques connus, mais elles en prédisent également de nouveaux. Une fois cela compris, il est possible de transformer des observations passives en contrôle actif et utiliser les phénomènes à notre avantage, ce qui conduit à de nouvelles technologies, lesquelles peuvent avoir une multitude de répercussions et même modifier le tissu social. En outre, elles peuvent aboutir à la création d'outils qui nous permettent de pousser notre curiosité plus loin, et d'amorcer ainsi un nouveau cycle de découverte et d'innovation. Nous ne pouvons que nous interroger sur les phénomènes naturels qui caractériseront ces cycles à l'avenir.

Au XXe siècle, les recherches sur la physique de la mécanique quantique ont provoqué une révolution dans les technologies — laser, transistor, imagerie par résonance magnétique — qui sont le fondement du monde moderne. Nous vivons actuellement une *deuxième révolution quantique* dans les domaines de l'informatique, des communications et de la détection quantiques, qui pourrait avoir des répercussions encore plus importantes. Toutefois, il subsiste des obstacles scientifiques et techniques majeurs, et l'impact économique des technologies quantiques sera probablement concentré, du moins à court terme, dans certains secteurs. Bien que des prototypes et des applications précoces commencent à voir le jour, la commercialisation et l'adoption à grande échelle de ces technologies ne surviendront probablement pas avant de nombreuses années.

Néanmoins, le moment est venu de concentrer notre attention sur les politiques. Il est encore assez tôt pour peser sur le développement et sur l'incidence de ces technologies, mais l'occasion d'agir va bientôt disparaître. L'intérêt et les investissements internationaux dans le potentiel des technologies quantiques s'intensifient, et le leadership précoce du Canada est menacé. La *Stratégie quantique nationale* publiée en 2023 est un instrument important pour stimuler la production et la commercialisation des technologies quantiques au Canada. Toutefois, pour pleinement exploiter ces technologies, des interventions politiques délibérées visant à garantir leur adoption par les utilisateurs finaux sont nécessaires. Il faudra également mettre davantage l'accent sur les problèmes éthiques, juridiques, sociaux et politiques créés ou exacerbés par leur adoption et leur utilisation.

Je tiens à remercier sincèrement les membres du comité d'experts, qui ont tous donné généreusement de leur temps à ce sujet crucial. Leur expertise, leur engagement respectueux et leur travail acharné ont permis de produire un

rapport complet et opportun. Je veux également remercier les pairs examinateurs, dont les commentaires anonymes ont contribué à consolider ce rapport. Enfin, au nom de l'ensemble du comité d'experts, je tiens à remercier le personnel du CAC pour son dévouement et son soutien tout au long de l'évaluation.

J'espère vivement que ce rapport motivera et soutiendra une approche globale et tournée vers l'avenir, qui permettra au Canada de réaliser son potentiel quantique.

Raymond Laflamme, O.C., MSRC

Président, comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques

Équipe de projet du CAC

Équipe d'évaluation :	**Jeff Kinder,** directeur de projet **Adam Fortais,** associé de recherche **Matthew Ivanowich,** associé de recherche **Anastasia Konina,** associée de recherche **Ananda Fadila,** coordonnatrice de projet
Publication et communications :	**Andrea Hopkins,** gestionnaire, planification et production **Brendan Fitzgerald,** Spécialiste communication
Avec l'aide de :	**Jérôme Marty,** directeur de projet **Kate Hemstreet,** coordonnatrice de projet **Kundai Sibanda,** coordonnatrice de projet **Agnes Sternadel,** coordonnatrice de projet

et de :

Conception de la couverture	Eric Heller
Révision	Jody Cooper
Mise en page	gordongroup|TAAG
Traducteur, En-Fr	François Abraham

Examen du rapport

Le présent rapport (sous forme d'ébauche) a été examiné par les personnes répertoriées ci-dessous, qui ont été sélectionnées par le CAC pour la diversité de leurs points de vue et de leurs domaines d'expertise. Les examinateurs ont évalué l'objectivité et la qualité du rapport. Le comité a étudié intégralement leurs observations confidentielles et a intégré bon nombre de leurs suggestions. Le CAC ne leur a pas demandé de cautionner les conclusions du rapport et ils n'ont pas vu la version finale avant publication. La responsabilité du contenu final de ce rapport incombe entièrement au comité d'experts qui l'a rédigé et au CAC.

Le CAC tient à remercier les personnes suivantes pour leur examen du présent rapport :

James Der Derian, directeur et professeur, Centre d'études sur la sécurité internationale, Université de Sydney (Sydney, Australie)

Jim Hinton, professeur adjoint, Centre de Leadership et d'innovation en ingénierie John M. Thompson, Université Western (London, Ont.)

Thomas Jennewein, professeur agrégé en physique et astronomie, Université de Waterloo (Waterloo, Ont.)

Elicia Maine, vice-présidente associée, Mobilisation des connaissances et innovation, et professeure W.J. VanDusen d'innovation et d'entrepreneuriat, Université Simon Fraser (Burnaby, C.-B.)

Daniel Munro, titulaire d'une bourse supérieure, École d'affaires mondiales et de politique publique Munk, Université de Toronto (Toronto, Ont.)

Juliette Peyronnet, cheffe du développement des affaires, Xanadu Quantum Technologies Inc. (Toronto, Ont.)

David Roy-Guay, directeur général, SBQuantum (Sherbrooke, Qc)

Teresa Scassa, Chaire de recherche du Canada en politiques et droit de l'information, Faculté de droit, Université d'Ottawa (Ottawa, Ont.)

Stephanie Simmons, professeure agrégée, Université Simon Fraser; agente quantique en chef, Photonic Inc. (Coquitlam, C.-B.).

Jacob Taylor, boursier NIST, Institut national des normes et de la technologie (Cambridge, MA)

Louise Turner, directrice générale, Quantum Algorithms Institute (Surrey, C.-B.)

L'examen du rapport a été supervisé, au nom du conseil d'administration et du comité consultatif scientifique du CAC, par **David A. Wolfe,** professeur de sciences politiques, Université de Toronto à Mississauga; codirecteur du Laboratoire d'innovation politique, École d'affaires mondiales et d'affaires publiques Munk, Université de Toronto. Son rôle était de veiller à ce que le comité d'experts prenne en considération de façon entière et équitable les avis des examinateurs. Le conseil d'administration du CAC n'autorise la publication d'un rapport de comité d'experts qu'une fois que la personne chargée de superviser l'examen du rapport par les pairs a confirmé que celui-ci satisfait bien aux exigences du CAC. Le CAC remercie monsieur Wolfe d'avoir supervisé consciencieusement l'examen du rapport.

Remerciements

Le comité d'experts et le personnel du CAC tiennent à remercier sincèrement les personnes suivantes pour les renseignements et les points de vue qu'elles ont offerts à leur considération :

Ömer Kaya, directeur général, Global Advantage Consulting Group.

Trevor Lanting, vice-président, Logiciels, Algorithmes et services infonuagiques, D-Wave Systems Inc.

Michael Rowell, directeur, Politique et recherche, Global Advantage Consulting Group.

Paul Terry, directeur général, Photonic Inc.

Murray Thom, vice-président, Innovation en affaires quantiques, D-Wave Systems Inc.

David B. Watters, président, Global Advantage Consulting Group.

Les **fonctionnaires anonymes** du Service canadien du renseignement de sécurité (SCRS).

Sommaire

Le monde vit actuellement une *deuxième révolution quantique*. Les technologies quantiques évoluent depuis plusieurs décennies, passant du concept théorique à la mise en pratique. Une évolution qui inclut des améliorations constantes et accélérées des capacités, des réductions de coûts et une variété croissante d'applications potentielles et nouvelles. Les technologies quantiques offrent la possibilité d'exploiter les propriétés de la mécanique quantique afin de repousser les limites du possible. Par exemple, la détection quantique pourrait permettre des mesures d'une précision sans précédent; les communications quantiques promettent d'améliorer la sécurité des données transmises et stockées et l'informatique quantique pourrait avoir une incidence sur tous les aspects de la technologie de l'information et optimiser de nombreux processus, notamment la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la fabrication et la distribution des ressources (p. ex. l'eau ou l'énergie).

En 2023, le gouvernement du Canada a publié sa *Stratégie quantique nationale* (SQN), qui vise à renforcer l'écosystème quantique canadien en investissant dans des programmes qui soutiennent la recherche scientifique, le développement des talents et la commercialisation des technologies. Lorsque les technologies quantiques seront commercialisées, elles pourraient avoir des applications dans un large éventail de secteurs, notamment la chimie et la science des matériaux, la santé, la défense, la finance, la fabrication, les ressources naturelles, les produits pharmaceutiques, la recherche scientifique, l'espace et les télécommunications, procurant ainsi d'importants avantages micro et macroéconomiques à des industries et à l'économie canadienne dans son ensemble.

Toutefois, à l'image d'autres technologies, les solutions quantiques comportent un certain nombre de risques susceptibles d'avoir des effets négatifs sur la vie des citoyens du Canada. Par exemple, l'utilisation des technologies quantiques (ainsi que de technologies hybrides quantiques-classiques) par des acteurs malveillants pourrait saper l'infrastructure numérique qui sous-tend des domaines essentiels de la vie quotidienne, menacer la confidentialité et la sécurité des données et aggraver la fracture numérique.

Devant la croissance rapide de l'écosystème quantique national et international, Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDE), le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et trois autres ministères fédéraux de soutien[1] (ci-après, « le commanditaire ») ont demandé au Conseil des académies canadiennes (CAC) de constituer un groupe d'experts chargé de cerner et d'évaluer

1 L'Agence spatiale canadienne, Recherche et développement pour la défense Canada et Transports Canada.

les possibilités et les défis que présente l'adoption des technologies quantiques au Canada. Pour répondre à ce mandat, le CAC a formé un comité multidisciplinaire et multisectoriel d'experts, le comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques (ci-après, « le comité »), composé de personnes possédant une expérience et une expertise dans les domaines de la science quantique, du développement des affaires, de l'éthique, de l'économie, du droit et des politiques publiques.

Réponse au mandat

À la lumière des tendances actuelles concernant l'évolution des technologies quantiques, quelles possibilités et quels défis ces technologies présentent-elles au Canada?

Des obstacles scientifiques et techniques entravent actuellement la commercialisation et l'adoption de la plupart des technologies quantiques. Bien que les prototypes d'informatique quantique existants aient une valeur scientifique et promettent certains avantages en matière de calcul, il est peu probable que l'informatique quantique à grande échelle atteigne la maturité technologique au cours des dix prochaines années. De même, dans le domaine des communications quantiques, l'échange quantique de clés (QKD) doit surmonter d'importantes limites de portée, de vitesse et de coût pour atteindre le stade de la commercialisation. À court terme, la plupart des initiatives visant à mieux protéger les communications contre le décryptage par des ordinateurs quantiques porteront en priorité sur la cryptographie résistante aux méthodes quantiques (QRC). Parmi les différentes technologies quantiques, les capteurs sont peut-être les plus près de la commercialisation et de l'adoption, mais un certain nombre de défis techniques et financiers sont encore à relever dans ce domaine.

À la lumière de ces tendances, toutes les prévisions concernant les délais d'adoption et les avantages économiques des technologies quantiques restent spéculatives et peuvent contribuer à un battage médiatique. Si le battage n'est pas mauvais en soi (il peut, par exemple, contribuer à stimuler la recherche et développement), le fait que les technologies quantiques pourraient échouer à tenir des promesses exagérées ou sensationnalistes pourrait ébranler la confiance du public dans l'innovation, entraîner une réduction du financement de la recherche et dissuader les utilisateurs finaux d'adopter des solutions qui peuvent être bénéfiques pour leur organisation. La mesure dans laquelle les technologies quantiques offertes sur le marché réaliseront leur potentiel économique au Canada

dépendra du secteur. En effet, certains secteurs souvent cités comme pionniers (p. ex. les produits pharmaceutiques, la chimie) contribuent relativement peu au produit intérieur brut du pays. Pour mieux exploiter le potentiel économique de ces technologies, les stratégies de diffusion et d'adoption pourraient donc cibler les applications dans des secteurs particulièrement importants pour l'économie du Canada, comme les ressources naturelles et la santé.

Outre les avantages économiques qu'elles offrent, les technologies quantiques pourraient renforcer la sécurité de l'infrastructure et des données, améliorer la précision des mesures et optimiser et simuler divers processus. La QRC et les capteurs quantiques — deux technologies près de la commercialisation — présentent des possibilités d'application dans divers secteurs, notamment la finance, la santé, les produits pharmaceutiques et les télécommunications. Le rôle principal de la QRC (et du QKD), quel que soit le secteur, est de protéger les données stockées et transmises contre le décryptage par un futur ordinateur quantique. Les possibilités offertes par les capteurs quantiques, quant à elles, dépendent de leur utilisation dans différents secteurs. Ils peuvent être employés, par exemple, pour mettre au point des systèmes de navigation pour sous-marins (défense), pour détecter les conditions des sols (agriculture), pour surveiller l'intégrité des infrastructures (énergie) et pour détecter et caractériser des gisements souterrains sans forage ou excavation (exploitation minière, production pétrolière et gazière). Les avantages supposés de l'informatique quantique résident dans sa capacité à optimiser et à simuler des processus et à prévoir des événements. Par exemple, les ordinateurs quantiques peuvent servir à effectuer des simulations qui pourraient aider les chercheurs à comprendre les réactions chimiques et à concevoir de meilleurs catalyseurs, à optimiser la logistique et la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans les transports et la défense et à élaborer des prévisions et des recommandations plus précises en santé et en finance.

Quelles sont les conditions favorisant un large accès aux technologies quantiques et leur préparation en vue de la commercialisation au Canada?

Les dépendances internationales et la rareté des composants et des matériaux peuvent créer des goulots d'étranglement sur la voie de la commercialisation des technologies quantiques au Canada. Certaines matières premières (p. ex. le rubidium 87, le calcium 43, les isotopes du baryum ou l'hélium 3) et certains composants manufacturés nécessaires à la fabrication de ces technologies (p. ex. les matériaux spécialisés de nanofabrication et de microfabrication ou les dispositifs cryogéniques) sont rares et ne peuvent être obtenus qu'auprès d'une poignée de fournisseurs étrangers. Si l'établissement de feuilles de route peut

aider à définir ces goulots d'étranglement, la provenance réelle de certains composants ou matériaux est parfois inconnue. La coopération internationale joue donc un rôle essentiel dans la sécurisation de la chaîne d'approvisionnement pour la production de technologies quantiques au Canada. En outre, la production nationale de composants utilisés dans de nombreuses de ces technologies (p. ex. les dispositifs photoniques) pourrait conférer aux entreprises quantiques canadiennes un certain poids dans les chaînes d'approvisionnement mondiales et dans les partenariats internationaux.

Des pôles quantiques regroupant des petites et moyennes entreprises (PME), des services d'aide aux entreprises et des instituts de recherche ont vu le jour en Colombie-Britannique, en Alberta, en Ontario et au Québec. Ils peuvent s'appuyer sur plusieurs stratégies de transfert de technologie — vente ou concession de licences de propriété intellectuelle, création d'entreprises et transfert de personnel du milieu universitaire vers l'industrie — pour faire avancer l'état de préparation au marché des technologies quantiques. Il est toutefois difficile de cerner les pratiques prometteuses en matière de transfert technologique en raison du manque de données quantitatives et qualitatives permettant d'évaluer leur efficacité. En outre, le regroupement de l'expertise quantique peut entraîner des disparités régionales. Certaines régions ne disposent pas de pôles quantiques et sont absentes du pilier de la commercialisation de la SQN. Cela peut entraver la diffusion des technologies dans l'ensemble du pays et exacerber les inégalités entre les régions et les communautés.

Quels sont les principaux obstacles socioéconomiques, réglementaires et éthiques à l'adoption des technologies quantiques au Canada?

L'adoption des technologies quantiques comporte un certain nombre de conséquences éthiques, juridiques, sociales et politiques (ELSPI) interdépendantes. Le groupe a analysé ces conséquences par le biais d'une démarche (les ELSPI quantiques) favorable à l'innovation pour ce qui est des technologies quantiques, qui cherche à maximiser les avantages et à atténuer les risques découlant de leur adoption et qui présente des défis nouveaux et comme familiers. Par exemple, la possibilité pour l'informatique quantique de décrypter des systèmes de chiffrement populaires présente des risques pour la vie privée et la sécurité nationale d'une ampleur jamais vue jusqu'ici. Des acteurs malveillants pourraient utiliser des ordinateurs quantiques pour pirater des données personnelles et compromettre la sécurité de l'infrastructure qui sous-tend des fonctions sociétales cruciales, telles que les systèmes de santé, financiers et industriels. Même si les technologies quantiques sont utilisées uniquement à des fins légitimes, certains acteurs peuvent exploiter la complexité scientifique

inhérente à la mécanique quantique pour faciliter la diffusion et l'acceptation par le public d'informations erronées sur ces technologies. Cela pourrait éroder la confiance du public, entraîner une réduction du financement de la recherche, ralentir l'évolution des technologies quantiques et étouffer l'adoption des technologies par les utilisateurs finaux.

Certains problèmes sociaux et éthiques actuels seront exacerbés par la capacité des technologies quantiques à optimiser des processus familiers, notamment la surveillance, la prise de décision automatisée et l'exploitation des ressources naturelles. Dans la mesure où les systèmes de prise de décision automatisée reposant sur les technologies quantiques sont entraînés à partir de données erronées, ils peuvent accroître les pratiques discriminatoires à l'encontre des personnes et des groupes sous-représentés et racisés. De plus, l'examen minutieux et la contextualisation des renseignements sur les gens (également connu sous le nom de processus de création de sens) peuvent minimiser les mesures de protection de la vie privée et optimiser les instruments d'apprentissage machine qui transforment les données personnelles en marchandises. Enfin, certains types de détection quantique présentent des risques pour la vie privée en raison de leur capacité à effectuer des recherches et une surveillance publique à distance. Le droit relatif à la protection de la vie privée peut protéger les personnes contre certaines formes de surveillance quantique, mais des réformes juridiques seront nécessaires face au risque accru d'identification de données précédemment anonymisées (c.-à-d. la réidentification des données) à des fins de prévision, de surveillance et de prise de décision.

L'accès limité aux technologies quantiques peut aggraver la fracture numérique entre les gens, les régions et les pays. Les grandes entreprises technologiques établissent actuellement leur domination dans le secteur quantique, en particulier en informatique quantique, en acquérant des entreprises plus petites ou en proposant l'informatique quantique en tant que service. La concentration de l'informatique quantique entre les mains de quelques entreprises peut entraîner des disparités dans l'accès à la technologie entre les groupes économiquement favorisés et défavorisés, et entre les utilisateurs de différents pays et régions du monde.

L'abus de position dominante par de grandes entreprises quantiques situées à l'étranger concerne particulièrement le Canada, dont la croissance économique repose sur les PME. Des coûts prohibitifs et un manque d'expertise empêchent ces dernières d'adopter des solutions technologiques innovantes pour développer leurs activités. De même, la politique de concurrence du Canada ainsi que les diverses mesures de protection offertes par le droit de la propriété intellectuelle peuvent permettre aux principaux acteurs du marché d'atteindre et de maintenir

une position dominante dans le secteur quantique, créant ainsi des obstacles pour les PME canadiennes désireuses d'adopter les technologies quantiques.

Une approche responsable de l'adoption des technologies quantiques conformément à l'ELSPI quantique repose sur des mesures sanctionnées par l'État et d'autoréglementation qui anticipent, préviennent et atténuent les préjudices et les risques. Cette approche s'appuie sur une analyse historique des réponses politiques apportées à d'autres innovations ayant eu un impact systémique sur la société (p. ex. les semiconducteurs, l'intelligence artificielle, la technologie nucléaire et la nanotechnologie), tout en reconnaissant les propriétés uniques des technologies quantiques. Elle cherche à inclure les parties prenantes, la société civile et les partenaires internationaux dans le processus d'adoption et à aborder les aspects essentiels de cette adoption, tels que la perception et la confiance du public et les lacunes réglementaires. Les lignes directrices et les mesures de protection qui en résulteraient pourraient comprendre des évaluations de l'impact quantique (comparables aux évaluations de l'impact algorithmique), une réforme de la législation sur la protection des données et de la vie privée, faire l'équilibre entre un accès équitable et contrôlé à certaines technologies quantiques, des mécanismes de droit souple et une recherche et une innovation responsables (y inclus des campagnes de dialogue avec le public et d'éducation).

Que révèlent les données probantes et les connaissances actuelles en matière de pratiques prometteuses et exemplaires qui pourraient être suivies pour stimuler et accélérer l'adoption des technologies quantiques au Canada?

La politique d'innovation du Canada a toujours donné la priorité à l'offre, minimisant l'importance des stratégies axées sur la demande pour la diffusion et l'adoption technologiques par l'industrie. Lorsqu'il est question de technologies émergentes telles que les technologies quantiques, les politiques ont encore tendance à prioriser les instruments tournés vers l'offre, en raison du nombre relativement faible d'applications technologiques et d'utilisateurs finaux. Or l'adoption des technologies quantiques par le public et le privé peuvent nécessiter des politiques et des instruments qui encouragent la demande d'innovation (figure 1). Il peut s'agir de la coopération public-privé (p. ex. marchés publics et autres programmes spécialisés ou partenariats public-privé), de la réglementation, de la surveillance et de politiques favorables à la concurrence, d'initiatives menées par l'industrie et de la formation d'une main-d'œuvre prête pour le quantique diversifiée. Ces instruments permettent au gouvernement d'orienter la politique d'innovation et de l'utiliser pour régler les questions éthiques, socioéconomiques, juridiques et de gouvernance.

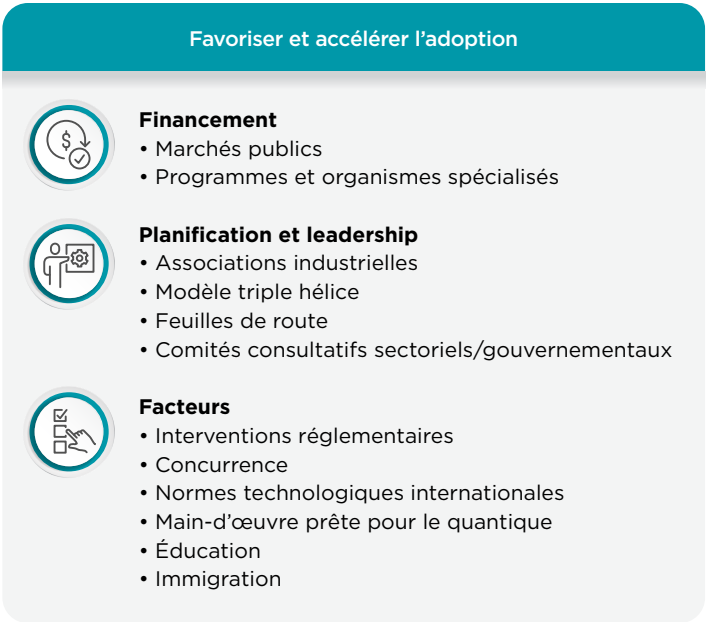


Figure 1 Leviers pour stimuler l'adoption des technologies quantiques

Les données probantes révèlent que les **marchés publics** constituent un important instrument politique pour encourager l'adoption de nouvelles technologies, mais les programmes existants destinés aux PME innovantes sont sous-utilisés et n'atteignent pas leurs objectifs de dépenses. Outre les marchés publics, des **programmes et organismes gouvernementaux spécialisés** pourraient faciliter l'adoption des technologies quantiques dans divers secteurs. L'expérience de pays étrangers tels que la Finlande et l'Allemagne montre que la diffusion des technologies est le fondement des programmes gouvernementaux fructueux. En outre, le potentiel des initiatives gouvernementales dépend de la création de consortiums interentreprises solides et de l'intégration des utilisateurs finaux avancés dans les réseaux de diffusion technologique. Les pays chefs de file de l'univers quantique (p. ex. l'Union européenne et les États-Unis) fondent des **associations ou des consortiums industriels** spécialisés. À l'échelon national, Quantum Industry Canada réunit à la fois des producteurs et des utilisateurs de technologies quantiques dans le but, entre autres, de faciliter la commercialisation et l'adoption de ces technologies par les entreprises canadiennes.

Les organisations intersectorielles hybrides réunissant les gouvernements, l'industrie et les universités (également connues sous le nom de **modèle triple hélice**) ont réussi à faciliter l'adoption technologique dans certains pays comme

l'Allemagne et les Pays-Bas. Ces collaborations intersectorielles peuvent contribuer à définir les utilisations des technologies quantiques et à en accélérer l'adoption dans certains secteurs, ainsi qu'à sensibiliser les multiples parties prenantes aux facteurs ELSPI de l'adoption. Au Canada, les efforts de collaboration entre les universités, l'industrie et le gouvernement dans le domaine de la biofabrication et des sciences de la vie pourraient servir de modèle à une approche nationale des partenariats intersectoriels dans le domaine des technologies quantiques.

Les **feuilles de route** nationales, sectorielles et technologiques peuvent aider les parties prenantes à détecter et à résoudre les différents obstacles qui entravent l'adoption et la commercialisation des technologies quantiques. De l'avis du comité d'experts, l'élaboration de ces feuilles de route est l'une des stratégies d'adoption technologique les plus prometteuses prévues dans la SQN. L'expérience étrangère (p. ex. en Australie, en Allemagne, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni et dans l'Union européenne) montre que la réalisation de feuilles de route nationales fait généralement appel à différents ordres de gouvernement et se concentre sur les possibilités de collaboration entre les parties prenantes du secteur privé et du monde universitaire.

Un autre instrument de collaboration public-privé visant à encourager l'adoption des technologies quantiques est le **comité consultatif sectoriel ou gouvernemental**, qui facilite les discussions entre les différentes parties prenantes — concepteurs, utilisateurs, gouvernements et universités. Alors que les comités consultatifs gouvernementaux (p. ex. le Conseil consultatif sur la quantique au Canada ou le National Quantum Initiative Advisory Committee aux États-Unis) ont tendance à se focaliser sur la conception des technologies quantiques, d'autres modèles pourraient prioriser l'adoption technologique en fournissant une aide financière à des projets coopératifs conçus par des comités sectoriels particuliers dans le but, entre autres, de mettre sur pied des capacités et une infrastructure technologiques favorisant cette adoption. Cela permettrait de cerner les forces et les faiblesses propres au secteur et d'entretenir les relations entre les parties prenantes au sein de ce même secteur.

Les entreprises de technologies quantiques peuvent suivre certaines démarches émanant de l'industrie pour faciliter l'adoption technologique. Il s'agit notamment de partenariats interentreprises entre les producteurs de technologies et les utilisateurs finaux et de la fourniture de services d'assistance professionnelle (p. ex. l'informatique quantique en nuage, l'éducation et la formation ou les applications personnalisées). L'un des principaux avantages de cette approche est qu'elle offre aux utilisateurs finaux nouveaux ou inexpérimentés un accès économique à des technologies et à des compétences spécialisées, ce qui favorise l'innovation ouverte.

De nombreux secteurs souvent cités comme des adopteurs potentiels des technologies quantiques (p. ex. la finance, les télécommunications, l'exploitation minière et la santé) sont soumis à la réglementation fédérale et provinciale ou territoriale. Diverses **interventions réglementaires**, notamment les normes de cybersécurité et les règles de protection de la confidentialité des données, peuvent encourager l'adoption de technologies quantiques garantissant la conformité réglementaire. Les politiques qui confèrent trop de pouvoir discrétionnaire à l'État administratif pourraient toutefois avoir un résultat dissuasif involontaire sur la vie privée et les droits de la personne. En outre, la réglementation ne peut se substituer au rôle important de la **concurrence** dans l'adoption des technologies quantiques. Dans les secteurs à forte intégration verticale, tels que les télécommunications, les réformes politiques favorisant la concurrence et la surveillance réglementaire pourraient avoir un effet d'entraînement contribuant à l'adoption des technologies quantiques.

Pour vendre des technologies à l'étranger et s'intégrer dans les chaînes d'approvisionnement mondiales, les entreprises nationales doivent se conformer aux **normes technologiques internationales**. De plus, l'absence de normalisation freine l'adoption de la QRC. Toutefois, dans certains cas, des pays et des entreprises privées peuvent influencer l'établissement de normes afin de favoriser l'adoption internationale de normes nationales ou spécifiques à l'entreprise. Une approche nationale coordonnée est donc essentielle pour garantir une participation notable du Canada aux forums internationaux de normalisation.

Même si divers programmes et instruments peuvent stimuler la diffusion et l'adoption des technologies quantiques, les données probantes révèlent une importante pénurie de **main-d'œuvre prête pour le quantique**, tant dans les secteurs qui mettent au point ces technologies que dans ceux qui les adoptent. Cette pénurie risque de s'aggraver avec la conception de nouvelles applications et de nouveaux cas d'utilisation, mais il n'existe pas de projections fiables des besoins en personnel. Pour préparer, attirer et retenir un personnel hautement qualifié, on peut recourir à deux stratégies complémentaires, soit la formation et l'éducation, et l'immigration.

En ce qui concerne **l'éducation**, la formation technologique quantique est essentiellement dispensée au cycle supérieur. Si certains postes de l'industrie quantique requièrent un doctorat, ce n'est pas le cas de nombreux autres (notamment ingénieur, développeur de logiciels et technicien). Diverses possibilités d'éducation et de formation autres (comme des programmes offerts au premier cycle et au collège, l'apprentissage intégré au travail, des programmes destinés aux cadres supérieurs dans les secteurs d'adoption ou la formation industrielle pratique) peuvent être envisagées lors de la conception des programmes d'enseignement. Connaître les compétences requises dans les

secteurs d'adoption pourrait servir de base aux programmes axés sur l'industrie. Les stratégies de développement de la main-d'œuvre quantique gagneraient aussi à accorder la priorité au recrutement au sein des groupes actuellement sous-représentés dans les disciplines quantiques (et plus largement en science, en technologie, en génie et en mathématiques).

Le Canada dépend également de l'**immigration** pour constituer sa main-d'œuvre prête pour le quantique. Les actuels programmes destinés aux travailleurs et aux étudiants étrangers (p. ex. Volet des talents mondiaux, catégorie de l'expérience canadienne ou Programme des candidats des provinces) peuvent contribuer à attirer et à retenir les talents. Les travailleurs formés à l'étranger et les étudiants étrangers se heurtent toutefois à un certain nombre d'obstacles en matière d'immigration, tels que l'absence dans la Classification nationale des professions de codes pour les professions quantiques, le montant des frais de scolarité, les retards dans le traitement des dossiers d'immigration et la hauteur des frais de permis d'études et de travail. Le système canadien d'entrée express ne tient pas compte de la variété d'expériences professionnelles acquises par les étudiants étrangers durant leurs études, ce qui crée des obstacles systémiques pour les diplômés étrangers cherchant à obtenir la résidence permanente. En revanche, des programmes d'immigration souples et adaptatifs, semblables à ceux qui ont stimulé le développement du secteur des télécommunications dans les années 1990, pourraient donner au Canada une longueur d'avance par rapport à la concurrence dans l'attraction des talents internationaux nécessaires pour stimuler l'adoption des technologies et façonner l'innovation quantique à l'échelle mondiale.

Abréviations

AUTM	(anciennement) Association of University Technology Managers
BDC	Banque de développement du Canada
DIRDE	dépenses intra-muros en recherche et développement des entreprises
CDL	Creative Destruction Lab
CERN	Organisation européenne pour la recherche nucléaire
AECG	Accord économique et commercial global entre le Canada et l'Union européenne
CRTC	Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes
SCRS	Service canadien du renseignement de sécurité
CCCST	Comité consultatif canadien pour la sécurité des télécommunications
CTI	Canadian Training Institute
ACEUM	Accord Canada-États-Unis-Mexique
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (États-Unis)
DIQKD	échange quantique de clés non tributaire
MDN	ministère de la Défense nationale (Canada)
OEB	Office européen des brevets
GNSS	système de positionnement par satellites
TUG	technologies à usage général
HPC	calcul intensif
PHQ	personnel hautement qualifié
IDEeS	Innovation pour la défense, l'excellence et la sécurité
PARI	Programme d'aide à la recherche industrielle
ISDE	Innovation, Science et Développement économique Canada
ISTAR	renseignement, surveillance, acquisition d'objectifs et reconnaissance
MIMO	entrées-sorties multiples
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord
NASA	National Aeronautics and Space Administration (États-Unis)

CNC	Consortium national pour la cybersécurité
NISQ	dispositif quantique bruyant à échelle intermédiaire
NIST	National Institute of Standards and Technology (États-Unis)
RMN	résonance magnétique nucléaire
CNP	Classification nationale des professions
SQN	Stratégie quantique nationale
CNRC	Conseil national de recherches Canada
NSA	National Security Agency (États-Unis)
CRSNG	Conseil national de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
NV	azote-lacune
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OPM	magnétomètre à pompage optique
BSIF	Bureau du surintendant des institutions financières
PNS	positionnement, navigation et synchronisation
PPP	partenariat public-privé
PQC	cryptographie postquantique
QCaaS	informatique quantique en tant que service
QED-C	Quantum Economic Development Consortium (États-Unis)
QEYSSat	satellite scientifique et de chiffrement quantique
QIC	Quantum Industry Canada
QKD	échange quantique de clés
AMQ	apprentissage machine quantique
QRC	cryptographie postquantique
QTEdu CSA	quantum technology education coordination and support action
ELSPI quantiques	conséquences éthiques, juridiques, sociales et politiques en matière de la quantique
QuaST	quantum-enabling services and tools for industrial applications
QuIC	European Quantum Industry Consortium
PME	petites et moyennes entreprises
SQUID	dispositif d'interférence quantique supraconducteur

SDC	Service des délégués commerciaux Canada
UKRI	UK Research and Innovation
USPTO	United States Patent and Trademark Office

L'examen des technologies quantiques requiert une certaine compréhension de la science quantique; par conséquent, la majorité des discussions sur ces technologies sont tenues par des experts du domaine, dans un langage qui peut être difficile à comprendre pour les non-experts. Une liste de termes clés a été dressée pour compléter les abréviations indiquées ci-haut. Trouvés à la fin du rapport (p. 198), les termes clés fournissent des descriptions non techniques et non rigoureuses de certains concepts propres au domaine quantique que l'on trouve dans le rapport. Pour un glossaire technique, nous vous invitons à consulter Ezratty (2021) et Hoofnagle et Garfinkel (2021).

Table des matières

1

Introduction

Les technologies quantiques recèlent un formidable potentiel d'innovation et de commercialisation dans les domaines de l'informatique, des communications et de la détection, ce qui peut avoir une incidence sur un large éventail de secteurs économiques. D'ailleurs, de nombreux pays investissent énormément dans leurs écosystèmes quantiques, renforçant ainsi leur leadership et leur compétitivité. Le Canada, chef de file en science quantique, se retrouve à la fois devant des possibilités et des défis en ce qui concerne la mise en œuvre, l'adoption et l'acceptation sociale des technologies quantiques.

1.1 Histoire des technologies quantiques

Au début du XXe siècle, les physiciens pensaient avoir une solide connaissance du fonctionnement du monde physique. S'appuyant sur les théories classiques héritées de grands noms comme Isaac Newton et James Clerk Maxwell, ils croyaient que presque toutes les lois du monde physique pouvaient être expliquées. On attribue souvent à lord Kelvin la phrase suivante : « Il n'y a plus rien de nouveau à découvrir en physique. Il ne reste plus qu'à effectuer des mesures de plus en plus précises ». Cependant, les théories classiques ne parviennent pas à expliquer certains phénomènes, comme la raison pour laquelle un morceau de métal chauffé rougeoie, pourquoi les atomes peuvent être stables ou pourquoi certains noyaux atomiques subissent une désintégration radioactive. Les théories classiques échouent de manière spectaculaire à expliquer ces phénomènes. Pour y parvenir, il a fallu créer une nouvelle théorie : la *mécanique quantique.*

1.1.1 La théorie de la mécanique quantique

Élaborée au milieu des années 1920, la théorie de la mécanique quantique fait appel à des concepts anathèmes pour la physique classique, tels que l'idée selon laquelle l'énergie se présente sous forme de paquets discrets et *quantifiés*, que la matière présente simultanément des comportements particulaires et ondulatoires et qu'il existe une certaine probabilité que la matière forme des *tunnels* (c.-à-d. qu'elle apparaisse à des endroits impossibles à expliquer avec la physique classique). La théorie quantique affirme qu'un hasard fondamental est au cœur de toutes les mesures — une idée qui défie encore l'intuition humaine et les modes de pensée classiques. La théorie de la mécanique quantique a conduit à la *première révolution quantique* et a finalement permis le développement de technologies qui ont eu un impact considérable sur la société, comme les horloges atomiques, les lasers, les transistors, les diodes électroluminescentes (DEL), les microscopes électroniques et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) (Dowling et Milburn, 2003; Jaeger, 2018). Ces technologies sont à la base de la quasi-totalité de

l'électronique et de l'informatique modernes et ont permis l'avènement de l'ère de l'information actuelle (Dowling et Milburn, 2003; Jaeger, 2018).

Cependant, il existe un autre effet quantique qui n'a pas encore été utilisé : la *superposition*. En physique classique, une particule peut se trouver à un endroit *ou* à un autre; mais selon le principe de superposition, une particule peut être à un endroit *et* à un autre. Cela a conduit Albert Einstein et ses collègues Boris Podolsky et Nathan Rosen à affirmer que la théorie était incomplète (Einstein *et al.*, 1935). De plus, pour remettre en question les conséquences déroutantes et contre-intuitives du principe de superposition, Erwin Schrödinger a avancé en 1935 que la superposition des états des atomes (c.-à-d. excités ou non excités) peut être amplifiée jusqu'à un état où un chat est simultanément mort et vivant (Schrödinger, 1935). Dans les années 1940 et 1950, on considérait que le débat sur les conséquences de la mécanique quantique était plus philosophique que concret. Puis, dans les années 1960, John Bell a étudié les propriétés de l'état de superposition de deux systèmes et a transformé ces idées surprenantes en une équation mathématique (connue aujourd'hui sous le nom d'« inégalités de Bell ») qui pouvait être vérifiée par des expériences. Sa démarche utilisait la corrélation — c'est-à-dire les dépendances statistiques entre les mesures de deux particules — pour prédire un résultat si l'expérience se comportait de manière classique et un autre si l'expérience se comportait à la manière de la mécanique quantique.

En octobre 2022, le prix Nobel de physique a été décerné à Alain Aspect, John Clauser et Anton Zeilinger pour une série d'expériences démontrant la violation des inégalités de Bell, et donc l'échec de la physique classique (Aspect *et al.*, 1982). La conséquence de ces expériences est que le monde microscopique n'obéit pas aux règles du monde classique. Les particules peuvent se trouver dans une superposition d'états appelée *intrication quantique*, qui ne peut pas être comprise d'un point de vue classique. Cela a une incidence sur la façon dont nous interprétons la réalité et sur le fonctionnement fondamental du monde. Mais ce bref examen de l'histoire de la mécanique quantique ne tient pas compte de nombreuses contributions importantes, notamment celles des personnes appartenant aux groupes sous-représentés, dont certaines sont décrites dans l'encadré 1.1.

Encadré 1.1 Contribution des femmes et des groupes sous-représentés à la science quantique

La contribution des femmes, des chercheurs racisés et des chercheurs en dehors de l'Europe et de l'Amérique du Nord est remarquablement absente des récits traditionnels sur les débuts de la mécanique quantique. Malgré les inégalités et les obstacles systémiques dans la recherche et l'éducation, ces scientifiques ont eu un apport important au développement du domaine. Par exemple, c'est la physicienne canadienne Laura Chalk qui a réalisé les premières expériences ayant confirmé la théorie de la mécanique ondulatoire de Schrödinger; Wu Chien-Shiung, bien connue pour ses expériences révolutionnaires de violation de la parité, a été la première à mesurer les preuves évidentes des corrélations entre des paires de photons intriqués. Pour sa part, Lucy Mensing a découvert que les nombres quantiques associés au moment angulaire orbital étaient des nombres entiers. En Inde, C.V. Raman a réalisé des expériences de diffusion de la lumière, qui ont fourni une première preuve convaincante de la théorie quantique et a reçu le prix Nobel de physique en 1930 pour l'effet qui porte son nom. Souligner ces contributions et de nombreuses autres apportées par des chercheurs de tous horizons permet non seulement de relater de manière plus complète l'histoire de la mécanique quantique, mais aussi de jeter les bases du développement d'une communauté scientifique et technologique quantique diversifiée et ouverte à tout le monde.

1.1.2 Science de l'information quantique

En parallèle à ces premières expériences d'intrication quantique, les physiciens et les mathématiciens réfléchissaient à l'impact de la mécanique quantique sur le traitement de l'information. En 1980, Paul Benioff a montré comment les systèmes de mécanique quantique pouvaient être utilisés pour le calcul réversible, mais il a sous-estimé la puissance de calcul supplémentaire que ces nouvelles règles permettaient (Benioff, 1980). Yuri Manin (1980) et Richard Feynman (1982) sont considérés comme les premiers à avoir compris que les ordinateurs quantiques seraient capables d'effectuer des calculs inaccessibles aux ordinateurs classiques, et ont avancé que les ordinateurs quantiques seraient parfaits pour simuler des systèmes quantiques. Depuis, de nombreuses autres utilisations des ordinateurs quantiques, au-delà de la physique et de la chimie, ont été déterminées, lesquelles

peuvent avoir une incidence sur des domaines tels que la conception de médicaments ou les prévisions économiques.

Jusqu'aux années 1990, les ordinateurs quantiques intéressaient surtout les universitaires qui étudiaient les limites fondamentales de l'informatique. Mais en 1994, Peter Shor a mis au point un algorithme quantique capable de factoriser des nombres produits de nombres premiers (Shor, 1994). Bien que ce problème semble plutôt ésotérique à première vue, ces algorithmes sont à la base du chiffrement actuel des connexions Internet, qui repose sur la difficulté de factoriser les nombres premiers. La communauté quantique a été surprise lorsque Shor a montré qu'un ordinateur quantique, s'il pouvait être mis au point, pourrait facilement casser presque tous les systèmes de chiffrement existants, ce qui aurait des conséquences autant sur la vie privée que sur la sécurité nationale.

On pensait à l'origine que les ordinateurs quantiques seraient si sensibles aux bruits ambiants qu'il serait impossible de les construire (Haroche et Raimond, 1996) ou d'avoir un contrôle suffisant sur eux pour effectuer des calculs utiles (Landauer *et al.*, 1995). Heureusement, la découverte de la *correction d'erreur quantique* (Shor, 1995; Steane, 1996) rend désormais possibles des ordinateurs quantiques fiables et efficaces malgré la présence de bruit dans l'environnement, c'est ce que l'on appelle la *tolérance aux pannes*. L'intégration de la correction d'erreur quantique dans les appareils est l'un des plus gros défis actuels et nécessitera des millions de qubits (l'équivalent quantique des bits de l'informatique classique). La réalisation d'un ordinateur quantique tolérant aux pannes dans les prochaines années est une priorité essentielle du domaine.

Les premières démonstrations expérimentales de prototypes d'ordinateurs quantiques ont eu lieu à la fin des années 1990 (Monroe *et al.*, 1995; Nakamura *et al.*, 1999). La course s'est alors engagée pour obtenir un contrôle suffisant du prototype afin de le mettre à l'échelle. Au milieu des années 2000, une entreprise en démarrage canadienne a mis au point du matériel informatique quantique à partir d'un paradigme différent, connu sous le nom de *recuit quantique*, qui utilise la dynamique quantique pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Les premiers ordinateurs quantiques à recuit ont été commercialisés en 2011 (Popkin, 2016). Au milieu des années 2010, de nombreuses grandes entreprises, dont Amazon, Google, IBM et Microsoft, ont commencé à mettre au point des prototypes d'ordinateurs quantiques.

Ces dernières années, plusieurs organisations dans le monde — dont Google aux États-Unis, l'Université des sciences et technologies de Chine et Xanadu au Canada — ont affirmé avoir atteint ce que l'on appelle un *avantage quantique*, c'est-à-dire l'utilisation d'un ordinateur quantique pour résoudre un problème insoluble pour un ordinateur classique (Arute *et al.*, 2019; Zhong *et al.*, 2020;

Madsen *et al.*, 2022)[1]. Bien que certaines de ces affirmations aient été contestées — en 2022, une équipe de chercheurs a démontré que le problème résolu par l'ordinateur quantique de Google pouvait en fait être résolu à l'aide de processeurs informatiques ordinaires et que les superordinateurs existants pouvaient résoudre le problème encore plus rapidement que l'ordinateur quantique (Pan *et al.*, 2022) — ces expériences ont tracé une voie vers l'évolutivité et sont considérées comme des jalons importants pour la science de l'information quantique, même si les problèmes résolus étaient plutôt artificiels et que l'utilité des expériences semble se limiter à la démonstration de l'avantage quantique. Il faudra passer à des dispositifs plus gros pour que les ordinateurs quantiques résistent au bruit et permettent une résolution de problèmes qui offrent des avantages sociétaux.

Alors que de nombreux chercheurs réfléchissaient aux ordinateurs quantiques, des physiciens analysaient la pertinence de la mécanique quantique pour les communications et la cryptographie. Vers 1970, Stephen Wiesner a démontré qu'il pourrait être possible, en utilisant les règles de la mécanique quantique, de fabriquer de l'argent impossible à contrefaire (Wiesner, 1983). C'était la première indication que la mécanique quantique pouvait avoir un impact sur la cryptographie. En 1984, Charles Bennett et Gilles Brassard ont proposé un schéma qui allait bientôt s'appeler *échange quantique de clés* (QKD), qui garantit qu'une clé de chiffrement ne peut pas être copiée et permet en outre de détecter les intrus (Bennett et Brassard, 2014).

Comme il est mentionné précédemment, le talon d'Achille des ordinateurs quantiques est leur extrême sensibilité au bruit. Cependant, les scientifiques ont intelligemment transformé ce problème en atout en concevant des dispositifs quantiques qui utilisent cette propriété pour la détection (Caves, 1981). Il a été démontré que la sensibilité de ces dispositifs peut même surpasser la meilleure sensibilité théorique des dispositifs de détection classiques. Les capteurs quantiques peuvent avoir un impact sur un grand nombre de domaines où une sensibilité accrue serait utile, tels que la métrologie, l'extraction des ressources naturelles et les soins de santé.

1.1.3 Deuxième révolution quantique

La *deuxième révolution quantique*, terme inventé par Jonathan Dowling et Gerard Milburn (Dowling et Milburn, 2003), fait référence à la mise au point de technologies qui se servent des règles de la mécanique quantique pour stocker, manipuler et transmettre de l'information. La technologie qui émergera de la

1 Certaines sources utilisent le terme *suprématie quantique*, tandis que d'autres lui préfèrent *avantage quantique*, pour décrire un ordinateur quantique plus performant qu'un ordinateur classique. Le présent rapport utilise ce dernier en raison des connotations péjoratives que renferme le terme *suprématie* (Palacios-Berraquero *et al.*, 2019).

deuxième révolution quantique est, de manière importante, différente de celle qui a été développée lors de la première :

> *[Les technologies quantiques de première génération] s'appuient essentiellement sur les propriétés des grands ensembles de particules quantiques et sur les possibilités de les contrôler [...] La deuxième génération de technologies quantiques qui émerge [...] repose sur quelque chose de complètement nouveau : la préparation dirigée, le contrôle, la manipulation, puis la sélection des états de particules quantiques individuelles et de leurs interactions* [accentuation dans l'original].
>
> Jaeger (2018)

La deuxième révolution quantique ne se limite pas à la conception d'ordinateurs quantiques; elle a ouvert la voie à de nombreuses autres applications des technologies quantiques. La détection et les communications quantiques peuvent tirer parti des propriétés quantiques pour réaliser des mesures incroyablement précises et des communications sécurisées, respectivement, tandis que la cryptographie quantique (et la cryptographie classique résistante aux méthodes quantiques) permettra d'améliorer considérablement la sécurité des données. Ces technologies auront probablement une multitude d'applications dans différents secteurs et pourraient figurer parmi les premières technologies quantiques commerciales largement adoptées (Green *et al.*, 2021).

Face à la valeur potentielle des technologies quantiques, un nombre croissant et varié d'industries ont commencé à étudier la manière dont elles pourraient être adoptées, tandis que les gouvernements ont commencé à élaborer des stratégies pour se préparer aux possibilités et aux défis qu'elles présentent. Comme l'a déclaré Paul Davies en 1997, « le XIXe siècle est connu comme l'ère de la machine et le XXe siècle entrera dans l'histoire comme l'ère de l'information. Je pense que le XXIe siècle sera l'ère quantique » (Davies, 1997, cité par Jaeger, 2018).

1.2 En quoi les technologies quantiques sont-elles différentes?

À première vue, les technologies quantiques peuvent sembler comparables à n'importe quelle autre technologie émergente, comme les nanotechnologies et l'intelligence artificielle (IA). Mais, selon le comité d'experts, elles sont fondamentalement différentes en raison de leur capacité perçue à opérationnaliser les principes de la mécanique quantique. Bien que cette dernière soit « sans doute la théorie physique la plus précise », elle est également « profondément contre-intuitive » (Barrett, 2019). Ses effets sont difficiles à expliquer aux non-spécialistes parce qu'ils ne sont entièrement décrits que par

des formalismes mathématiques, qui ne se prêtent pas à l'intuition humaine (Albert, 1992). Bien décrire la mécanique quantique exige d'abandonner ses hypothèses familières sur la nature et le comportement des objets matériels pour penser plutôt en termes d'arguments mathématiques (Barrett, 2019).

Pour comprendre la différence entre l'informatique classique et l'informatique quantique, il faut faire une brève incursion dans la *théorie de la complexité*, la partie de l'informatique qui évalue les ressources nécessaires à la résolution d'un problème par rapport à la *taille* de celui-ci. Par exemple, en multiplication, la taille d'un problème correspond à la longueur des nombres à multiplier. Un questionnement fondamental de la théorie de la complexité porte sur la quantité de ressources (p. ex. bits, opérations, unités d'énergie) nécessaires pour résoudre un problème lorsque sa taille augmente. Les informaticiens ont divisé les problèmes en deux catégories : les problèmes faciles et les problèmes difficiles. Les ressources nécessaires pour résoudre les problèmes faciles augmentent de façon polynomiale avec la taille du problème, alors que pour les problèmes difficiles, elles augmentent de façon exponentielle.

Pour comprendre l'impact des ordinateurs quantiques, un élément supplémentaire est nécessaire : la *forme forte de la thèse de Church-Turing*. Cette thèse affirme que des ordinateurs différents peuvent résoudre des problèmes de même catégorie de complexité seulement en recourant, au maximum, à une différence polynomiale de ressources. Autrement dit, si un problème est difficile, il l'est pour tous les ordinateurs. La forme forte de la thèse de Church-Turing est un principe fondamental de l'informatique classique. Cependant, il s'avère qu'elle provient d'une compréhension classique des lois de la physique. Grâce aux ordinateurs quantiques, certains problèmes classiquement difficiles deviennent faciles. Il s'agit d'une surprise fondamentale, qui a suscité l'enthousiasme dans la science de l'information quantique, car ce constat démontre que certains problèmes qui pourraient être difficiles à résoudre ou insolubles avec des ordinateurs classiques peuvent être résolus avec des ordinateurs quantiques.

La deuxième révolution quantique repose sur la science de l'information quantique, qui étudie comment utiliser les règles de la mécanique quantique pour manipuler l'information. À première vue, il semble que ces règles peuvent constituer un obstacle. En fait, à la fin des années 1970, Bennett aurait demandé à Feynman si la théorie de la mécanique quantique imposait une limite fondamentale au calcul; Feynman a conclu qu'une telle limite n'existait pas (Feynman, 1982). De plus, non seulement n'y a-t-il pas de limite de ce genre, mais les 40 dernières années ont montré que, au moins en théorie, l'utilisation des règles de la mécanique quantique conduit à un avantage surprenant pour le traitement de l'information. Les prochaines années montreront si cet avantage théorique de l'informatique quantique peut être transformé en avantage pratique

pour résoudre des problèmes d'importance sociétale — un avantage qui s'est déjà matérialisé avec les capteurs quantiques.

1.3 Mandat du comité d'experts

Reconnaissant la nécessité d'une meilleure compréhension des occasions et des défis découlant de l'adoption des technologies quantiques au Canada, Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDE), le Conseil national de recherches Canada (CNRC) et trois autres ministères fédéraux de soutien[2] (désignés collectivement comme « le commanditaire ») ont demandé au CAC de constituer un comité d'experts pour répondre aux questions suivantes :

À la lumière des tendances actuelles concernant l'évolution des technologies quantiques, quelles possibilités et quels défis ces technologies présentent-elles au Canada?

- Que révèlent les données probantes et les connaissances actuelles en matière de pratiques prometteuses et exemplaires qui pourraient être suivies pour stimuler et accélérer l'adoption des technologies quantiques au Canada?
- Quelles sont les conditions favorisant un large accès aux technologies quantiques et leur préparation en vue de la commercialisation au Canada?
- Quels sont les principaux obstacles socioéconomiques, réglementaires et éthiques à l'adoption des technologies quantiques au Canada?

1.4 Approche du comité d'experts

Le CAC a constitué un comité multidisciplinaire et multisectoriel d'experts (le comité d'experts sur l'adoption responsable des technologies quantiques, ci-après « le comité »). Les membres du comité ont été sélectionnés pour leur connaissance de la physique, du droit, de l'innovation, de l'éthique, de la finance et des affaires. Le comité s'est réuni six fois en personne et par vidéoconférence entre mai 2022 et juillet 2023 pour délibérer sur son mandat, recueillir et examiner les données

2 L'Agence spatiale canadienne, Recherche et développement pour la défense Canada et Transports Canada.

probantes, discuter des conséquences et affiner les versions du rapport. Le rapport final reflète le consensus du comité à la suite de son évaluation des données probantes.

Le présent rapport a également fait l'objet d'un examen approfondi par des pairs, dans le cadre duquel d'autres experts ont fourni des données probantes et des conseils supplémentaires. L'examen externe par les pairs a permis de recueillir des commentaires qui ont éclairé les délibérations du comité d'experts, les examinateurs restant anonymes jusqu'à la finalisation du rapport. Ce processus a été supervisé par un pair évaluateur indépendant, membre du comité consultatif scientifique du CAC.

Afin de garantir l'intégrité du processus d'évaluation, et dans un souci de transparence, les membres du comité d'experts sont tenus de dévoiler au CAC et à leurs collègues tout conflit d'intérêts — réel, prévisible ou perçu — lié aux questions examinées. Ils doivent également respecter un accord de confidentialité et un code de conduite conçus pour assurer un environnement favorisant les délibérations efficaces et respectueuses, propices au libre échange des connaissances et convenant à l'évaluation des données probantes.

Pour préserver l'indépendance du comité d'experts, le commanditaire ne nomme pas des membres à ce comité et n'échange pas avec lui durant l'évaluation, sauf dans les cas suivants : (i) lors de la première réunion du comité d'experts, au cours de laquelle le commanditaire est invité à présenter le mandat et (ii) lors de la réunion d'information finale sur les constatations, prévue *après* l'acceptation officielle du rapport par le comité et avant sa publication, au cours de laquelle le président du comité présente les principales constatations au commanditaire.

1.4.1 Sources des données probantes

L'évaluation s'est appuyée sur l'examen de diverses sources de données probantes, notamment des publications examinées par les pairs et de la littérature grise (c.-à-d. de documents politiques, de publications et de sites Web gouvernementaux, ainsi que de rapports d'organisations et de comités nationaux et internationaux). Le comité s'est également entretenu avec des parties prenantes du Service canadien du renseignement de sécurité (SCRS). En octobre 2022, le comité d'experts a visité deux entreprises, D-Wave et Photonic Inc., dans le cadre de la collecte de données probantes. En janvier 2023, il a organisé une session durant les Quantum Days 2023, une conférence canadienne réunissant les universitaires, les étudiants et les professionnels du domaine quantique, et a recueilli les idées des participants sur des sujets pertinents pour cette évaluation.

1.4.2 Portée

Ce rapport porte sur les questions touchant la commercialisation et l'adoption des technologies quantiques au Canada, comme l'attraction et la rétention des talents en matière quantique, les risques posés par les technologies quantiques et l'acceptabilité sociale. Les questions concernant les questions fondamentales de la recherche quantique, l'évaluation des technologies et l'évaluation complète des programmes et des politiques ont toutefois été exclues de la portée de l'évaluation.

1.5 Structure du rapport

Le **chapitre 2** présente trois catégories de technologies quantiques — informatique, communications et détection — et étudie leur potentiel de commercialisation. Il donne un aperçu des retombées économiques possibles des technologies quantiques pour certains secteurs canadiens parmi les plus susceptibles d'adopter des technologies quantiques et d'en profiter. Le **chapitre 3** décrit le contexte des technologies quantiques, en positionnant le Canada dans l'écosystème mondial sur le plan de l'activité de recherche, de l'activité commerciale, des politiques publiques et de la chaîne de valeur quantique internationale. Les **chapitres 4 et 5** présentent un examen approfondi des conséquences éthiques, juridiques, sociales et politiques, ainsi que des difficultés institutionnelles et réglementaires relatives à l'adoption des technologies quantiques. Le **chapitre 6** examine les conditions favorables et les leviers potentiels dont disposent le secteur public et le secteur privé pour faire progresser l'adoption des technologies quantiques. Le **chapitre 7** présente une approche responsable de l'adoption des technologies quantiques et livre les réflexions finales du comité d'experts.

2

Commercialisation et adoption des technologies quantiques

Constatations du chapitre

- D'importantes barrières scientifiques et techniques freinent actuellement la commercialisation et l'adoption de l'informatique, des communications et de la détection quantiques.
- Parmi les technologies quantiques, c'est l'informatique qui bénéficie du plus d'attention et d'investissements et qui pourrait procurer les retombées et la rentabilité financière à long terme les plus importants. Cependant, ses perspectives de commercialisation à court terme sont très incertaines, car elle est encore loin de la maturité technologique et il manque d'applications réelles. Le principal modèle d'affaires de l'informatique quantique dans un avenir prévisible sera probablement l'informatique quantique en tant que service.
- Les capteurs quantiques sont peut-être plus près de la commercialisation que les ordinateurs et les communications quantiques, mais leur taille, leur poids et leur coût devront être réduits avant qu'ils puissent concurrencer les capteurs classiques.
- En ce qui concerne les communications quantiques, un élément déterminant à court terme sera la mise en place d'une cryptographie résistante aux méthodes quantiques, en mettant un accent croissant sur l'échange quantique de clés à mesure que la technologie mûrit et surmonte les limites actuelles de distance, de vitesse et de coût.
- Les technologies quantiques pourraient représenter jusqu'à 3 % du PIB du Canada d'ici à 2045, l'informatique quantique apportant la contribution la plus importante. Ces retombées devraient se concentrer sur des secteurs déterminés : la recherche scientifique, la défense, l'espace, la chimie et la science des matériaux, la finance et les télécommunications figurent parmi les secteurs les plus susceptibles d'adopter rapidement les technologies quantiques.

Bien que des premiers exemples de technologies quantiques soient proposés sur le marché et que des applications commencent à apparaître dans divers secteurs, il n'y aura probablement pas de commercialisation et d'adoption à grande échelle avant des années. Le potentiel de commercialisation et d'adoption des technologies quantiques au Canada dépend de leur maturité technologique, de leurs avantages économiques pour les développeurs et les adoptants, de l'existence d'applications réelles, de l'amélioration apportée par rapport aux technologies non quantiques existantes et de la capacité des organisations à investir du temps,

de l'argent et des ressources dans leur adoption. En fin de compte, les technologies quantiques ne seront commercialement viables à grande échelle et ne seront adoptées par les organisations de divers secteurs qu'une fois que les obstacles scientifiques et techniques actuels auront été surmontés et qu'elles pourront dépasser en performances leurs homologues classiques d'un degré suffisant pour compenser les coûts engendrés par la transition technologique. Il s'agit non seulement des coûts d'investissement pour l'acquisition de matériel ou de services quantiques, mais aussi des coûts dus aux changements potentiels dans l'exploitation, les flux de travail et la main-d'œuvre d'une organisation.

Ce chapitre examine trois grandes catégories de technologies quantiques — informatique, détection et communications — et étudie leurs perspectives de commercialisation et d'adoption dans différents secteurs économiques au Canada, ainsi que leur impact économique potentiel à court, moyen et long terme.

2.1 Potentiel de commercialisation

Au Canada, tant les résultats de la recherche quantique que l'industrie se focalisent fortement sur l'informatique, puis sur les communications et la détection (sections 3.1 et 3.2). Ce constat est cohérent avec les résultats d'un sondage mené en 2020 auprès des parties prenantes du secteur quantique canadien, provenant du milieu universitaire, de l'industrie et du gouvernement, qui ont classé l'informatique quantique comme la technologie la plus importante pour le Canada, suivie de près par les communications quantiques, la détection quantique arrivant en troisième position, mais loin derrière (Doyletech Corporation, 2020).

2.1.1 Informatique

Il y a consensus que c'est l'informatique qui attire le plus l'attention et les investissements parmi les technologies quantiques (SSAC, 2022), et qui présente les possibilités, les retombées et le potentiel commercial les plus importants (QDNL, 2020). Cependant, elle s'accompagne également d'une forte incertitude et il est peu probable qu'elle atteigne la maturité technologique à court terme (Crane *et al.*, 2017; Gartner, 2019; SSAC, 2022).

Un des facteurs qui contribuent à l'incertitude entourant les délais de commercialisation des ordinateurs quantiques est la diversité des méthodes techniques. Alors que tous les ordinateurs classiques reposent sur les mêmes principes physiques pour le calcul, les ordinateurs quantiques font appel à un large éventail d'approches différentes pour créer et manipuler les informations quantiques (Nurminen *et al.*, 2022; QED-C, 2022b). Les recuiseurs quantiques et les ordinateurs quantiques à portes utilisant des qubits supraconducteurs ou des ions

piégés sont les dispositifs les plus avancés sur le plan de la maturité technologique et pourraient être plus largement accessibles à court terme (NASEM, 2019). D'autres types d'ordinateurs quantiques — notamment ceux fondés sur la photonique, les qubits de spin, les atomes neutres et les ordinateurs quantiques topologiques — pourraient gagner en importance à moyen ou long terme (NASEM, 2019; Biondi *et al.*, 2021; Bobier *et al.*, 2021).

À court terme, la plupart des applications commerciales de l'informatique quantique s'appuieront probablement sur un modèle hybride classique-quantique (Biondi *et al.*, 2021; IBM, 2022a), dans lequel la majeure partie du travail de calcul pour résoudre un problème sera effectuée sur des ordinateurs classiques, l'ordinateur quantique ne jouant qu'un rôle limité en résolvant un aspect du problème (Crane *et al.*, 2017; Krelina, 2021). En effet, comme l'informatique quantique n'est utile que pour une gamme étroite de problèmes de calcul qui ne peuvent pas être résolus par des ordinateurs classiques (Dekate *et al.*, 2021), elle ne remplacera pas l'informatique classique dans de nombreuses situations (IBM, 2022a). En outre, même pour les problèmes pour lesquels l'informatique quantique est plus performante que l'informatique classique, elle nécessitera probablement une certaine forme de traitement hybride (IBM, 2022a)[3].

L'informatique quantique pourrait ne pas trouver d'applications réelles avant l'émergence de la correction d'erreur

L'informatique quantique se trouve actuellement dans ce que l'on appelle l'ère NISQ (dispositif quantique bruyant à échelle intermédiaire) (Preskill, 2018). Les ordinateurs NISQ sont vulnérables au bruit ambiant, qui interfère avec leurs processus de calcul et entraînent des erreurs. Dans les ordinateurs quantiques, le contrôle du bruit — ce qu'on appelle la *correction d'erreur* — est essentiel pour faire progresser le domaine et atteindre l'évolutivité. Parvenir à réaliser des ordinateurs quantiques *tolérants aux pannes* constituera un jalon notable (NASEM, 2019; Bobier *et al.*, 2021). Il existe un consensus sur le fait que la démonstration de l'avantage quantique pour des applications réelles nécessitera des ordinateurs quantiques tolérants aux pannes et capables de corriger les erreurs (Temme *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2023; Mandelbaum, 2023). En effet, alors que les ordinateurs quantiques tolérants aux pannes et à correction d'erreur possèdent de nombreuses utilisations pratiques, « il n'y a actuellement pas d'applications réelles pour les ordinateurs NISQ » (NASEM, 2019).

3 Dans un sens, toute l'informatique quantique peut être considérée comme « hybride », dans la mesure où les ordinateurs classiques seront toujours nécessaires pour commander les ordinateurs quantiques. Il convient toutefois de distinguer cette notion de celle d'« hybride » décrite ci-dessus, dans laquelle une partie importante d'un problème de calcul est résolue à l'aide d'ordinateurs classiques, les ordinateurs quantiques étant utilisés pour traiter une partie précise du problème.

Une approche prometteuse à court terme consiste à se concentrer sur l'*atténuation* d'erreur plutôt que sur la correction d'erreur — qui fait appel à un ensemble d'outils et de méthodes susceptibles de produire des solutions relativement précises et exemptes de bruit pour certains types de problèmes de calcul, avec une précision variable, même pour les ordinateurs NISQ (Steffan, 2022; Temme *et al.*, 2022). Par exemple, des chercheurs ont démontré qu'un ordinateur quantique à atténuation d'erreur peut, de manière vérifiable, résoudre un problème de simulation complexe plus précisément que les méthodes classiques d'approximation de pointe employées sur les superordinateurs, et *pourrait* être en mesure de surpasser d'autres méthodes de calcul classique exactes qui reposent sur le calcul par force brute (bien que cela n'ait pu être vérifié) (Kim *et al.*, 2023; Mandelbaum, 2023). Il est toutefois important de noter que ces recherches ne démontrent pas l'avantage quantique, car elles ne révèlent pas qu'un ordinateur quantique peut résoudre un problème insoluble (ou impossible) pour un ordinateur classique, ni que les capacités d'un ordinateur quantique peuvent surpasser celles des ordinateurs classiques (Kim *et al.*, 2023; Mandelbaum, 2023). Cependant, elles pourraient indiquer que les ordinateurs quantiques « peuvent offrir un avantage de calcul pour des problèmes utiles avant la réalisation complète de la correction d'erreur » (Mandelbaum, 2023).

L'adoption de l'informatique quantique est limitée par l'incertitude technologique et par l'absence d'avantages démontrés par rapport aux méthodes classiques

L'informatique quantique fonctionne selon des principes fondamentalement différents de ceux de l'informatique classique, ce qui nécessite l'élaboration d'un nouveau paradigme avant de pouvoir bénéficier d'un avantage quantique (Meige *et al.*, 2022). Les utilisateurs potentiels, par exemple, doivent savoir (i) si l'informatique quantique peut servir à résoudre les problèmes de leur organisation, (ii) comment formuler une question à laquelle un ordinateur quantique peut répondre, puis interpréter la réponse et (iii) comment tester, intégrer, contrôler et entretenir le matériel et les logiciels d'informatique quantique. Cette incertitude quant à l'utilisation pratique de l'informatique quantique est aggravée par l'absence d'avantages économiques démontrés par rapport à l'informatique classique. Le Quantum Economic Development Consortium (QED-C), un consortium industriel regroupant des entreprises de technologie quantique aux États-Unis, souligne que :

> *[l]'informatique quantique ne sera utile que lorsqu'elle pourra dépasser en performances les meilleures méthodes classiques pour un problème de calcul donné. Et elle ne peut pas se contenter d'être marginalement meilleure. Elle doit être nettement meilleure pour que les organisations puissent supporter les coûts importants de la transformation et les modifications possiblement radicales des flux de travail commerciaux, industriels et gouvernementaux nécessaires à la migration des processus informatiques classiques aux processus informatiques quantiques.*
>
> QED-C (2022b)

En outre, l'incertitude concernant les architectures de qubits qui s'imposeront peut encourager une approche attentiste, en particulier pour les petites et moyennes entreprises (PME), au moins jusqu'à ce qu'une analyse de rentabilité convaincante ait été réalisée pour l'adoption de la technologie quantique. Les tests d'application, qui mesurent les performances des différentes technologies d'informatique quantique pour des tâches particulières dans des cas d'utilisation réels — et qui permettent des comparaisons entre les ordinateurs quantiques et les ordinateurs classiques — seront donc particulièrement importants pour faciliter l'adoption par les utilisateurs finaux (Langione *et al.*, 2022).

La conception d'évaluations des performances des ordinateurs quantiques est en cours et fait appel à des entreprises privées, des organismes publics, des groupes industriels et des chercheurs universitaires, qui travaillent souvent en collaboration. Par exemple, le programme Quantum Benchmarking, géré par la Defense Advanced Research Projects Agency aux États-Unis, met actuellement au point des tests qui mesurent les progrès accomplis dans des défis de calcul particuliers, les exigences matérielles pour réaliser des fonctions données et d'autres éléments pratiques; cette initiative réunit à la fois des entreprises privées et des universités (QCR, 2022c; Altepeter, s.d.). En outre, QED-C a publié un ensemble d'évaluations des performances en source ouverte pour les ordinateurs quantiques (SRII, 2021; QED-C, 2023a).

À court terme, le marché principal sera probablement celui de l'informatique quantique en tant que service

Le marché des ordinateurs quantiques eux-mêmes (c.-à-d. le matériel) devrait être relativement restreint, de sorte que seuls les gouvernements et les grandes entreprises seront susceptibles d'acheter du matériel d'informatique quantique, spécialisé dans des applications particulières (Crane *et al.*, 2017), du moins à court terme. Cela est dû en partie à l'utilité actuellement limitée des ordinateurs quantiques, aux difficultés techniques de leur fonctionnement et de leur entretient et à la probabilité d'une obsolescence rapide des premiers modèles

(Gartner, 2022). Les facteurs économiques sont également déterminants; en 2020, le coût d'un bit classique était de l'ordre d'un millionième de cent, tandis que le coût d'un qubit physique était d'environ 10 000 dollars américians, le coût d'un qubit logique étant estimé à plus d'un million de dollars américains, probablement entre 10 et 100 millions (Swallow et Joneckis, 2021).

Par conséquent, dans un avenir prévisible, le marché principal des ordinateurs quantiques sera probablement celui de l'*informatique en tant que service* (« quantum computing as a service » ou QCaaS). Les fournisseurs de QCaaS permettent aux organisations d'accéder au matériel et aux algorithmes de l'informatique quantique pour résoudre des problèmes spécialisés (Gartner, 2022; FEM, 2022a). Toutefois, il est peu probable que même la QCaaS fasse l'objet d'une large adoption commerciale à court terme. Néanmoins, cette technologie permet aux entreprises qui l'adoptent de se décharger du coût initial d'un ordinateur quantique dédié et d'éviter d'avoir à aménager de l'espace pour des appareils qui sont actuellement très gros, compliqués et délicats, ainsi qu'à en assurer l'entretien et la maintenance. Notamment, certaines plateformes infonuagiques qui offrent actuellement la QCaaS donnent accès à plusieurs solutions matérielles et logicielles d'informatique quantique provenant d'une variété de fournisseurs, même si elles proposent également leur propre matériel (QCR, 2022a).

Les stratégies de commercialisation de l'informatique quantique basée sur l'informatique infonuagique s'accompagnent de leurs propres éléments à considérer. Ceux-ci sont un peu similaires à ceux touchant le calcul intensif, notamment la propriété et la maintenance des ordinateurs et de l'infrastructure de soutien, l'allocation d'un temps de calcul potentiellement limité et la disponibilité et le temps de fonctionnement de l'infrastructure informatique. De plus, on s'inquiète des usages secondaires possibles des données des utilisateurs (Inglesant *et al.*, 2016). De l'avis du comité, il faudra également veiller à ce que l'accès infonuagique à l'informatique quantique puisse en fin de compte se faire sans surveillance, à la fois pour améliorer l'accès des tiers et pour éviter d'exacerber la fracture numérique dans l'informatique quantique (section 4.3.2). En outre, les utilisateurs devront être conscients des problèmes potentiels communs aux plateformes infonuagiques, tels que la latence de la communication entre leur extrémité et le nuage, les protocoles de sécurité et de confidentialité des données utilisés par leurs fournisseurs de services et le temps d'attente découlant de la multiplicité des utilisateurs (Gartner, 2022). Toutefois, les aspects matériels et logiciels de l'informatique quantique infonuagique devront progresser considérablement avant que bon nombre de ces questions deviennent pertinentes pour les utilisateurs. Parmi les autres écueils, citons la résidence et la souveraineté des données, qui concernent les pays dans lesquels sont physiquement stockées les données infonuagiques, et le droit applicable (GC, 2018).

Dans certains pays, les fournisseurs d'informatique quantique infonuagique tentent d'ailleurs déjà parfois de résoudre ces problèmes en implantant leur infrastructure dans le même pays que les utilisateurs (NQCC, 2022).

L'apprentissage machine quantique suscite l'intérêt, mais il n'en est qu'à ses débuts et il n'existe actuellement aucune preuve d'un avantage quantique

L'*apprentissage machine quantique* (AMQ) désigne l'intégration de l'informatique quantique et de l'apprentissage machine. L'AMQ peut offrir la possibilité d'une analyse plus rapide des données, d'un traitement plus facile d'ensembles de données plus vastes et de plus grande dimension, de généralisations utiles à partir d'une quantité relativement faible de données d'apprentissage et d'une plus faible consommation énergétique par rapport à l'apprentissage machine classique (Hoofnagle et Garfinkel, 2021; Cerezo *et al.*, 2022). Certaines sources ont avancé que l'AMQ pourrait avoir les impacts à long terme parmi les plus grands au sein des technologies quantiques (Hoofnagle et Garfinkel, 2021).

Cependant, l'AMQ en est à un stade de développement relativement précoce (Gartner, 2021b; Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Bien qu'il existe quelques exemples d'algorithmes d'AMQ pouvant réduire le nombre d'étapes nécessaires pour résoudre certains problèmes — démontrant ainsi une forme d'« accélération » quantique (Biamonte *et al.*, 2017) — il n'y a actuellement aucune preuve d'avantage quantique pour cet apprentissage (c.-à-d. de surpassement de l'apprentissage machine classique ou de résolution de problèmes dont l'apprentissage machine classique est incapable) (Gartner, 2021b; Cerezo *et al.*, 2022), et il n'y a pas non plus de consensus sur la question de savoir s'il finira par surpasser l'apprentissage machine classique (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). L'AMQ se heurte également à un certain nombre de défis techniques, tels que les problèmes d'entrée des données (p. ex. l'encodage des données classiques en états quantiques qui se prêtent au traitement par l'AMQ) et de sortie des données, l'effet du bruit susceptible de perturber ou de fausser le traitement par l'AMQ et le manque d'ensembles de données quantiques de haute qualité pour l'entraînement des modèles d'AMQ (Biamonte *et al.*, 2017; Cerezo *et al.*, 2022).

Les utilisations à court terme les plus claires de l'AMQ — et les meilleurs candidats pour démontrer l'avantage quantique — sont la simulation de systèmes quantiques en chimie et en science des matériaux, en pharmacie et en physique des hautes énergies (Biamonte *et al.*, 2017; Hoofnagle et Garfinkel, 2021; Cerezo *et al.*, 2022). En outre, l'AMQ pourrait avoir des applications en défense, en finance et en soins de santé, entre autres (annexe B). Il peut également avoir des répercussions liées aux capteurs quantiques, pour lesquels les modèles d'AMQ peuvent aider à filtrer le signal du bruit (Cerezo *et al.*, 2022).

2.1.2 Détection

Les capteurs quantiques agissent en préparant des états particuliers de l'architecture quantique d'un dispositif, en permettant la modification de cet état par l'environnement du dispositif, puis en utilisant le changement d'état quantique pour en déduire quelque chose sur ce qui est mesuré. Nombre de ces dispositifs ont fait l'objet de démonstrations en laboratoire et sur le terrain, mais, dans certains cas, ils sont encore limités par la stabilité et la reproductibilité des composants, ainsi que par les lacunes de la science fondamentale (QED-C, 2022a; CCSN, 2023; Kantsepolsky *et al.*, 2023). Les technologies de détection quantique de première génération, telles que les horloges atomiques, l'IRM, la résonance magnétique nucléaire (RMN) et la tomographie par émission de positrons, ont eu un effet révolutionnaire et ont été largement adoptées. Des capteurs quantiques de deuxième génération sont en cours de mise au point et de commercialisation. Fait notable, ce sont en quelque sorte des technologies précurseures de l'informatique et des communications quantiques (Hoofnagle et Garfinkel, 2021).

Le gouvernement fédéral a déjà mis sur pied plusieurs programmes pour soutenir le développement et l'adoption des capteurs quantiques au Canada (ISDE, 2023d). Il s'agit notamment de l'appel à projets de détection quantique lancé par le ministère de la Défense nationale (MDN) dans le cadre du programme Innovation pour la défense, l'excellence et la sécurité (IDEeS) (MDN, 2023), du programme Défi « Internet des objets : capteurs quantiques » (CNRC, 2022b) et du programme Photonique quantique appliquée à la détection et à la sécurité (CNRC, 2022a) et de l'appel de Solutions innovatrices Canada pour des prototypes de capteurs quantiques précommerciaux « qui peuvent être testés dans un environnement réel et répondre à une variété de priorités au sein du Gouvernement du Canada » (SIC, 2022).

De nombreux types de capteurs quantiques peuvent avoir des applications à court terme, mais leur taille, leur poids et leur coût devront être réduits avant qu'ils puissent concurrencer les capteurs classiques

La détection quantique a été décrite comme « un but facile à atteindre » parmi les technologies quantiques, comparé à l'informatique et aux communications (QDNL, 2020); elle peut « représenter certaines des possibilités à court terme les plus prometteuses pour faire passer les technologies quantiques de la démonstration en laboratoire à l'application réelle » (QED-C, 2022a). Toutefois, contrairement à d'autres technologies quantiques, « dans de nombreux cas, les capteurs quantiques ne permettent pas explicitement de disposer de capacités autrement difficiles ou impossibles à atteindre au moyen des méthodes classiques actuelles » (QED-C, 2022a). Ils sont cependant généralement plus performants que

leurs homologues classiques dans trois domaines : ils sont moins sujets à la dérive (c.-à-d. aux erreurs cumulatives causées par les défauts et le bruit), leur sensibilité aux variations de leur environnement est beaucoup plus grande et leurs mesures sont nettement plus précises (Kantsepolsky *et al.*, 2023).

Bien que les capteurs quantiques puissent offrir une précision plus élevée, les technologies de détection actuelles peuvent suffire à de nombreuses applications commerciales, voire à la plupart d'entre elles. Ainsi, bien que certains types de capteurs quantiques soient déjà offerts dans le commerce, il y a un consensus sur le fait qu'une adoption généralisée nécessitera des réductions de taille, de poids et de coût avant que ces capteurs puissent concurrencer les capteurs classiques (Crane *et al.*, 2017; QDNL, 2020; Capgemini, 2022; McKinsey, 2022; QED-C, 2022a). Néanmoins, leur adoption devrait probablement augmenter considérablement à court terme, parallèlement à la réduction de la taille et du prix, à l'amélioration des fonctionnalités et à la détermination d'un plus grand nombre de cas d'utilisation dans divers secteurs (QDNL, 2020; Capgemini, 2022).

Il est important de noter que pour passer des prototypes de laboratoire aux applications commerciales, les concepteurs de capteurs quantiques devront nouer des relations plus étroites avec les utilisateurs potentiels afin de « comprendre l'espace de solution existant et les obstacles à la commercialisation, ainsi que les lacunes de l'offre actuelle de capteurs, les difficultés et les pierres d'achoppement potentielles en matière de taille, de poids, de puissance ou de coût pour les utilisateurs finaux » (QED-C, 2022a). Cela peut contribuer à « faire en sorte que les capteurs respectent ou dépassent les exigences des utilisateurs et résistent aux conditions environnementales réalistes dans les domaines où les avantages sont les plus importants », en particulier compte tenu de la concurrence des capteurs classiques. Toutefois, passer du travail en laboratoire en atmosphère contrôlée à des designs plus pratiques et résilients prêts à être testés (et éventuellement mis en service) dans des conditions de fonctionnement réalistes en environnement réel peut être long et coûteux (QED-C, 2022a).

En outre, les capteurs quantiques sont confrontés à des défis de commercialisation découlant de leurs technologies habilitantes, telles que les « lasers, les composants sous vide, les puces photoniques intégrées et l'électronique à faible bruit » (QED-C, 2022a). Comme les capteurs eux-mêmes, de nombreux types de technologies habilitantes devront voir leur coût, leur taille, leur poids et leur consommation d'énergie réduits avant d'être commercialement viables (Kantsepolsky *et al.*, 2023). Cependant, le développement de technologies habilitantes pour les capteurs profitera à d'autres domaines des technologies quantiques, comme l'informatique et les communications (QED-C, 2022a).

L'extraction de données à partir de capteurs quantiques est également un champ actuel de recherche. Les données brutes produites par un tel capteur doivent être extraites et transformées en information utile, ce qui implique généralement une certaine forme d'analyse des mégadonnées, et nécessite la création de vastes ensembles de données « d'entraînement », un défi constant (Bongs *et al.*, 2023).

Les capteurs quantiques font appel à un large éventail de technologies et le marché des divers types de capteurs se concentrera dans différents secteurs

Les capteurs quantiques englobent tout un ensemble de technologies avec une maturité, un potentiel de commercialisation et des possibilités d'application variés. En effet, la voie vers la commercialisation et l'adoption sera différente selon le type de capteur quantique. Étant donné l'hétérogénéité de ces technologies, la présente section ne tente pas de passer en revue toutes les sortes de capteurs quantiques, mais plutôt à mettre en évidence ceux qui sont le plus souvent cités comme principaux candidats à la commercialisation et à l'adoption à court terme.

Les **interféromètres atomiques** peuvent être utilisés pour détecter et mesurer l'accélération et la rotation, ainsi que la gravité (Crane *et al.*, 2017; QED-C, 2022a). Leur marché devrait être relativement réduit et concentré dans le secteur de l'extraction des ressources naturelles et de la recherche scientifique fondamentale. Cela s'explique en grande partie par le fait que la technologie de détection actuelle est généralement suffisante pour répondre à la plupart des besoins des clients potentiels en dehors de ce marché (Crane *et al.*, 2017; QED-C, 2022a). Les gravimètres à interférométrie atomique peuvent également servir à détecter des conditions et des objets souterrains en génie civil et en défense (QED-C, 2022a; Kantsepolsky *et al.*, 2023).

Les **diamants à centre azote-lacune (NV)** contiennent des impuretés d'azote qui créent dans le diamant même un système quantique pouvant être excité par les conditions ambiantes; cette excitation peut ensuite être mesurée optiquement (QED-C, 2022a). Ils sont utilisés pour détecter les mouvements inertiels ainsi que les champs magnétiques et électriques en informatique quantique et dans diverses sortes de microscopie (QED-C, 2022a). Les centres NV peuvent également être utilisés en spectroscopie RMN, où ils pourraient porter la résolution spatiale actuelle de la RMN de l'échelle millimétrique à l'échelle micrométrique et nanométrique, dans le domaine de la chimie, de la science des matériaux, des soins de santé, des produits pharmaceutiques et de la fabrication (Allert *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022; Aslam *et al.*, 2023). Le marché de l'imagerie de spin nucléaire à assistance quantique et reposant sur les centres NV devrait se situer principalement

en santé et en recherche pharmaceutique; toutefois, il devrait être relativement limité à court terme, car la technologie n'est pas mature (Crane *et al.*, 2017).

Les **capteurs de mouvement inertiel quantiques** sont utilisés pour mesurer l'accélération linéaire et angulaire et peuvent s'appuyer sur l'interférométrie atomique, les gyroscopes RMN ou les gyroscopes à centre NV (Crane *et al.*, 2017; QED-C, 2022a). Les capteurs inertiels peuvent servir de composants pour les systèmes de positionnement, navigation et synchronisation (PNS), qui pourraient être employés dans les domaines de la défense, de l'aérospatiale et des véhicules autonomes, en particulier lorsque les systèmes de navigation et de positionnement actuels, comme les GPS, sont indisponibles ou inutilisables (QED-C, 2022a; Kantsepolsky *et al.*, 2023). Crane (2017) estime que le marché des capteurs de mouvements inertiels quantiques dans les systèmes de PNS sera principalement celui des engins militaires, tels que les sous-marins, les navires et les avions. La demande de systèmes de PNS quantiques pourrait être relativement faible en dehors du secteur militaire, étant donné que les besoins actuels de tels systèmes dans le domaine commercial — par exemple pour le transport aérien et le camionnage — sont largement satisfaits par les GPS existants. En outre, il faudrait considérablement réduire leur taille et leur prix (Crane *et al.*, 2017) et les perspectives de miniaturisation sont actuellement floues (Kantsepolsky *et al.*, 2023). L'arrivée des véhicules autonomes pourrait stimuler la demande commerciale, mais la combinaison de systèmes de PNS classiques et de capteurs classiques, comme les radars, les lidars (systèmes d'identification, détection et télémétrie par laser) et les caméras, pourrait suffire (Crane *et al.*, 2017). Néanmoins, les capteurs à imagerie quantique tels que les diodes à avalanche à photon unique (SPAD) pourraient permettre aux véhicules autonomes d'éviter les collisions grâce à l'imagerie sans visibilité directe grâce à laquelle ils pourront « voir » derrière les virages ou les murs (Kantsepolsky *et al.*, 2023).

Les **magnétomètres quantiques** sont un autre type de capteur quantique pouvant servir à détecter et à mesurer les champs magnétiques. L'un d'entre eux, le dispositif d'interférence quantique supraconducteur (SQUID), est un outil technologique mature qui est proposé dans le commerce depuis des décennies et couramment utilisé dans la détection médicale (p. ex. en magnétoencéphalographie (MEG)) et dans l'exploration des ressources naturelles. Cependant, les SQUID requièrent des températures cryogéniques, ce qui limite leur portabilité et les cas d'utilisation potentiels (QED-C, 2022a). C'est pourquoi les nouveaux capteurs quantiques, connus sous le nom de magnétomètres à pompage optique (OPM), qui ne nécessitent pas une température cryogénique, sont beaucoup plus portables que les SQUID et peuvent réduire les coûts de la MEG, suscitent un grand intérêt (CEI, 2021; Aslam *et al.*, 2023).

D'autres types de magnétomètres quantiques reposent sur la vapeur atomique, dont les atomes sont excités par un laser afin qu'ils réagissent aux champs magnétiques d'une façon pouvant être mesurée avec précision. Des versions commerciales de ces capteurs sont utilisées pour détecter les navires, les sous-marins et les anomalies magnétiques (QED-C, 2022a). La réduction de leur taille, de leur poids et de leur coût, pour qu'ils puissent être contenus sur une puce, fait actuellement l'objet de recherches; les magnétomètres atomiques de la taille d'une puce peuvent être employés dans plusieurs secteurs, notamment celui du matériel médical. Parmi les autres applications, citons les levés géophysiques, la sécurité et la fabrication, mais la demande de magnétomètres quantiques est actuellement moins importante dans ces secteurs; le prix de ces dispositifs devra diminuer avant que leurs coûts d'adoption soient compensés par leurs avantages par rapport aux dispositifs classiques (Crane *et al.*, 2017).

On retrouve des **horloges atomiques** dans le commerce depuis le milieu du XXe siècle, et des horloges atomiques de la taille d'une puce depuis 2011 (QED-C, 2022a). Elles sont utilisées dans un large éventail de domaines commerciaux, notamment en télécommunications, en navigation, en détection et en finance, tandis que les versions de la taille d'une puce sont employées dans l'exploration pétrolière et gazière. Les horloges atomiques de nouvelle génération, fondées sur les transitions optiques, sont en cours de mise au point; ces dispositifs devraient être plus performants que les horloges atomiques existantes. Elles seront très probablement utilisées principalement dans la recherche scientifique, par exemple en physique et en géologie, souvent à partir de satellites (QED-C, 2022a).

2.1.3 Communications

De façon générale, les communications quantiques relèvent de deux domaines reliés : (i) la transmission d'informations quantiques d'un endroit à un autre et (ii) les communications sécurisées impossibles à décrypter par un ordinateur quantique. En ce qui concerne le premier domaine, il existe de nombreuses applications potentielles, notamment un *Internet quantique* qui pourrait relier des ordinateurs quantiques entre eux; l'informatique quantique *aveugle*, qui permet aux clients d'accéder à distance à un ordinateur quantique de façon que le fournisseur n'ait pas accès à leurs renseignements; l'échange d'états quantiques pour les protocoles cryptographiques et la mise en relation de capteurs quantiques. Il est important de noter que ces applications nécessitent des *réseaux*

quantiques permettant l'échange de qubits et la répartition d'états quantiques intriqués entre les nœuds de ce réseau (Judge, 2022)[4].

En ce qui concerne le deuxième domaine (assurer la sécurité des communications), de nombreuses applications des communications quantiques sont liées à la cryptographie. Il s'agit d'un vaste champ de recherche et de développement technologique, qui comprend, entre autres choses, l'échange de clés, le chiffrement, la signature numérique, l'authentification, les monnaies numériques. Comme il est mentionné au chapitre 1, les gros ordinateurs quantiques auront un jour la capacité de casser presque tous les schémas de chiffrement existants, comme les algorithmes de chiffrement RSA et de cryptographie sur les courbes elliptiques, qui sont largement répandus aujourd'hui, ainsi que d'autres procédés courants. Pour réduire cette menace, au moins deux options sont possibles. La première consiste à trouver de nouveaux protocoles de chiffrement classiques que l'on pense inviolables par des ordinateurs quantiques; ils utilisent une méthode appelée *cryptographie postquantique*, ou *cryptographie résistante aux méthodes quantiques* (QRC). La seconde option consiste à utiliser des états quantiques pour établir une clé classique entre deux parties, qui peut ensuite être utilisée pour échanger des renseignements privés. Cette méthode, appelée *échange quantique de clés* (QKD), est un sous-ensemble de la cryptographie quantique.

Le QKD est théoriquement plus sûr que la QRC, mais on manque de données probantes, de tests et de normes pratiques sur ces deux techniques

Le QKD demande la génération et le partage de clés de chiffrement, qui sont ensuite utilisées pour chiffrer et déchiffrer des messages. L'échange de ces clés cryptographiques utilise des effets quantiques (p. ex. l'intrication ou la superposition d'états) pour garantir qu'aucun tiers ne puisse prendre connaissance de la clé sans être détecté. Si un intrus tente d'intercepter la clé et d'en prendre connaissance, il sera détecté et la clé sera rejetée; sinon, la clé sera utilisable.

Il est important de noter que le terme QKD renvoie à la méthode de génération et d'échange d'une clé cryptographique et n'inclut pas le chiffrement ou la transmission d'informations. Ainsi, selon la National Security Agency (NSA) aux États-Unis, le QKD est un élément de la cryptographie quantique, mais « n'est qu'une solution partielle [car il] ne fournit pas de moyen d'authentifier sa source de transmission » (NSA, s.d.). Bien que cette caractérisation du QKD ait été qualifiée de trompeuse (p. ex., Prisco, 2020; Renner et Wolf, 2023), elle est

4 On a suggéré de rebaptiser les communications quantiques *réseaux quantiques*. Toutefois, ce rapport utilise le terme *communications quantiques* au sens large pour décrire une variété d'applications, y compris la cryptographie résistante aux méthodes quantiques classique (conformément à la convention adoptée dans les publications). Le comité emploie le terme *réseaux quantiques* dans un sens plus restreint, pour désigner les réseaux qui permettent l'échange de qubits et l'intrication distribuée.

également utilisée par le National Cyber Security Centre (NCSC) au Royaume-Uni (NCSC, 2020). En revanche, la QRC demande l'utilisation d'outils de calcul classiques pour chiffrer l'information d'une manière qu'on pense garantir contre le décryptage par un ordinateur quantique. Le QKD est donc fondamentalement différent de la QRC.

Le QKD et la QRC ont été décrits, respectivement, comme des approches matérielles et logicielles de la cryptographie quantique (IQT, 2019). La sécurité du QKD est prouvée, du moins dans la mesure où les lois de la physique garantissent théoriquement qu'une clé quantique ne peut être cassée ou copiée sans que cela soit détecté. En revanche, la QRC n'est pas garantie contre le décryptage par un ordinateur quantique (IQT, 2019), ni même par un ordinateur classique; en effet, comme il est noté ci-dessous, certains candidats prometteurs au titre d'algorithme résistant aux méthodes quantiques ont déjà été décryptés par des ordinateurs classiques. De plus, contrairement au QKD, il est probablement impossible de prouver qu'un protocole QRC donné ne peut pas être cassé. Cependant, bien que le QKD soit *théoriquement* sûr, il n'existait aucune preuve de cette sécurité pour une implantation réelle en septembre 2023, et aucune norme ne permet d'en tester ou d'en certifier la sécurité (NSA, 2021). En outre, les premières implantations du QKD se sont révélées piratables à plusieurs égards, bien que des recherches soient en cours pour cerner et atténuer ces vulnérabilités (Pang *et al.*, 2020).

Les organismes de cybersécurité au Canada et à l'étranger ont recommandé d'utiliser la QRC plutôt que le QKD, du moins à court terme

Certaines sources avancent que le QKD et la QRC ne sont pas nécessairement concurrents et qu'il est possible de mettre en œuvre la seconde à court terme, le QKD suivra lorsqu'il sera plus largement accessible (Capgemini, 2022). Toutefois, la NSA a indiqué qu'elle préférait la QRC et « ne considère pas le QKD comme une solution de sécurité pratique pour protéger les renseignements de sécurité nationale » (NSA, 2021), « n'appuie pas l'utilisation du QKD [...] et ne prévoit pas certifier ou approuver des produits de sécurité à QKD » (NSA, s.d.). Cette décision repose sur cinq limites de la technologie : (i) le QKD n'est qu'une solution partielle, (ii) il nécessite un équipement spécial, (iii) il augmente les coûts d'infrastructure et les risques de menace interne, (iv) la sécurisation et la validation du QKD sont très compliquées et (v) il accroît le risque d'attaques par déni de service (NSA, s.d.). Certains (comme Prisco, 2020) affirment toutefois que ce sont des mythes.

Les organismes de cybersécurité nationaux de plusieurs pays étrangers — dont le NCSC au Royaume-Uni (NCSC, 2020), l'Office fédéral de la sécurité de l'information en Allemagne (BSI, 2020) et l'Agence nationale de la sécurité des

systèmes d'information en France (ANSSI, 2022, s.d.) — ont exprimé des craintes similaires au sujet du QKD et ont également recommandé de ne pas l'utiliser afin de protéger les renseignements sensibles, au moins à court terme; ces agences sont en revanche favorables à la QRC. Le Centre canadien pour la cybersécurité a, pour sa part, indiqué que même si le QKD peut un jour être utile pour sécuriser les communications, il « n'a pas encore atteint tout son potentiel », est encore en cours de maturation et « n'a pas pour objet de remplacer les applications de chiffrement actuelles »; il recommande aux entreprises d'élaborer des plans de transition vers la QRC (Cybercentre, 2021). Cependant, malgré le scepticisme exprimé par ces organismes nationaux de cybersécurité, le QKD suscite un grand intérêt, particulièrement en Europe et en Asie (voir ci-dessous).

L'adoption de la QRC se heurte à des obstacles découlant de l'absence de normalisation

La QRC demande des outils de calcul classiques pour chiffrer l'information d'une manière qu'on pense garantir contre le décryptage par un ordinateur quantique. Différentes entreprises proposent de nombreuses solutions de QRC; ces solutions sont relativement peu coûteuses, faciles à mettre en œuvre et compatibles avec les protocoles de communication existants. Toutefois, aucune n'a prouvé qu'elle résistait au décryptage par un ordinateur quantique, et il n'existe actuellement aucune norme permettant de les évaluer. L'absence de normalisation constitue d'ailleurs un obstacle majeur à l'adoption de la QRC. C'est pourquoi le Centre canadien pour la cybersécurité et le département américain de la Sécurité intérieure ont tous deux recommandé aux organisations de s'abstenir de mettre en œuvre la QRC jusqu'à ce que des solutions normalisées soient largement disponibles (U.S. DHS, 2021; Cybercentre, 2022).

En 2016, le National Institute of Standards and Technology (NIST) aux États-Unis a commencé à travailler à l'élaboration de normes concernant la QRC (Alagic *et al.*, 2022); en 2022, il a sélectionné quatre algorithmes candidats à la normalisation et en a déterminé quatre autres qui pourraient aussi faire partie de la sélection dans le futur (NIST, 2022). Des normes complètes devraient être publiées par le NIST d'ici à 2024 (Alagic *et al.*, 2022). Le Centre canadien pour la cybersécurité collabore avec lui et avec d'autres partenaires à l'évaluation des normes de QRC et « participe activement aux activités de normalisation internationale, dont celles menées par l'Organisation internationale de normalisation et de l'Internet Engineering Task Force » (Cybercentre, 2021). (Les sections 5.4 et 6.2.3 renferment plus de renseignements sur les normes.) Le NIST s'est également associé à 12 entreprises privées aux États-Unis pour développer et mettre en place des algorithmes résistants aux méthodes quantiques à l'échelle nationale, dans le but de migrer vers des normes de cybersécurité résistante aux méthodes quantiques

d'ici à 2035 (Kelley, 2023), conformément à une directive présidentielle sur la sécurité nationale publiée en 2022 (The White House, 2022b). En 2022 également, les États-Unis ont adopté la Loi sur la préparation à la cybersécurité de l'informatique quantique (*Quantum Computing Cybersecurity Preparedness Act*), qui demande aux agences gouvernementales de commencer à se préparer à la mise en œuvre de la QRC en dressant un inventaire hiérarchisé des technologies de l'information qui pourraient être vulnérables au décryptage par un ordinateur quantique (Gouv. des É.-U., 2022).

Un autre gros obstacle auquel fait face la QRC est le fait que bon nombre des algorithmes les plus prometteurs n'ont pas été testés de manière approfondie et pourraient être cassés à un moment ou à un autre dans le futur. En effet, au moins l'un des quatre algorithmes candidats initiaux du NIST a déjà été décrypté à l'aide d'un ordinateur classique (Swayne, 2022).

Le QKD suscite l'intérêt dans de nombreux pays, mais se heurte à des difficultés techniques qui empêchent actuellement sa commercialisation à grande échelle

Le QKD est une technologie relativement mature qui a déjà été utilisée dans plusieurs validations de principe, notamment dans des réseaux à fibre optique et dans la communication en espace libre (Khan *et al.*, 2018). En outre, malgré le scepticisme exprimé par certaines agences de cybersécurité nationales (voir plus haut), les chercheurs, l'industrie et les gouvernements au Canada et ailleurs dans le monde s'intéressent beaucoup au QKD. Par exemple, la stratégie sur les technologies quantiques de l'Union européenne donne la priorité à la disponibilité généralisée du QKD, même pour les appareils grand public, ce qui laisse entrevoir un vaste marché international pour les produits basés sur cette technologie (UE, 2016; Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Le programme OpenQKD — un programme triennal (2019–2022) de 15 millions d'euros — a établi plusieurs bancs d'essai dans toute l'Europe afin de tester et de promouvoir les cas d'utilisation du QKD (Hoofnagle et Garfinkel, 2021; OpenQKD, s.d.-a) et de « jeter les bases du déploiement d'une infrastructure numérique paneuropéenne sûre sur le plan quantique » (OpenQKD, s.d.-b). De plus, la Chine a effectué d'importants investissements dans le QKD et a établi un réseau de QKD qui s'étend sur des milliers de kilomètres et relie les grandes villes par fibre optique (Chen *et al.*, 2021; Johnson, 2021). Elle conçoit aussi actuellement plusieurs satellites QKD pour étendre encore le réseau (Jones, 2023). Plusieurs autres pays d'Europe et d'Asie développent également activement des réseaux de QKD.

Cependant, cette technologie se heurte à des problèmes de transmission de l'information sur de longues distances (env. 100 km), à l'ampleur des coûts, à la complexité technique et à la limitation de la vitesse de transmission

(Crane *et al.*, 2017; Hoofnagle et Garfinkel, 2021; Capgemini, 2022). Malgré les prétendus avantages en matière de sécurité qu'offre le QKD par rapport à la QRC, l'adoption du QKD est relativement faible en dehors des essais soutenus par le gouvernement, des instituts de recherche et des fournisseurs de télécommunications (Crane *et al.*, 2017; Capgemini, 2022). Des travaux sont en cours pour atténuer les limitations; par exemple, l'un des objectifs du programme OpenQKD était de s'attaquer aux barrières pratiques et techniques à l'adoption, telles que l'élaboration de normes de mise en œuvre (Hoofnagle et Garfinkel, 2021; OpenQKD, s.d.-a). Le QKD devrait être plus largement adopté durant la prochaine décennie, en particulier dans les secteurs des télécommunications, de la finance et de la défense, en raison de ses avantages par rapport à la QRC classique; toutefois, il est peu probable que des réseaux pouvant atteindre les utilisateurs finaux soient mis en place avant 2035 ou 2040 (QDNL, 2020).

Le QKD par fibre fonctionne sur de moyennes distances, mais nécessite des répéteurs pour amplifier le signal

Le signal est atténué lors d'une transmission longue distance en QKD, car une décohérence se produit le long du trajet de la fibre. Cela signifie qu'il doit être « amplifié » à l'aide de dispositifs appelés *répéteurs quantiques*. Un véritable répéteur quantique permettrait la transmission de bout en bout d'informations quantiques (Wehner *et al.*, 2018). Bien que les fondements théoriques de ce procédé soient bien compris, des défis techniques ont freiné son développement pratique. Entre-temps, des répéteurs de confiance sont utilisés en guise d'étape intermédiaire dans le développement du QKD à longue distance. Ils ne permettent toutefois pas la transmission d'informations quantiques de bout en bout.

De plus, en raison de la nature de l'information quantique, il n'est pas possible de simplement copier et reproduire le signal; celui-ci doit être mesuré (en détruisant le signal original), traité et recréé chaque fois qu'il faut l'amplifier, ce qui pose des problèmes de sécurité à l'emplacement physique du répéteur, où le signal pourrait être intercepté. Pour y remédier, chaque répéteur échange des clés avec les répéteurs adjacents dans une séquence de liaisons, ce qui permet finalement à l'émetteur et au récepteur de générer et de partager leur propre clé cryptographique. Cependant, chaque répéteur de la séquence dispose d'informations sur cette clé, ce qui introduit des vulnérabilités potentielles — d'où la nécessité que les répéteurs soient « de confiance » (Wehner *et al.*, 2018).

Les travaux sur l'*échange quantique de clés non-tributaire* (DIQKD) montrent qu'il est, en principe, possible de surmonter ces limitations et d'obtenir un QKD véritablement sûr. Le DIQKD permet même de créer des clés cryptographiques en utilisant des appareils qui ne sont pas de confiance (Wehner *et al.*, 2018). Cependant, il existe encore un fossé important entre la théorie et la pratique pour

ce qui est du DIQKD. Celui-ci en est actuellement à l'étape du prototype expérimental et n'est pas encore près d'être commercialisé (de Smyter, 2021).

Le Canada figure parmi les pays qui se penchent sur le QKD par satellite

La communication par satellite est une autre façon de mettre en œuvre le QKD tout en évitant les problèmes dus aux câbles à fibre optique. Elle sera vraisemblablement utilisée pour le QKD à longue distance, tandis que le QKD à fibre optique servira, lui, dans les réseaux de communication locaux. Le Canada est actuellement un chef de file dans ce domaine et poursuit la mise en place d'un système QKD satellitaire dans le cadre de la mission QEYSSat (pour Quantum Encryption and Science Satellite, ou satellite de chiffrement et de science quantiques). Dirigée par l'Agence spatiale canadienne, la mission QEYSSat est un projet collaboratif qui regroupe Honeywell Aerospace et l'Institut d'informatique quantique de l'Université de Waterloo, plus neuf autres collaborateurs provenant d'autres universités canadiennes (ainsi qu'une station QKD terrestre à l'Université de Calgary) et neuf organisations collaboratrices à l'étranger (ASC, 2020; UWaterloo, 2021). D'autres pays sont actifs dans la conception du QKD par satellite, notamment la Chine (Optica, 2022; Jones, 2023), l'Allemagne (DLR, s.d.), l'Inde (ET Telecom, 2023), Israël (QuantLR, 2021), le Japon (Mamiya *et al.*, 2022), le Luxembourg (Burkitt-Gray, 2021), Singapour (GW, 2019; SpeQtral, 2022), le Royaume-Uni (Pultarova, 2021) et l'Union européenne (Kramer, 2022; CE, 2023).

Les réseaux quantiques pourraient améliorer les ordinateurs et les capteurs quantiques, mais ils sont encore loin de la maturité technologique

Les réseaux quantiques — parfois appelés Internet quantique — sont des réseaux de processeurs quantiques capables d'échanger des informations quantiques. Ils sont constitués de trois éléments : (i) des canaux de communication capables d'acheminer les informations quantiques (comme les câbles à fibre optique), (ii) des répéteurs, qui permettent de transmettre les informations quantiques sur de longues distances et (iii) des nœuds d'extrémité constitués de processeurs quantiques (Wehner *et al.*, 2018). Le QKD est l'une des applications les plus connues des réseaux quantiques, mais il y en a d'autres, comme l'informatique quantique distribuée, qui rendrait possible l'informatique quantique à une échelle actuellement impossible avec un seul ordinateur quantique (van Dam, 2020), ainsi que les réseaux de capteurs quantiques susceptibles de produire des mesures extrêmement précises.

Bien que la mise en réseau quantique soit un domaine de recherche actif — par exemple, c'est l'un des objectifs fondamentaux d'un projet d'un milliard d'euros

de l'Union européenne (Quantum Flagship, 2017; Cartlidge, 2018) — elle est loin de la maturité technologique et de la disponibilité commerciale, laquelle ne devrait pas être atteinte avant 2035 (QDNL, 2020). Néanmoins, de nombreux pays — dont le Canada (encadré 2.1) — s'y intéressent, et les investissements à court terme dans ces réseaux seront bénéfiques à un large éventail de technologies quantiques à plus long terme.

Encadré 2.1 Un réseau national de communications quantiques sécurisées

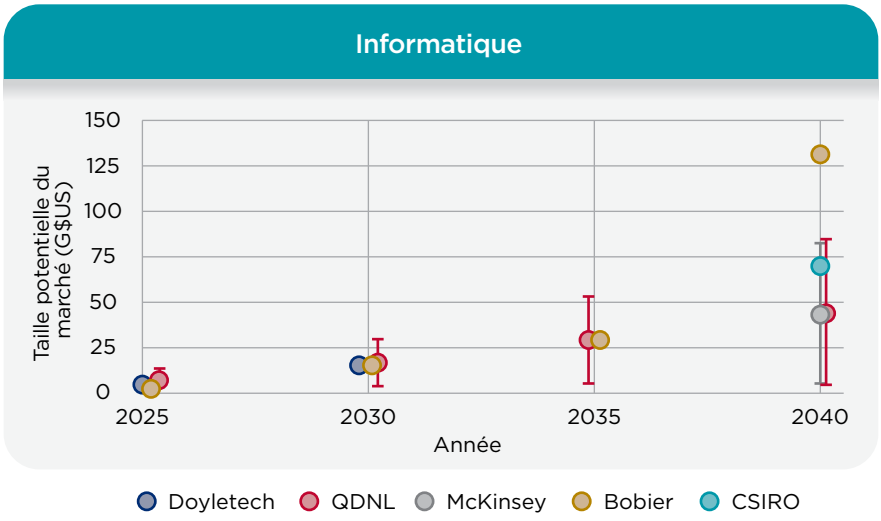
La *Stratégie quantique nationale* (SQN) du Canada considère la mise en œuvre d'un réseau national de communications quantiques sécurisées comme une priorité essentielle (ISDE, 2023d). Selon la SQN, il existe un vaste marché commercial pour la transmission sécurisée d'informations numériques, laquelle est très vulnérable aux technologies quantiques émergentes. Un réseau de communications quantiques sécurisé intégrerait des technologies de communications quantiques ainsi que des protocoles de QRC pour atténuer les risques. Le MDN s'est d'ailleurs engagé à déployer des réseaux quantiques capables de transmettre des informations quantiques sur de longues distances d'ici à 2030 (MDN et FAC, 2023). La SQN juge également importante l'infrastructure terrestre et satellitaire, et cite parmi les initiatives orientées sur ce sujet la mission QEYSSat et le programme Défi « Réseaux sécurisés à haut débit » du CNRC (ISDE, 2023d). Toutefois, de l'avis du comité, il est crucial de maintenir l'interrelation entre les partenaires nationaux et internationaux, ce qui peut être réalisé si le Canada participe à l'élaboration et à l'adoption de normes internationales (sections 5.4 et 6.2.3).

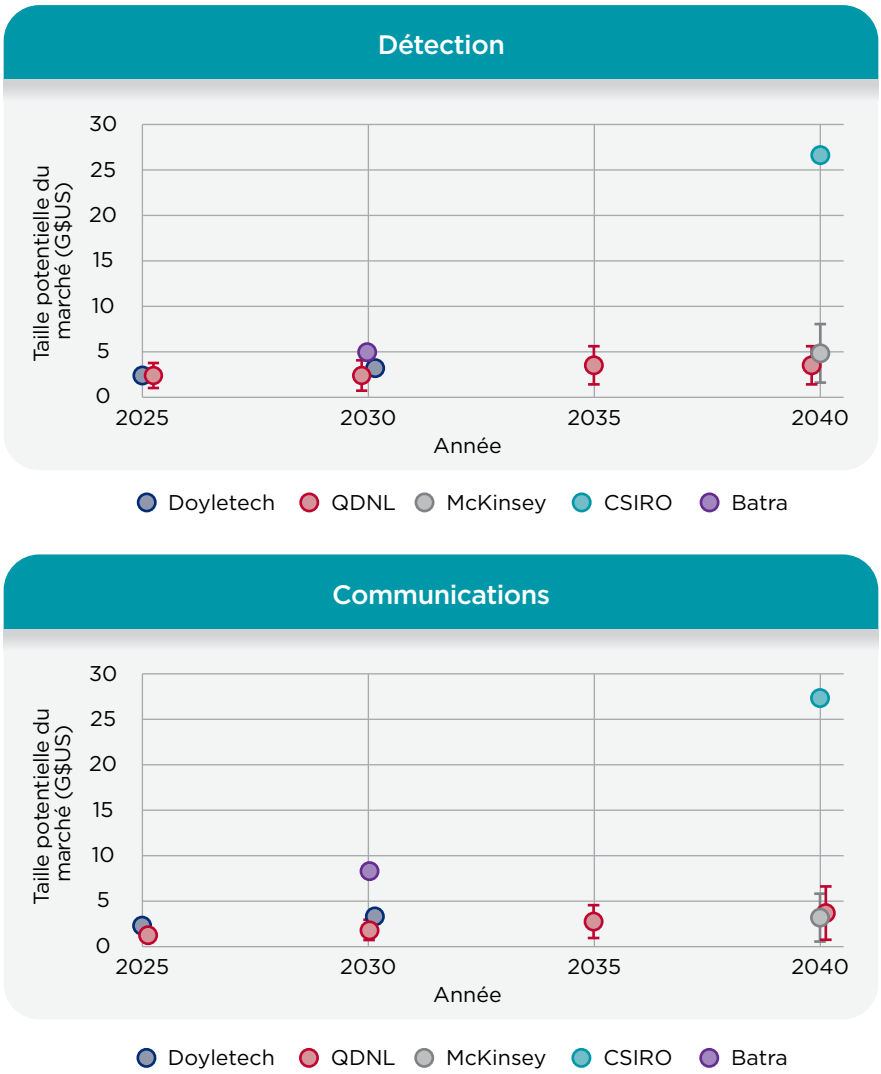
2.1.4 Taille potentielle du marché des technologies quantiques

Plusieurs sources (principalement, mais pas exclusivement, des cabinets de conseil) ont tenté d'estimer la taille potentielle du marché pour les différentes technologies quantiques et la façon dont il pourrait croître avec le temps (figure 2.1). Toutefois, le comité d'experts met en garde contre le fait que les chiffres avancés sont intrinsèquement spéculatifs, qu'ils représentent au mieux des estimations approximatives et qu'ils doivent être traités avec beaucoup de scepticisme, car il est difficile de prévoir le potentiel commercial de technologies qui sont encore à des années (voire à des décennies) de la maturité et pour lesquelles il existe peu

d'applications réelles au moment où ces estimations sont faites. En effet, le comité juge que ces chiffres sont probablement inexacts et illustrent le battage médiatique (section 4.2.3). Ils sont présentés ici simplement pour démontrer la grande incertitude concernant la taille et le taux de croissance du marché des technologies quantiques au cours des prochaines décennies. Il estime en outre que se concentrer sur la taille du marché peut empêcher de voir l'ensemble du tableau, car les technologies quantiques auront sans aucun doute des répercussions sociales et économiques importantes dans un large éventail de domaines.

Il est également difficile de comparer les estimations, car les diverses sources évaluent la taille du marché pour différents ensembles de technologies et classent les technologies quantiques de différentes manières. En outre, alors que la plupart des estimations sont présentées en termes de « revenus » (Batra *et al.*, 2021; Bobier *et al.*, 2021; CSIRO, 2022), d'autres sont décrites comme des « ventes » (Doyletech Corporation, 2020), un « potentiel de marché » (QDNL, 2020) ou un « marché estimé » (McKinsey, 2022); il n'est donc pas certain que ces évaluations soient directement comparables. Il faut également noter que les estimations pour une même technologie effectuée par des sources différentes peuvent différer d'un ordre de grandeur, en particulier dans le cas de projections à long terme (p. ex. 15 à 20 ans). Cependant, selon toutes les estimations, l'informatique quantique a une valeur marchande potentielle beaucoup plus élevée que les communications et la détection; elle représente entre 50 et 80 % du marché projeté des technologies quantiques au cours des deux prochaines décennies.





Sources : Doyletech Corporation (2020); QDNL (2020); Batra *et al.* (2021); Bobier *et al.* (2021); CSIRO (2022); McKinsey (2022)

Figure 2.1 Estimation de la taille potentielle du marché des ordinateurs, capteurs et communications quantiques

Cette figure présente plusieurs estimations différentes de la taille potentielle du marché pour les concepteurs d'ordinateurs quantiques, de capteurs quantiques et de technologies de communication quantiques. Les barres d'erreur indiquent les plages d'estimation.

Les investissements actuels dans les technologies quantiques peuvent donner une idée de leur potentiel de commercialisation

Pour mieux comprendre le potentiel de commercialisation des technologies quantiques, il peut être instructif d'examiner les investissements qui ont été réalisés dans ces technologies. La section 3.1.4 décrit l'ampleur des investissements du secteur public dans les technologies quantiques de plusieurs pays, dont le Canada; il est toutefois important de noter qu'il ne s'agit pas d'indicateurs de la taille du marché potentiel des différentes technologies quantiques, bien que ces investissements reflètent l'importance économique perçue de ces technologies. De même, les investissements du secteur privé dans les technologies quantiques peuvent fournir une indication de leur potentiel à cet égard. Les renseignements détaillés sur les investissements dans la recherche-développement (R-D) quantique ne sont généralement pas accessibles au public. McKinsey (2022) rapporte que les investissements dans les entreprises en démarrage du domaine des technologies quantiques ont totalisé plus de 1,4 milliard de dollars américains en 2021. En outre, entre 2001 et 2021, environ 3 milliards de dollars américains ont été investis dans des entreprises en démarrage d'informatique quantique, 700 millions dans des entreprises en démarrage de communications quantiques et 400 millions dans des entreprises de détection quantique (McKinsey, 2022), ce qui porte à croire que les investisseurs s'attendent à ce que le marché de l'informatique quantique soit beaucoup plus important que ceux des communications quantiques et de la détection quantique.

2.1.5 Préparation technologique

Le délai d'adoption des technologies quantiques dépend de leur état de préparation. Le tableau 2.1 présente des estimations approximatives des délais de disponibilité de certaines d'entre elles. Ces estimations sont basées sur une revue des publications et sur l'expertise du comité d'experts. Toutefois, ce dernier met en garde contre leur caractère hautement spéculatif, car il existe une forte incertitude quant à l'état de développement de bon nombre de ces technologies, en particulier lorsque le délai est éloigné.

Tableau 2.1 Estimation de l'horizon de disponibilité de certaines technologies quantiques

	Actuellement disponibles (2023)	Émergents et à court terme (avant 2030)	Moyen terme (2030–2040)	Long terme (après 2040)
Informatique	• Ordinateurs NISQ	• Débuts de l'informatique quantique tolérante aux pannes	• Informatique quantique entièrement tolérante aux pannes • Simulation quantique • Apprentissage machine quantique	• Supercalculateurs quantiques universels à grande échelle et entièrement tolérants aux pannes
Détection	• Horloges atomiques • Spectromètres à résonance paramagnétique électronique quantiques • Gravimètres quantiques	• Imagerie quantique • Magnétomètres quantiques • Navigation quantique		• Radars/lidars quantiques
Communications	• QKD (courte distance) • QRC		• QKD (longue distance/ satellite)	• Internet quantique

Sources : Troyer (2020); Batra (2021); Krelina (2021); Commonwealth d'Australie (2021); Capgemini (2022)

2.1.6 Les technologies quantiques en tant que technologies à usage général

Les technologies à usage général (TUG) peuvent être caractérisées globalement comme des technologies « susceptibles d'être utilisées de façon généralisée dans un large éventail de secteurs afin de modifier radicalement leur mode de fonctionnement » (Helpman, 1998). Selon une définition très répandue, une TUG est « une technologie générique unique, reconnaissable à ce titre tout au long de sa durée de vie, qui présente initialement une grande marge d'amélioration et finit par être largement utilisée, par avoir de nombreuses utilisations et par produire de nombreux effets d'entraînement » (Lipsey *et al.*, 2005).

Il n'est pas encore certain que les technologies quantiques soient des TUG. Toutefois, répondre à cette incertitude permettrait d'avoir une idée de l'ampleur et de la transformation qu'elles pourraient avoir. Cette question est notamment très peu abordée dans les publications sur les technologies quantiques. Le Forum économique mondial a laissé entendre que l'informatique quantique est une TUG,

au même titre qu'Internet, l'électricité et même le feu (Almosallam, 2022). De même, Coccia (2021) affirme que les technologies quantiques sont des TUG en raison de leur potentiel à rendre les technologies antérieures obsolètes, à soutenir la transformation industrielle et sociale et à engendrer des grappes d'innovations dans les industries en aval. Cela dit, d'autres sources (p. ex. Dekate *et al.*, 2021) affirment explicitement que l'informatique quantique *n'est pas* une TUG, dans la mesure où elle n'est applicable qu'à une gamme étroite de problèmes de calcul. Enfin, certains ont avancé que les *matériaux quantiques* étaient des TUG en raison de leur « potentiel d'impact économique majeur dans un vaste éventail d'industries et d'applications » (Maine et Garnsey, 2006) (encadré 2.2).

Encadré 2.2 Matériaux quantiques

Les matériaux quantiques sont mentionnés dans la SQN du Canada comme un domaine prioritaire pour la R-D (ISDE, 2023d). Ils présentent des propriétés électroniques, magnétiques ou optiques uniques résultant des effets de la mécanique quantique (Cava *et al.*, 2021). Ils peuvent prendre de nombreuses formes, notamment celles de métaux, d'isolants, de semiconducteurs ou de supraconducteurs, et constituer les fondements des technologies quantiques. Les isolants topologiques, les supraconducteurs à haute température et les points quantiques sont quelques exemples de matériaux quantiques.

Les TUG possèdent quatre caractéristiques essentielles : (i) une grande marge d'amélioration à leur introduction, (ii) une grande variété d'utilisations, (iii) des applications dans plusieurs domaines de l'économie et (iv) une forte complémentarité avec d'autres technologies (Lipsey *et al.*, 1998). Tout d'abord, elles doivent passer par un processus d'évolution durant lequel « la technologie est améliorée, son coût de fonctionnement dans les utilisations existantes baisse, sa valeur est accrue par l'invention de technologies qui la soutiennent et son champ d'utilisation s'élargit tandis que la variété de ses utilisations s'accroît » (Lipsey *et al.*, 1998). Deuxièmement, elles sont utilisées dans une grande variété de produits et de procédés, qui ont eux-mêmes une grande variété de fonctions. Cependant, il y a généralement très peu de cas d'utilisation spécifiques aux nouvelles TUG, de nouvelles applications étant découvertes à mesure de leur évolution; ainsi, une TUG « comporte implicitement un important programme de recherche visant à découvrir des améliorations, des adaptations et des modifications ». Troisièmement, les TUG peuvent être utilisées dans un large éventail de contextes au sein d'une économie; cela ne signifie toutefois pas

qu'elles ont une grande variété d'utilisations (p. ex. les ampoules électriques sont employées dans une multitude de contextes, mais elles n'ont qu'une seule utilité). Enfin, elles présentent une forte complémentarité avec d'autres technologies, tant verticalement qu'horizontalement, de sorte qu'elles « coopèrent, soit en tant que sous-éléments d'une technologie principale, soit en tant qu'éléments distincts et autonomes d'un système technologique » (Lipsey *et al.*, 1998). Cette complémentarité peut également se caractériser par une intensification de la R-D dans les secteurs en aval à la suite d'une innovation dans une TUG (Bresnahan et Trajtenberg, 1995).

Certaines technologies quantiques répondent dans une certaine mesure à ces critères. De façon générale, elles subissent des décennies d'évolution, durant lesquelles elles ont passés de l'état de concept théorique à celui de technologie pratique, profitant d'améliorations continues et accélérées des capacités, de la réduction des coûts et de la détermination d'une grande variété de nouveaux cas d'utilisation dans une vaste gamme de secteurs économiques. En outre, de nombreuses technologies quantiques présentent une forte complémentarité avec d'autres technologies, qu'il s'agisse de sous-technologies ou d'éléments autonomes d'un système technologique, et elles améliorent l'innovation dans les secteurs en aval. De l'avis du comité, l'informatique quantique est susceptible de devenir une TUG, car elle finira probablement par être à la base de presque tous les aspects de l'informatique et des technologies de l'information en plus de les influencer. En outre, certains aspects des communications quantiques, comme les réseaux quantiques, pourraient devenir des TUG. Toutefois, c'est beaucoup moins probable pour les capteurs quantiques, car ils ont tendance à être plus spécialisés dans certaines applications, et posséder une variété plus limitée d'utilisations dans un nombre plus restreint de secteurs.

2.2 Adoption des technologies quantiques par différents secteurs

L'adoption des technologies quantiques dans une industrie ou un secteur donné dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'existence d'applications pratiques, du potentiel d'amélioration par rapport à la technologie classique actuelle, de la disponibilité et de la maturité de la technologie quantique concernée et de la capacité du secteur à investir du temps, de l'argent et des ressources dans son adoption. Ainsi, il peut être difficile d'estimer la probabilité et la rapidité d'adoption dans les différents secteurs; dans certains de ceux qui devraient être les premiers à adopter les technologies quantiques (en ce qui concerne les investissements, l'attention et la R-D), il se peut qu'il n'y ait pas d'applications prometteuses avant des années, voire des décennies, tandis que ceux pour lesquels

ces technologies sont actuellement disponibles — ou le seront à court terme — peuvent investir moins de ressources dans ces technologies.

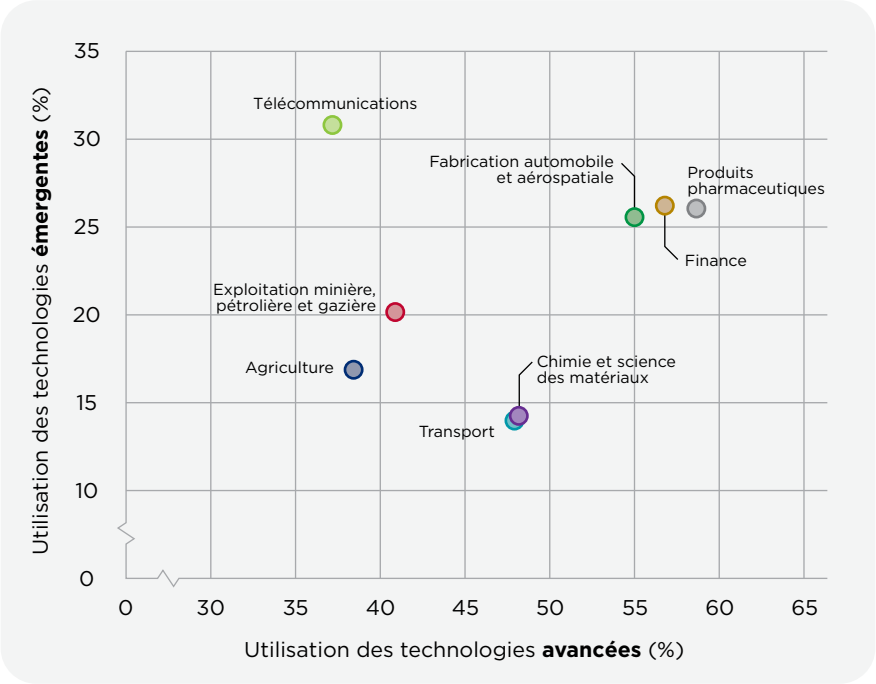
Toutefois, les publications s'accordent généralement à dire que les secteurs des produits pharmaceutiques, de la chimie et de la science des matériaux, de la finance et des transports (y compris le routage, la logistique et la fabrication aérospatiale et automobile) sont susceptibles d'être des adopteurs précoces et présentent le plus grand potentiel d'applications à forte valeur ajoutée (Langione *et al.*, 2019b; Biondi *et al.*, 2021; Capgemini, 2022). En outre, les secteurs des télécommunications, de la défense et de l'espace sont souvent cités comme de possibles utilisateurs précoces avec des applications de grande valeur (Doyletech Corporation, 2020; Capgemini, 2022). Parmi les autres secteurs susceptibles d'adopter les technologies quantiques figurent l'extraction des ressources naturelles, la santé et l'énergie. En outre, on prévoit que les technologies quantiques seront continuellement intégrées dans la recherche scientifique fondamentale, dans des domaines tels que la physique, la chimie et la science du climat, entre autres. Une enquête menée auprès d'intervenants du secteur quantique dans les universités, l'industrie et le gouvernement a révélé que la défense, les télécommunications, la finance et les ressources naturelles étaient les secteurs prioritaires en matière de technologies quantiques au Canada, suivis par le secteur pharmaceutique, la gestion de l'environnement et la santé. Toutefois, l'ensemble de ces sept secteurs sont largement considérés comme importants par les personnes interrogées (Doyletech Corporation, 2020).

L'utilisation de technologies avancées ou émergentes dans un secteur peut révéler la capacité du secteur à adopter des technologies quantiques et la probabilité qu'il le fasse

Les données de l'*Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise* réalisée par Statistique Canada peuvent donner une idée des secteurs les plus susceptibles d'adopter les technologies quantiques au Canada. La figure 2.2 présente le pourcentage d'entreprises de chaque secteur qui utilisent des technologies *avancées* et des technologies *émergentes* (ces catégories sont expliquées dans la légende). Comme elle l'illustre, les chefs de file de l'utilisation des technologies émergentes et avancées parmi les secteurs sélectionnés sont les secteurs pharmaceutique et financier, ainsi que l'industrie automobile et aérospatiale. Les télécommunications font un également usage relativement important des technologies émergentes.

La figure 2.2 considère l'utilisation de toute technologie avancée ou émergente comme un indicateur de substitution de la capacité d'un secteur à adopter et à utiliser les technologies quantiques. Cela s'explique en partie par le fait que l'édition 2019 de cette enquête (sur laquelle se fonde cette analyse) n'inclut pas les technologies

quantiques parmi les technologies avancées ou émergentes (StatCan, 2023a). Toutefois, l'édition 2022 *comprend* des questions sur l'utilisation des technologies quantiques (StatCan, 2023b) et devrait donc fournir une image plus claire de l'adoption de ces technologies par les entreprises canadiennes. Les résultats de l'enquête de 2022 devraient être publiés en février 2024 (StatCan, 2023c).



Source des données : StatCan (2021)

Figure 2.2 Utilisation des technologies émergentes par rapport aux technologies avancées dans certains secteurs

Cette figure présente le pourcentage d'entreprises de chaque secteur qui utilisent des technologies *avancées* et des technologies *émergentes*. Le terme *technologies avancées* désigne des types généraux de technologie, tels que les technologies de manutention, de chaîne d'approvisionnement ou de logistique, les technologies de conception ou de contrôle de l'information, les technologies de traitement ou de fabrication, les systèmes de sécurité ou d'authentification avancée et les technologies de renseignement économique. En revanche, le terme *technologies émergentes* désigne des technologies particulières, telles que les nanotechnologies, les biotechnologies, l'IA et la chaîne de blocs. La liste complète des codes du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) utilisés pour catégoriser chaque secteur se trouve à l'annexe A.

2.2.1 Applications des technologies quantiques dans les secteurs d'adoption

Le tableau 2.2 répertorie plusieurs des secteurs les plus susceptibles d'adopter les technologies quantiques au Canada et cite certaines des applications les plus pertinentes dans chaque secteur. Ces secteurs ont été déterminés à partir d'analyses de leur importance pour le Canada, d'un examen général des publications, de l'expertise du comité d'experts et de consultations avec le commanditaire préalables à l'évaluation. Il faut noter que cette liste n'est pas exhaustive et qu'elle ne contient que quelques exemples parmi les plus notables des cas d'utilisation potentiels des technologies quantiques pour chaque secteur. En outre, elle n'est ni hiérarchisée ni classée, mais présentée par ordre alphabétique. Une description plus détaillée de ces applications se trouve à l'annexe B.

Notons également qu'il est difficile de prévoir les cas d'utilisation potentiels des technologies quantiques pour au moins deux raisons. Premièrement, les affirmations concernant les capacités des technologies se heurtent à la fois à une grande incertitude et font l'objet d'un battage médiatique. Il peut donc être difficile de distinguer les applications authentiques et réalistes des applications exagérées ou gonflées. Deuxièmement, il est difficile de prévoir les effets à long terme d'une technologie perturbatrice; par exemple, personne durant la première moitié du XXe siècle n'aurait pu prévoir les innombrables façons dont les transistors ou les ordinateurs classiques allaient influer sur tous les aspects de la société. Il sera tout aussi difficile de prévoir les innombrables impacts des technologies quantiques (Ghose, 2020; Simmons, 2022).

Tableau 2.2 Applications des technologies quantiques par secteur

	Informatique	Détection	Communications
Agriculture	• Fixation de l'azote pour la production d'engrais • Agriculture prédictive	• Détection de l'état du sol aux fins de l'agriculture de précision	
Chimie	• Simulation de systèmes quantiques • Découverte de matériaux	• Centres NV aux fins de spectroscopie RMN	
Défense et renseignement	• Optimisation de la logistique militaire • Prise de décision militaire • Analyse du renseignement • Simulation de matériaux à des fins de défense	• Navigation des sous-marins • Détection de structures et de véhicules camouflés ou immergés • Radar quantique	• Communications sécurisées • Antennes quantiques • QRC
Énergie	• Optimisation des réseaux énergétiques • Simulation de matériaux énergétiques durables	• Surveillance de l'infrastructure	
Finance	• Optimisation de portefeuille • Analyse de données • Simulation de marchés		• Protection des transactions financières
Santé	• Prise de décision clinique • Aide au diagnostic • Optimisation de la radiothérapie	• OPM-MEG • Centres NV aux fins de microscopie magnétique et de spectroscopie RMN • Détection de nanoparticules magnétiques	• Protection et transmission des données de santé

	Informatique	Détection	Communications
Fabrication	• Simulation aux fins de conception, de fabrication et de découverte des matériaux • Optimisation des chaînes d'approvisionnement, du routage et de la logistique, des procédés de production et de la plannification de la production • Conception et fabrication des technologies quantiques		
Exploitation minière, pétrolière et gazière	• Optimisation des activités minières • Accroissement de l'automatisation	• Détection de gisements souterrains • Analyse d'échantillons de minerai • Surveillance de l'infrastructure	
Produits pharma-ceutiques	• Découverte de médicaments • Simulation de l'effet des composés sur les cibles biologiques	• Centres NV aux fins de spectroscopie RMN	
Recherche scientifique	• Simulation de la physique des particules • Analyse des données de supercollisionneur • Résolution des problèmes d'inversion	• Vérification des théories en physique fondamentale • Observation de la Terre aux fins de modélisation du climat	
Espace	• Optimisation des missions • Diagnostic et gestion des pannes	• Détection des débris spatiaux	• Communications Terre-espace sécurisées
Télé-communications	• Optimisation de l'emplacement de l'infrastructure de télécommunications • Routage du trafic sans fil	• Horloges optiques aux fins de synchronisation des réseaux	• QKD et QRC
Transport et logistique	• Optimisation de la logistique de transport et du routage • Conception de batteries	• Navigation	• Protection des modules de contrôle des véhicules

2.3 Retombées économiques des technologies quantiques

La conception et la commercialisation des technologies quantiques offrent de grandes possibilités économiques à la fois pour l'industrie quantique canadienne que pour le Canada dans son ensemble. Doyletech (2020) estime que le Canada détient 4 % de parts du marché quantique mondial, ce qui correspond à la « part traditionnelle du pays dans les innovations technologiques ». En revanche, la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation australienne prévoit une part de marché de 5 % pour l'Australie (CSIRO, 2022), et Quantum Delta NL, le programme de technologies quantiques national des Pays-Bas, a prévu une part de marché de 5 à 10 % pour ce pays (QDNL, 2020). La majeure partie du marché mondial, soit environ les trois quarts (75 %), devrait être accaparée par les États-Unis et la Chine (QDNL, 2020).

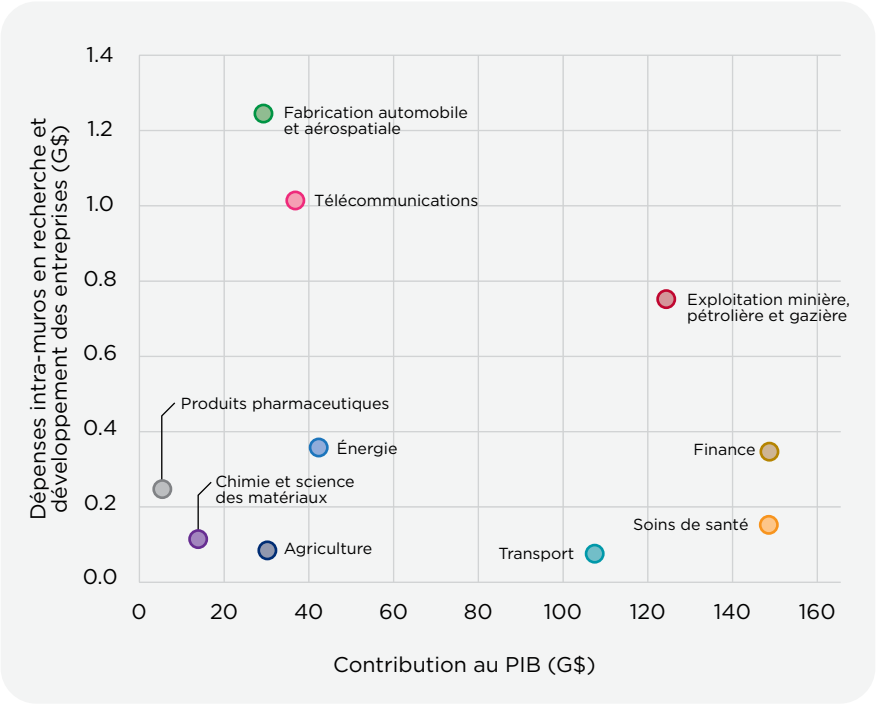
Les retombées économiques des technologies quantiques au Canada pourraient être très élevées

Selon la modélisation réalisée par Doyletech (2020) — qui a été commandée par le CNRC et est mentionnée dans la SQN canadienne — les retombées économiques totales des technologies quantiques au Canada (y compris les effets indirects et induits) pourraient s'élever à 138,9 milliards de dollars d'ici à 2045. Cela représenterait environ 2,7 à 3,3 % de l'ensemble de l'économie canadienne du moment et se traduirait par des recettes fiscales de plus de 42,3 milliards. Pour mettre ces chiffres en perspective, le secteur aérospatial canadien a généré environ 28 milliards de dollars d'activité économique en 2016, soit environ 1,3 % de l'économie totale (Doyletech Corporation, 2020). Il est toutefois important de noter que, de l'avis du comité, ces estimations (et les estimations similaires) sont hautement spéculatives et doivent être traitées avec prudence, étant donné la difficulté de prévoir les impacts économiques de technologies qui sont encore à des années (voire à des décennies) de la maturité et pour lesquelles il existe peu d'applications pratiques (voir la section 2.1.4). Quoi qu'il en soit, les technologies quantiques peuvent offrir un important rendement au Canada. Par exemple, Quantum Delta NL prévoit un retour d'environ huit fois l'investissement effectué dans les technologies quantiques pour l'économie néerlandaise à moyen terme (QDNL, 2020).

Les retombées économiques des technologies quantiques seront probablement concentrées dans certains secteurs

La figure 2.3 donne un aperçu de l'importance relative des technologies quantiques pour plusieurs secteurs économiques au Canada, d'après la contribution de chaque secteur au PIB global et sa capacité à adopter les nouvelles technologies (mesurée par les dépenses intra-muros en R-D des entreprises, ou DIRDE). Comme le montre la figure, plusieurs des secteurs les plus fréquemment cités comme étant des adopteurs précoces, et offrant un potentiel quantique de grande valeur, contribuent relativement peu au PIB global du Canada (p. ex. les produits pharmaceutiques ou la chimie), à l'exception du secteur de la finance.

Toutefois, le Canada pourrait bénéficier de possibilités nichées d'accélérer l'adoption des technologies quantiques dans des secteurs représentant des segments de marché plus petits, que d'autres pays négligent, mais qui sont néanmoins importants pour le Canada sur le plan économique (p. ex. les ressources naturelles ou les soins de santé). De même, il pourrait profiter d'occasions de se concentrer sur l'adoption des technologies quantiques dans les secteurs qui investissent le plus dans la R-D et qui ont l'habitude d'adopter rapidement les technologies émergentes (p. ex. la fabrication automobile ou aérospatiale). Par exemple, les récents investissements canadiens dans la fabrication de batteries pour véhicules électriques pourraient bénéficier de l'informatique et de la détection quantiques.



Source des données : StatCan (2022a, 2022b, 2022c)

Figure 2.3 DIRDE par rapport à la contribution au PIB de certains secteurs

L'axe des X de cette figure correspond à la contribution de chaque secteur au PIB global du Canada, tandis que l'axe des Y représente l'ampleur des DIRDE. Les secteurs sont classés par code SCIAN; la liste complète des codes SCIAN pertinents est présentée à l'annexe A. À noter que cette figure est à nuancer en raison de l'interdépendance entre les secteurs. Par exemple, le secteur de l'agriculture pourrait bénéficier de la simulation quantique susceptible de mener à de meilleurs catalyseurs pour la fixation de l'azote et à une production plus durable d'engrais (annexe B). Toutefois, la conception et la fabrication de ces catalyseurs seraient du ressort du secteur de la fabrication de produits chimiques.

Une analyse similaire des secteurs canadiens les plus susceptibles d'être touchés par les technologies quantiques a révélé que le secteur de l'information et des communications représentera probablement la plus grande partie du marché quantique au Canada, suivi par la défense, l'environnement et les produits pharmaceutiques (tableau 2.3).

Tableau 2.3 Part de marché de certains secteurs et contribution au PIB par secteur, selon le pourcentage du marché quantique national

Secteur	% du marché quantique national, moyenne 2020–2040	% du PIB (2019)
Information et communications	9,17	4,27
Services de défense	7,75	0,63
Technologies environnementales et propres	5,39	3,36
Ressources naturelles	3,79	7,49
Produits pharmaceutiques	3,69	0,31
Soins de santé	2,50	6,31
Finance et assurance	2,40	6,66
TOTAL	**35,81**	**29,04**

Adapté de Doyletech Corporation (2020)

Les estimations pour chaque secteur s'appuient sur l'analyse de Doyletech. En raison de l'arrondissement, les totaux peuvent ne pas correspondre à la somme des éléments.

La plupart des analyses publiques de la valeur économique des technologies quantiques portent sur les développeurs de ces technologies, et non sur ceux qui les adoptent

Plusieurs sources ont analysé la taille totale du marché potentiel des technologies quantiques. Toutefois, les estimations portent presque exclusivement sur la taille du marché pour les *fournisseurs* (c.-à-d. les concepteurs d'ordinateurs, de capteurs et de technologies de communication quantiques) et non sur les avantages économiques pour les adopteurs ou les utilisateurs finaux. En outre, toutes les estimations accessibles des avantages économiques pour les adopteurs des technologies quantiques concernent seulement l'informatique quantique, sans aucune estimation de la valeur créée par l'adoption de capteurs ou de communications quantiques.

Le tableau 2.4 présente la valeur économique prévue de l'adoption de l'informatique quantique (à maturité technologique) pour certains secteurs et applications, classée selon trois niveaux : *élevée*, *moyenne* et *faible*. Il est à noter que les secteurs sont classés différemment de ceux recensés au tableau 2.2 et que tous les secteurs répertoriés au tableau 2.2 ne sont pas représentés dans le tableau 2.4, car il n'existe pas d'estimations de la valeur économique de l'adoption pour tous les secteurs ou toutes les applications.

Tableau 2.4 Valeur de l'adoption de l'informatique quantique dans certains secteurs et applications (G$US)

Secteur	Valeur (faible, moyenne, élevée) ($)	Applications et estimations
Finance	ÉLEVÉE (50–355)	Optimisation du portefeuille : 20–50‡ 50–300* Gestion des risques : 10–20‡ Simulation de marché : 20–35‡
Transport/ Logistique	ÉLEVÉE (50–100)	Optimisation du routage des véhicules et du réseau : 50–100‡
Aérospatiale	ÉLEVÉE (40–90)	Optimisation des itinéraires de vol : 20–50‡ Dynamique numérique des fluides : 10–20‡ Matériaux : 10–20‡
Produits pharmaceutiques	ÉLEVÉE (25–130)	Découverte et mise au point de médicaments : 40–80‡ 15–75† Protéines thérapeutiques : 10–50*
Chimie	MOYENNE (21–90)	Conception de catalyseurs et d'enzymes : 20–50‡ 1–40* Production chimique : 20–40†
Fabrication	MOYENNE (20–30)	Conception de matériaux : 20–30‡
Énergie	FAIBLE (10–30)	Conversion au solaire : 10–30‡
Automobile	FAIBLE (10–35)	Véhicules automatisés/IA : 0–10‡ Automobile, général : 10–25†
Télécommunications	FAIBLE (1–20)	Optimisation du réseau : 1–20*

Sources : QDNL (2020); Biondi *et al.* (2021); Bobier *et al.* (2021)

* QDNL (2020)

† Biondi et *al.* (2021)

‡ Bobier et *al.* (2021)

3

Environnement des technologies quantiques

Constatations du chapitre

- La recherche quantique canadienne est abondante et bénéficie d'une forte collaboration internationale et industrielle, mais d'autres pays ont commencé à rattraper leur retard et à dépasser le Canada en ce qui concerne les résultats.
- Le Canada est, après les États-Unis, le pays qui compte le plus grand nombre d'entreprises de technologie quantique, mais les inventeurs y déposent moins de demandes de protection de la propriété intellectuelle.
- Au Canada, les entreprises quantiques sont regroupées autour de plusieurs pôles d'activité universitaire et industrielle d'où le Canada atlantique et les territoires sont largement absents.
- Le Canada dispose d'une variété de programmes axés sur l'offre afin de soutenir le développement des technologies quantiques, mais très peu sont tournés vers la demande.
- La chaîne de valeur des technologies quantiques est complexe et internationale, et comporte plusieurs maillons extrêmement précaires.

Les investissements précoces et la formation des talents en recherche quantique ont donné au Canada une solide base en vue de la deuxième révolution quantique; cependant, en raison de sa population et de son budget de recherche relativement faibles, il existe un risque que le pays perde son avantage initial au profit de la Chine, des États-Unis et de l'Union européenne (Dunlop, 2019; ISDE, 2022d). Dans un rapport sur l'élaboration d'une stratégie quantique nationale, l'évolution de l'écosystème quantique national est décrite comme le produit d'un « environnement de politiques publiques canadien relativement neutre », d'un leadership et d'une philanthropie privés, de la performance des établissements et des chercheurs et de la capacité des entreprises en démarrage à développer leurs propres marchés (Dunlop, 2019). Par conséquent, le tout jeune écosystème quantique du Canada s'est transformé en un réseau petit, mais interdisciplinaire, composé d'organisations industrielles, de centres de recherche et d'accélérateurs et d'incubateurs d'entreprises (Dunlop, 2019).

La chaîne de valeur des technologies quantiques y dépend fortement de partenariats internationaux, bien que cette situation ne soit toutefois pas propre au Canada; plusieurs des matériaux et composants nécessaires ne peuvent être obtenus qu'auprès d'une poignée de fournisseurs étrangers. Ce chapitre met en évidence les dépendances internationales du Canada et cerne les domaines de la chaîne de valeur dans lesquels le Canada pourrait être en mesure d'émerger en tant que leader mondial.

3.1 Activité quantique au Canada

L'environnement quantique du Canada est composé d'un éventail d'organisations et d'institutions regroupant universités, entreprises en démarrage, entreprises compétitives à l'échelle mondiale et réseaux et consortiums industriels. Bien que le Canada dispose d'un écosystème de recherche et de création d'entreprises actif et dynamique, la concurrence internationale croissante commence à menacer sa position mondiale. De même, les entreprises canadiennes sont à la traîne en ce qui concerne la protection de la propriété intellectuelle, ce qui pourrait être révélateur de futures difficultés de commercialisation et d'adoption des technologies. D'autres problèmes concernant l'adoption technologique peuvent découler des pôles d'expertise localisés du Canada, qui excluent largement les provinces de l'Atlantique et les territoires. Cependant, les organisations canadiennes disposent d'un vaste réseau international de partenariats et de collaborations, qui pourrait les aider de diverses manières, qu'il s'agisse d'attirer des talents ou de mettre les entreprises en contact avec de futurs marchés plus vastes.

3.1.1 Activité de la recherche

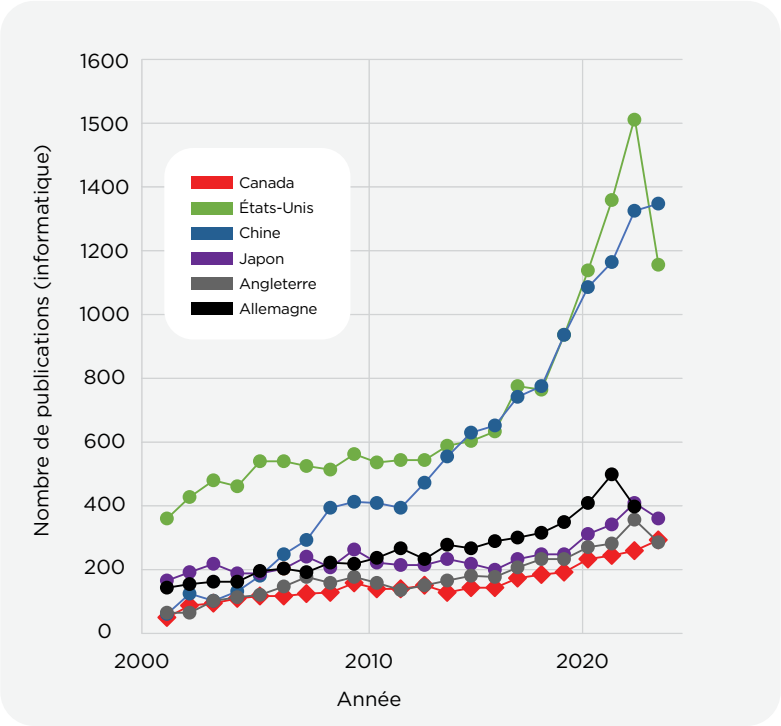
Les technologies quantiques se développent lentement depuis des décennies et commencent maintenant à émerger comme des produits et services générateurs de valeur. Cependant, il reste d'importantes barrières à surmonter, souvent en recherche fondamentale.

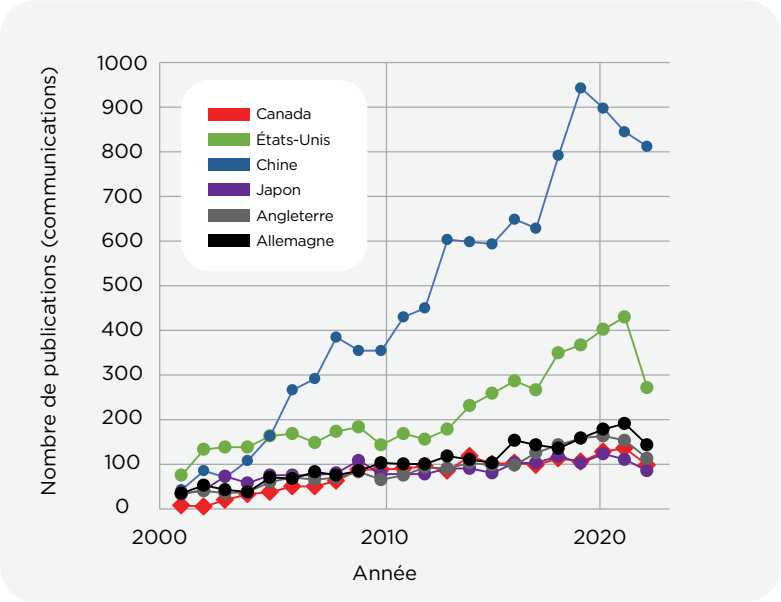
Le Canada risque d'être éclipsé par les programmes de recherche quantique d'autres pays

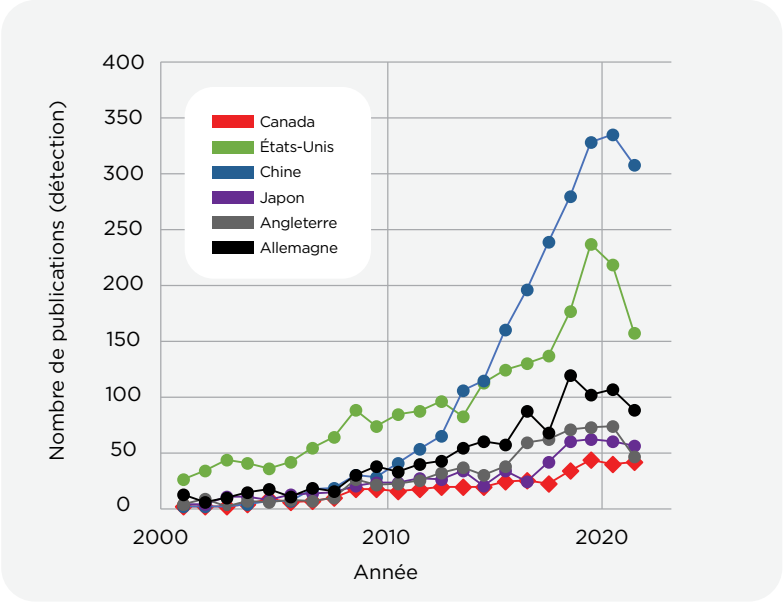
Le Canada est souvent décrit comme un chef de file mondial de la recherche quantique, mais cela ne se reflète pas nécessairement dans le nombre de publications et d'articles de conférence sur le sujet produits entre 2001 et 2022[5]. La figure 3.1 illustre le nombre de publications durant cette période dans plusieurs grands pays contribuant à la recherche quantique, réparties entre l'informatique quantique, les communications et la détection. Le Canada se classe généralement dans la moitié inférieure au nombre total de publications dans chacun de ces domaines, derrière la Chine, l'Allemagne, le Japon, l'Angleterre[6] et les États-Unis dans la plupart des cas. Durant la période considérée, le Canada a enregistré une croissance constante, quoique modeste, de ce nombre, mais d'autres pays, comme la Chine, l'Allemagne et les États-Unis, ont connu une croissance beaucoup plus rapide (sauf durant la période 2020–2022, qui a généralement été marquée par une baisse de la production de recherche).

5 Cette analyse a été réalisée à l'aide de l'index des citations Web of Science Core Collection et suit la méthode et les mots-clés décrits dans Parker *et al.* (2022), qui sont expliqués à l'annexe C.

6 Les affiliations à Web of Science distinguent l'Angleterre du Pays de Galles, de l'Écosse et de l'Irlande du Nord.


1600
1500
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
Nombre de publications (informatique)
Canada
États-Unis
Chine
Japon
Angleterre
Allemagne
2000
2010
2020
Année


1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Nombre de publications (communications)
Canada
États-Unis
Chine
Japon
Angleterre
Allemagne
2000
2010
2020
Année



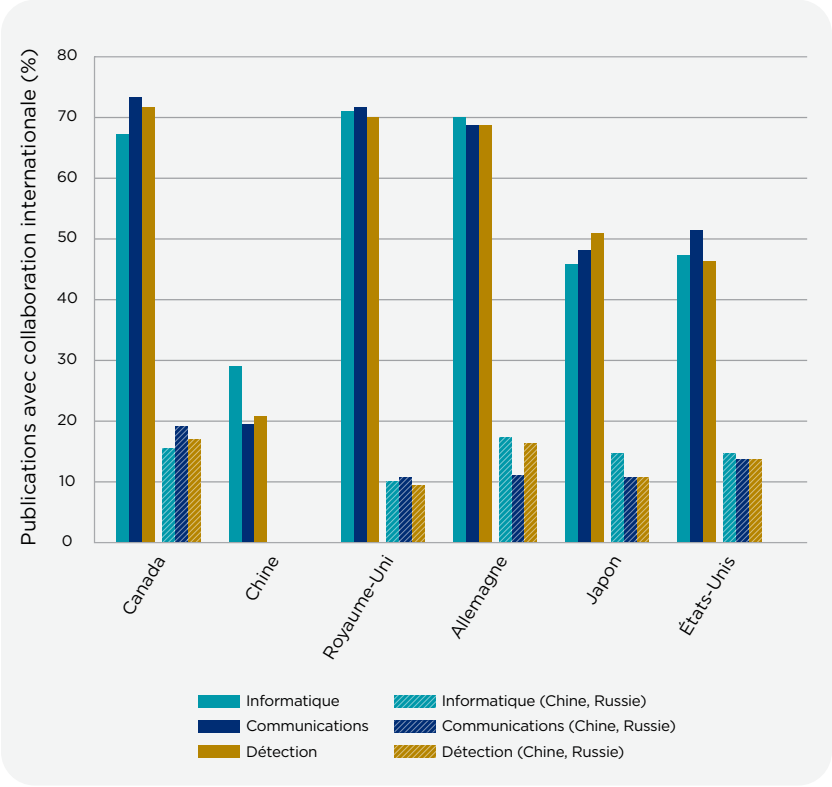
Source des données : Clarivate (s.d.)

Figure 3.1 Publications et actes de conférence quantiques publiés entre 2001 et 2022

Le Canada est à la traîne des autres pays en ce qui concerne la recherche sur les communications et la détection quantiques, mais il enregistre une croissance plus importante en informatique quantique. Données basées sur les données recueillies à partir de l'analyse de Web of Science (annexe C).

Jusqu'en 2018, les chercheurs au Canada avaient cosigné une grande proportion des publications dans les communications quantiques, le Canada demeurant généralement dans les cinq premiers pays à ce titre. Après 2018, leurs contributions à la recherche la plus citée en matière de communications sont passées au-dessous de celles de chercheurs de plusieurs pays européens. Par rapport aux autres domaines de recherche, les pays produisant des publications très citées en détection quantique varient énormément. La Chine, l'Allemagne et les États-Unis ont toujours été parmi les plus grands contributeurs, mais à cause du nombre relativement faible de publications annuelles dans le domaine (généralement autour de 10 % de l'ensemble des résultats de la recherche quantique), de petites variations dans le nombre absolu de publications peuvent influencer de manière significative le classement d'un pays. Il est intéressant de noter que si les résultats de la recherche universitaire sur la détection sont faibles, l'activité en matière de brevets liée aux capteurs quantiques est importante (Aboy *et al.*, 2022).

À titre des publications quantiques universitaires, le Canada affiche l'un des taux de collaboration internationale les plus élevés, qui est comparable à celui de certains pays de l'Union européenne. La figure 3.2 présente le taux de collaboration internationale — défini par les publications et les articles de conférence — qui comprenait au moins un coauteur étranger. De plus, le Canada affiche aussi l'un des taux de collaboration avec la Chine et la Russie les plus importants, en particulier dans le domaine des communications et de la détection. Ces données peuvent être le reflet de la taille relativement petite et des budgets de recherche modestes du Canada par rapport à des pays comme la Chine et les États-Unis, ainsi que du coût parfois prohibitif de l'équipement nécessaire à certains projets.



Source des données : Clarivate (s.d.)

Figure 3.2 Publications et actes de conférence quantiques comprenant des coauteurs étrangers entre 2011 et 2022

La deuxième série de barres indique la collaboration avec des coauteurs affiliés à des établissements en Chine ou en Russie.

La collaboration internationale active procure de nombreux avantages, tels que le partage des coûts de la recherche, un meilleur accès à l'expertise, davantage d'occasions pour les étudiants du Canada de se former à l'étranger, l'attraction d'étudiants étrangers au pays et le renforcement potentiel des chaînes d'approvisionnement canadiennes. Le tableau 3.1 classe les pays avec lesquels les chercheurs du Canada collaborent en fonction du nombre d'articles de recherche cosignés. Les États-Unis sont le collaborateur de recherche le plus actif du Canada dans tous les domaines quantiques, suivis de Chine. L'Australie, l'Angleterre et l'Allemagne complètent le groupe des cinq premiers, échangeant leurs positions en fonction du champ.

Tableau 3.1 Classement des pays avec lesquels le Canada est le plus actif en matière de collaboration universitaire quantique

Rang	Pays	Publications partagées (2001–2022)
1	États-Unis	1 566
2	Chine	594
3	Allemagne	523
4	Angleterre	415
5	Australie	326
6	Japon	288
7	France	221
8	Italie	198

Source des données : Clarivate (s.d.)

Les collaborations internationales présentent également des défis, en particulier si un projet offre un potentiel commercial. La mise sur le marché de produits quantiques ou l'obtention de la protection de la propriété intellectuelle peut être compliquée lorsqu'il y a des intervenants internationaux (INDU, 2022b). En outre, le Service canadien de renseignement de sécurité (SCRS) a averti les chercheurs et les entreprises du Canada que l'établissement de collaborations internationales pouvait présenter des risques en matière de renseignement et de sécurité, ou inclure des pratiques économiques susceptibles de désavantager les collaborateurs situés au Canada (p. ex. la Chine n'a pas les mêmes lois que le Canada en ce qui concerne la propriété intellectuelle et la propriété des actions, ce qui peut conduire à des accords commerciaux pouvant désavantager les détenteurs de propriété

intellectuelle au Canada). Le SCRS a déclaré que la collaboration avec des pays dont les pratiques gouvernementales sont peu transparentes, comme la Chine et la Russie, pouvait être risquée et devait être abordée avec prudence (SCRS, 2018).

En 2023, le gouvernement du Canada a annoncé qu'il ne financerait plus les demandes de subvention si un chercheur du projet était affilié à une université, à un institut de recherche ou à un laboratoire ayant des liens avec des organisations militaires, de défense nationale ou de sécurité de l'État qui menacent la sécurité nationale, en faisant spécifiquement référence aux centres chinois (Fife et Chase, 2023). Cette annonce souligne toutefois que les universités relèvent de la compétence des provinces et des territoires et encourage ces derniers à adopter des politiques similaires.

La répartition des publications canadiennes révèle des pôles d'expertise en Colombie-Britannique, en Alberta, en Ontario et au Québec

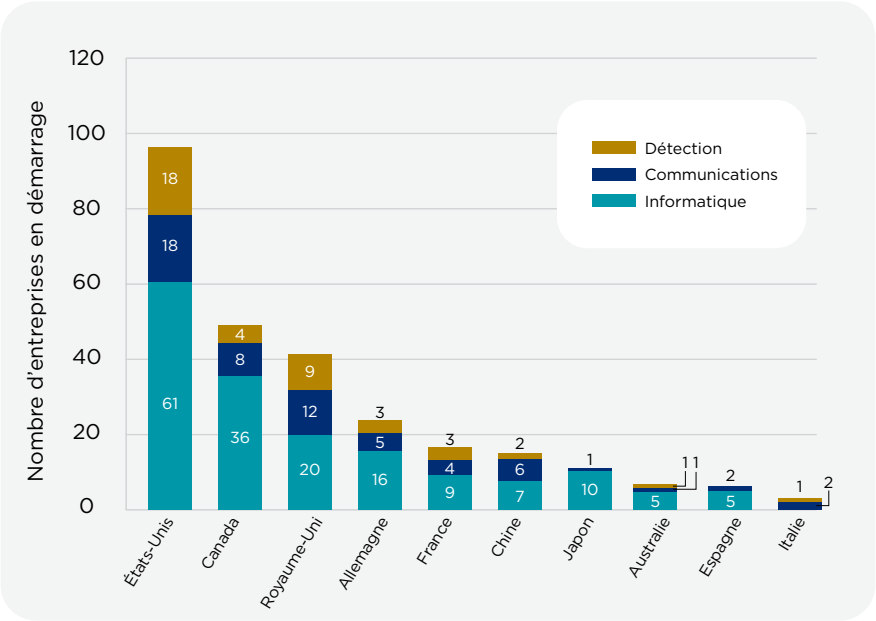
Les centres de recherche canadiens sont répartis sur une vaste zone géographique et bien qu'il n'existe pas de centre d'innovation unique, des pôles d'expertise quantique se sont développés dans plusieurs endroits du pays (ils sont examinés plus en profondeur à la section 3.1.3). Ces pôles se caractérisent par un grand nombre de PME, d'entreprises de soutien aux entreprises en démarrage, d'instituts de recherche et de réseaux industriels, ainsi que de publications. Sur les 4 669 publications quantiques parues au Canada entre 2011 et 2020, 3 031 sont attribuables à des auteurs de l'Ontario, 759 du Québec, 589 de la Colombie-Britannique et 455 de l'Alberta.

3.1.2 Activité commerciale

Le Canada est le deuxième pays au monde pour le nombre de PME quantiques

Le Canada abrite un grand nombre de PME quantiques. Une analyse du nombre d'entreprises en démarrage de ce domaine dans le monde a révélé qu'il se classait au deuxième rang, derrière les États-Unis (Seskir *et al.*, 2022) (figure 3.3). Le même rapport montre que l'industrie quantique canadienne est composée exclusivement de PME et qu'elle est fortement axée sur l'informatique (elle occupe le deuxième rang mondial). Bien que la plupart des entreprises en soient aux premiers stades du démarrage, plusieurs d'entre elles, dont D-Wave et Xanadu, sont concurrentielles à l'échelle mondiale; toutefois, elles comptent beaucoup moins de 500 personnes et sont donc toujours considérées comme des PME. L'Angleterre se classe au troisième rang pour le nombre total d'entreprises en démarrage quantiques, mais dépasse le Canada pour le nombre d'entreprises spécialisées dans les communications et les capteurs (Seskir *et al.*, 2022). Les entreprises

chinoises sont remarquablement absentes, ce qui peut s'expliquer en partie par le fait que l'étude utilise exclusivement des données accessibles en anglais.



Source des données : GACG (2021a); Seskir *et al.* (2022).

Figure 3.3 Entreprises en démarrage par technologie et par pays

Les entreprises informatiques représentent le type d'entreprise en démarrage quantique le plus répandu dans presque tous les pays étudiés

Selon Seskir *et al.* (2022), la plupart des pays comptent un plus grand nombre d'entreprises en démarrage dans le domaine de l'informatique quantique que dans celui des communications ou de la détection quantiques. Cela peut en partie être dû aux critères de collecte des données, qui n'incluaient que les entreprises lancées en tant qu'entreprises de technologie quantique et non celles qui se sont réorientées vers ces technologies. Ces critères excluaient les entreprises établies (p. ex. IBM, Google ou Microsoft) qui ont entrepris de mettre au point leurs propres outils quantiques. Cela peut expliquer le faible nombre d'entreprises spécialisées dans les capteurs, qui sont généralement considérés comme plus proches de la maturité commerciale et, dans certains cas, ont des applications plus directes pour les industries qui les adoptent, ce qui en fait un investissement en R-D moins spéculatif pour les entreprises établies qui souhaitent concevoir leurs propres outils technologiques (Seskir *et al.*, 2022).

Les entités canadiennes détiennent relativement peu de brevets par rapport à celles d'autres pays

La protection de la propriété intellectuelle est un autre indicateur de la mobilisation du Canada sur le marché des technologies quantiques. Le tableau 3.2 montre la part mondiale des brevets quantiques détenus par les entreprises, en fonction de l'emplacement du siège social. Il révèle que bien qu'elle ne compte pas beaucoup d'entreprises en démarrage, la Chine a accumulé un important portefeuille de propriété intellectuelle, ce qui pourrait indiquer que ses entreprises sont particulièrement actives. Inversement, les entités canadiennes possèdent beaucoup moins de brevets, ce qui pourrait être interprété comme une faiblesse dans leur stratégie quantique. Le comité d'experts note que si les brevets peuvent avoir une certaine utilité en tant qu'indicateur de l'innovation, les pratiques en matière de propriété intellectuelle peuvent varier considérablement d'une technologie à l'autre. Les technologies quantiques et autres technologies perturbatrices peuvent être massivement protégées par le secret commercial. Il convient donc de faire preuve de prudence avant de tirer des conclusions des données suivantes sur les brevets.

Tableau 3.2 Part des brevets relatifs aux technologies quantiques par emplacement du siège social, 2000–2021

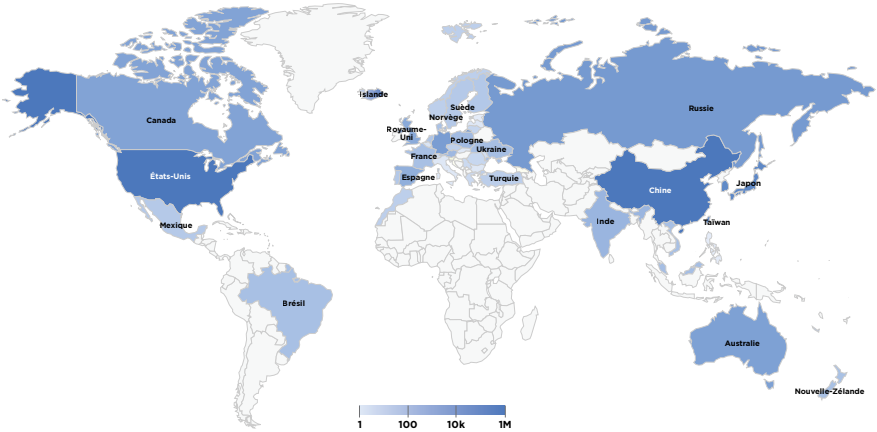
Pays	Total (%)	Informatique (%)	Communications (%)	Détection (%)
Canada	0,8	0,6	1,6	0,0
Chine	53,8	54,1	46,2	59,7
Union européenne	11,2	11,5	10	14,8
Japon	15,2	15,4	18,4	14,8
Russie	0,6	0,6	0,6	0,0
Royaume-Uni	1,2	1,0	3,4	0,0
États-Unis	10	9,6	6,5	4,5

Source des données : Masiowski *et al.* (2022)

Fait important, seulement 50 % des demandes de brevet révèlent l'emplacement du siège social de l'entreprise. Par conséquent, ce tableau ne représente que la moitié des dépôts de demande de brevet.

Ce sont la Chine et les États-Unis qui délivrent le plus grand nombre de brevets quantiques dans le monde

Si les données du tableau 3.2 portent à croire que la Chine dépasse tous les autres pays en ce qui concerne les dépôts de demande de brevet, il est important de noter que tous les brevets ne sont pas déposés sur les mêmes marchés ou dans les mêmes bureaux. Une autre étude sur la situation en matière de brevets dans le domaine des technologies quantiques révèle que ce sont la Chine et les États-Unis qui ont délivré le plus grand nombre de brevets entre 2001 et 2022, ce qui laisse supposer que ces pays sont des marchés très actifs pour ces technologies (Aboy *et al.*, 2022) (figure 3.4).



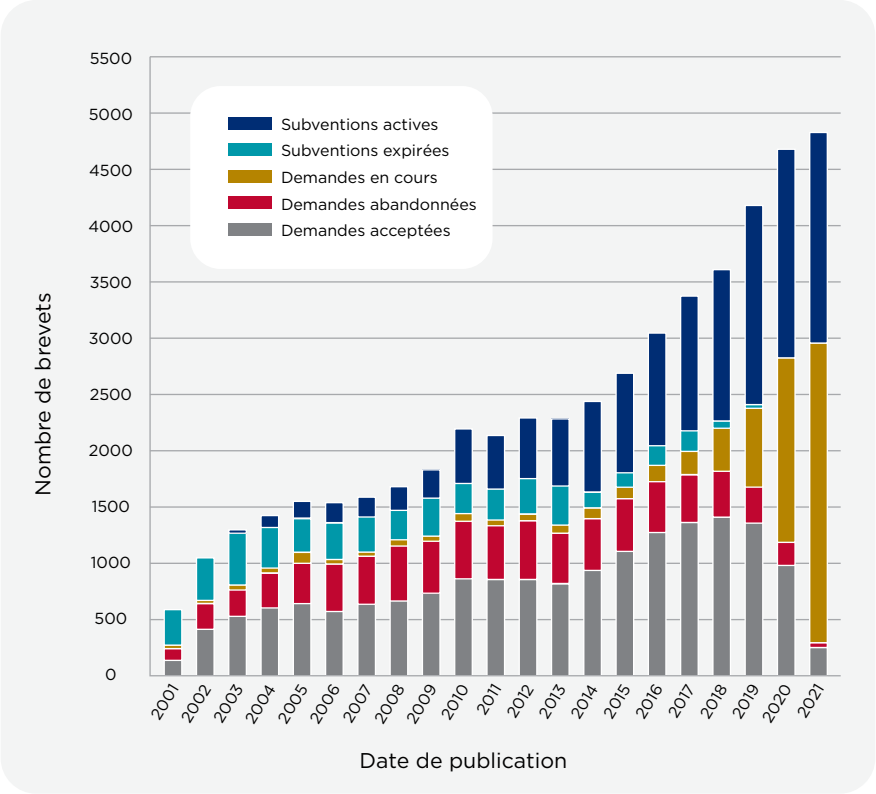
Source : Aboy *et al.* (2022)

Figure 3.4 Carte de densité des pays délivrant des brevets sur les technologies quantiques

Pays délivrant le plus grand nombre de brevets sur les technologies quantiques (ID de recherche : S2), par Mateo Aboy, Timo Minssen et Mauritz Kop, avec la permission de Springer Nature sous licence CCA BY 4.0.

Si on limite l'étendue des brevets à ceux accordés par l'United States Patent and Trademark (USPTO) aux États-Unis et par l'Office européen des brevets (OEB) entre 2001 et 2022[7] (soit un total de 20 583), le nombre de brevets liés au domaine quantique a considérablement augmenté depuis 2001 (Aboy *et al.*, 2022) (figure 3.5). La croissance la plus importante est survenue (i) entre 2001 et 2003 et (ii) depuis 2014. On estime que l'USPTO et l'OEB délivrent à eux deux environ 2 000 brevets sur les technologies quantiques par an, et en a délivré près de 50 % (10 318) depuis 2015.

7 Les critères de recherche ont permis d'isoler les brevets dont le titre, le résumé ou la revendication contenait des mots-clés relatifs aux technologies quantiques. Pour en savoir plus, se reporter à l'annexe D.



Source : Aboy *et al.* (2022)

Figure 3.5 Brevetage des technologies quantiques, 2001–2021 (USPTO et OEB)

Brevetage annuel des technologies quantiques à l'USPTO et à l'OEB (ID de recherche : S2) et statut juridique par date de publication du document de brevet, par Mateo Aboy, Timo Minssen et Mauritz Kop, avec la permission de Springer Nature sous licence CCA BY 4.0.

L'analyse d'Aboy *et al.* (2022) constate qu'entre 2001 et 2022, la majorité des brevets concernaient les dispositifs, suivis par les nanostructures et l'optique. D'autres technologies ont fait l'objet d'un nombre beaucoup plus faible de brevets et sont résumées dans le tableau 3.3. L'étude révèle notamment que les brevets relatifs aux « circuits quantiques » étaient les plus répandus entre 2001 et 2022. Entre 2001 et 2013, les revendications concernant les communications constituaient le deuxième nombre de brevets en importance. Toutefois, après 2013, les demandes reliées à l'informatique quantique ont pris le pas sur les demandes portant sur les communications. Aboy *et al.* (2022) notent également que les

brevets dont les revendications concernant les « algorithmes » sont minoritaires, même si leur nombre a également augmenté depuis 2016.

Tableau 3.3 Brevetage par catégorie technologique, 2001–2022 (USPTO et OEB)

Catégorie*	Sujet	Demandes de brevet	Brevets délivrés
Détection	Appareils	14 243	8 965
	Nanostructures/ optique	4 917	3 282
Informatique	Traitement de l'information	3 331	2 057
	Informatique	3 042	1 603
Communications	Cryptographie	1 219	736
	Communications	1 057	632

Source des données : Aboy *et al.* (2022)

*La répartition en catégories est approximative, car les brevets relatifs à un sujet donné peuvent appartenir à plusieurs catégories et sont décrits plus en détail à l'annexe D.

Aboy *et al.* (2022) ont également recensé les principaux cessionnaires de brevets au cours des 20 dernières années (à noter qu'il est courant que l'inventeur cède à son employeur les droits de propriété intellectuelle qu'il a acquis dans le cadre de son travail). L'annexe D présente un résumé de certains des cessionnaires les plus importants, ainsi que des entités canadiennes les plus actives, dont trois seulement (D-Wave, 1QBit et Quantum Valley Investments) sont dans les 50 premières. L'étude souligne que le paysage de la propriété intellectuelle quantique regroupe un plus grand nombre d'entités que l'informatique classique, les semiconducteurs et les télécommunications.

3.1.3 Pôles d'expertise et réseaux de technologie quantique

L'expertise en technologie quantique est inégalement répartie au Canada

Dans la section 3.1.1, nous avons montré que la recherche quantique émane de plusieurs pôles au Canada; la Colombie-Britannique, l'Alberta, l'Ontario et le Québec ont tous les quatre développés des écosystèmes florissants, et ces pôles sont quelque peu différenciés par spécialité. Cependant, cela signifie également

que certaines régions ne sont pas aussi bien représentées. Par exemple, le Canada atlantique et les territoires sont largement absents de la *Stratégie quantique nationale* (SQN), en particulier de la section sur le développement régional du pilier de la commercialisation (voir ISDE, 2023d). Les conséquences d'une répartition inégale de l'expertise quantique sont examinées au chapitre 4.

Les pôles nationaux et régionaux de recherche sur les technologies quantiques au Canada tentent de faciliter la collaboration entre les chercheurs, les partenaires industriels et les parties prenantes gouvernementales afin d'améliorer la conception et la commercialisation des technologies quantiques. Idéalement, ces pôles et réseaux peuvent contribuer à établir une filière de talents qui rapproche les étudiants et l'industrie et soutient l'écosystème d'innovation du Canada. Certains des programmes étudiés ci-dessous sont des pôles géographiques, tandis que d'autres cherchent à mettre en relation des entités universitaires, industrielles et gouvernementales dans tout le pays.

La **Colombie-Britannique** possède une communauté quantique très collaborative, les universités y menant des recherches dans divers domaines, tels que l'informatique, les communications et les matériaux quantiques (S. Simmons, communication personnelle, 2023). Le Stewart Blusson Quantum Matter Institute, à l'Université de la Colombie-Britannique (UBC, s.d.), et les 4D Labs de l'Université Simon Fraser (SFU, s.d.) offrent des centres d'essai, de fabrication et de prototypage aux chercheurs et aux entreprises qui conçoivent des matériaux, des circuits et des dispositifs quantiques. Quantum BC, une initiative conjointe de trois grandes universités de recherche, « vise à stimuler et à enrichir les efforts de collaboration dans les domaines de la recherche, de la formation et de l'innovation en informatique quantique » (Quantum BC, 2022). Par l'intermédiaire du Programme de formation orientée vers la nouveauté, la collaboration et l'expérience en recherche (FONCER) du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), elle offre aux étudiants de cycle supérieur une expérience de formation unique sur le matériel et les logiciels quantiques, en partie par le biais de stages chez des partenaires industriels (Quantum BC, s.d.). Collectivement, neuf entreprises quantiques emploient plus de 500 personnes, reçoivent plus de 270 millions de dollars de financement et détiennent plus de 404 brevets (Mantha et Turner, 2023). Parmi celles-ci, citons D-Wave, 1QBit, Good Chemistry et Photonic Inc. Le Quantum Algorithms Institute (QAI) met en relation le milieu universitaire et l'industrie et favorise la croissance de l'écosystème d'informatique quantique de la province (Wong, 2021). Il appuie des initiatives pratiques visant à accroître la connaissance de la science quantique, à former la main-d'œuvre quantique et à informer les nouveaux clients sur les solutions quantiques permettant de résoudre leurs défis commerciaux.

L'**Alberta** est un lieu de recherche, de développement et de commercialisation dans le domaine quantique depuis 20 ans, et a connu des avancées quantiques majeures et vu des investissements totalisant plus de 30 millions de dollars (FCI, 2023). Sa position est renforcée par des domaines synergiques, tels que la nanotechnologie et l'IA. L'Université de l'Alberta, l'Université de Calgary et l'Université de Lethbridge collaborent depuis 2015 dans le cadre de Quantum Alberta, un consortium d'experts universitaires et industriels constitué pour promouvoir la R-D et la commercialisation des sciences et technologies quantiques dans la province (Quantum Alberta, 2022). Les entreprises dérivées, telles que Quantized Technologies Inc., Quantum Silicon Inc. et Zero Point Cryogenics, sont issues d'une culture d'entreprises en démarrage quantiques naissante et en plein essor. En 2022, Quantum City — une initiative issue d'un partenariat entre l'Université de Calgary, le gouvernement de l'Alberta et l'entreprise technologique de pointe Mphasis — a été fondée avec l'aide de plus de 100 millions de dollars d'investissements privés et publics (UofC, 2022). Quantum City est un pôle mondial d'application du savoir quantique, qui rassemble des chercheurs, des entreprises quantiques et des adopteurs précoces de technologies et de services quantiques. Elle investit dans 15 nouveaux postes de professeur en technologie quantique à l'Université de Calgary, ainsi que dans des programmes de formation et de perfectionnement (p. ex. dans la maîtrise en informatique quantique ou dans le projet Innovators for Quantum Computing Deployment du programme FONCER du CRSNG), en collaboration avec l'Université de Sherbrooke, un centre de fabrication et de caractérisation quantiques (qLab) et un pôle d'incubation et de collision d'idées (qHub) (B.C. Sanders, communication personnelle, 2023).

En **Ontario**, un écosystème composé de la ville de Waterloo et du Quantum Valley Hub a vu le jour en 2001. Il rassemble plus d'une douzaine d'organisations et d'entreprises en démarrage du domaine de la physique fondamentale, de la mise en œuvre expérimentale, du génie des dispositifs et du capital de risque (TQT, s.d.-a, s.d.-b), dont l'Institut Perimeter, un organisme sans but lucratif axé sur la physique fondamentale, l'Institut d'informatique quantique, qui vise à développer la science et la technologie de l'information quantique, le Quantum-Nano Fabrication and Characterization Facility, qui se spécialise dans la construction de dispositifs quantiques, un projet du Fonds d'excellence en recherche Apogée Canada, qui se focalise sur la santé quantique, le Quantum Valley Ideas Lab et Quantum Valley Investments, un fonds de capital de risque de 100 millions de dollars (R. Laflamme, communication personnelle, 2023). Parmi les entreprises en démarrage figurent ISARA Corporation, High Q Technologies, Single Quantum, Universal Quantum Devices, Aegis Quantum et Quantum Benchmark. La Quantum Valley a été fondée dans le cadre d'un partenariat public-privé (PPP) et a bénéficié

du soutien constant et affirmé du gouvernement du Canada, du gouvernement de l'Ontario, de philanthropes (en particulier de Mike et Ophelia Lazaridis et de Douglas Fregin) et de l'aide de l'Université de Waterloo. Plus d'un milliard de dollars ont été investis à ce jour. L'écosystème tire profit de la forte base d'innovation et de la culture entrepreneuriale de Waterloo, de son bassin de talents, de son infrastructure de R-D unique et de son solide réseau de collaborateurs, pour former une communauté partageant la même vision de l'avenir quantique.

Au **Québec**, la Zone d'innovation en sciences quantiques et applications technologiques, formée autour de l'Université de Sherbrooke, représente des investissements de plus de 435 millions de dollars dans la région, dont 131 millions d'origine publique (C. Sarra-Bournet, communication personnelle, 2023). Des entreprises telles que 1QBit, Bell, IBM, PASQAL et Eidos-Sherbrooke se sont également engagées à investir 270 millions de dollars sur cinq ans. Il est à noter que le programme Accélérateur de découvertes Québec-IBM participe à l'installation d'un ordinateur quantique IBM de 127 qubits en collaboration avec la Plateforme d'Innovation Numérique et Quantique (PINQ^2) aux installations IBM de Bromont (PINQ^2, 2023). Sherbrooke abrite également des entreprises dérivées d'universités canadiennes, comme Nord Quantique, SBQuantum et Qubic Technologies. Les capacités de l'infrastructure de R-D du pôle sont fournies par la Chaîne d'innovation intégrée (CII), menée par l'Institut quantique (IQ), l'Institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT) et le Centre de collaboration MiQro Innovation (C2MI), qui fait le pont entre la recherche universitaire et la conception de nouveaux produits transférés à l'industrie (Québec Quantique, s.d.; Université de Sherbrooke, s.d.). Depuis 2010, la CII a bénéficié de plus d'un milliard de dollars d'investissements, dont plus de 60 % provenant de partenaires industriels. Cet écosystème fait partie d'un corridor des semiconducteurs qui a récemment fait l'objet d'un protocole d'entente entre les États-Unis et le Canada lié à la *CHIPS and Science Act* (Platt, 2023) (encadré 5.5).

On manque de données au sujet des mesures du transfert concernant les technologies quantiques

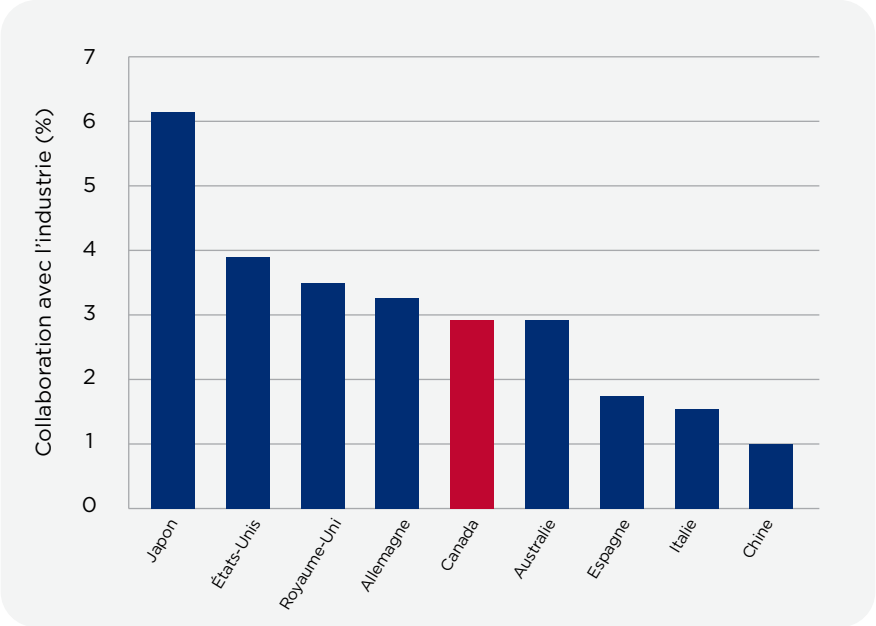
Le transfert de technologie est une étape cruciale de la conversion de la recherche universitaire en technologie commercialisable, mais les pratiques exemplaires sont difficiles à déterminer et à mettre en œuvre pour diverses raisons. Le transfert de technologie peut se faire de plusieurs façons, notamment par la vente ou l'octroi de licences de propriété intellectuelle à des partenaires industriels, par la création d'entreprises par des chercheurs universitaires et par le transfert du milieu universitaire vers l'industrie de personnel possédant des compétences correspondantes et nouvelles (Chambre des communes, 2017). Certains

paramètres de ces méthodes sont directement liés au transfert de technologie (p. ex. la propriété intellectuelle accordée ou les entreprises issues d'établissements universitaires), mais d'autres, tels que l'embauche de chercheurs qualifiés, peuvent être difficiles à quantifier ou ne font pas l'objet d'un suivi constant. En outre, si certains de ces paramètres peuvent être suivis, il n'est pas évident de les évaluer, surtout entre différentes disciplines et technologies.

Il est également difficile de démontrer de manière concluante que les bureaux de transfert de technologie (BTT) ont facilité le développement ou l'adoption de technologies, ou que les modèles utilisés dans les universités sont bien adaptés à l'industrie (Baglieri *et al.*, 2018; Belitski *et al.*, 2019; Lee et Jung, 2021). La plupart des établissements d'enseignement postsecondaire au Canada recourent à des BTT pour faciliter et suivre les interactions entre leurs chercheurs et leurs partenaires industriels, mais le suivi n'est pas obligatoire ou cohérent d'une université à l'autre (Sigurdson *et al.*, 2015).

Si l'on tient compte de tous les sujets, y compris la science quantique, la plupart des collèges et universités à forte intensité de recherche aux États-Unis ont accès à davantage de ressources que les universités canadiennes, et ils dépensent beaucoup plus en recherche (AUTM, 2022a, 2022b). Par conséquent, leurs indicateurs de transfert de technologie (p. ex. le nombre total de licences, le revenu brut des licences, le nombre de brevets délivrés et le nombre d'entreprises en démarrage créées) sont systématiquement plus élevés. Toutefois, les universités canadiennes semblent créer plus d'entreprises en démarrage par 100 millions de dollars consacrés à la recherche (annexe E). Cela dit, les établissements américains sont plus efficaces pour produire d'autres formes de propriété intellectuelle et de valeur — acquisition et divulgation de propriété intellectuelle par 100 millions de dollars consacrés à la recherche, par exemple. Des différences sont également évidentes entre les universités canadiennes, ce qui peut être le résultat des différences d'approches des BTT et des politiques de chaque établissement en matière de propriété intellectuelle. Il est toutefois important de rappeler que ces données incluent tous les domaines de recherche, et pas seulement les technologies quantiques (Chambre des communes, 2017).

Une autre mesure susceptible d'aider à quantifier le transfert de technologie entre le milieu universitaire et l'industrie est le pourcentage d'articles de revues ayant au moins un coauteur industriel. La figure 3.6 révèle que le Canada affiche un taux de collaboration supérieur à celui de l'Australie, de l'Espagne, de l'Italie et de la Chine, mais inférieur à celui d'autres pays comparables (UofT, 2023).



Source des données : UofT (2023)

Figure 3.6 Collaboration avec l'industrie dans la recherche quantique, par pays

Ce type de collaboration peut être plus généralement déterminée entre les différents secteurs institutionnels sous forme de *collaboration intersectorielle* (nombre et taux)[8]. Une étude s'appuyant sur cette définition a constaté qu'entre 2011 et 2020, le taux de collaboration intersectorielle total pour les publications quantiques était de 19 % (hausse de 17 % entre 2011 et 2015 à 22 % entre 2016 et 2020) (Robitaille *et al.*, 2022). Il s'agit d'un taux supérieur à celui des mathématiques (3 %), de la chimie (10 %), du génie (11 %) et de la physique (15 %), mais inférieur à celui de la biologie (24 %), de la recherche biomédicale (30 %) et de la médecine clinique (40 %). L'étude a également révélé que si les établissements postsecondaires étaient les principaux contributeurs de la recherche sur les technologies quantiques (88 %), les « autres » secteurs (principalement composés d'organismes sans but lucratif) en constituaient 22 %. Ce taux peut être comparé à l'activité des « autres » secteurs dans d'autres

8 Une publication est définie comme une *collaboration intersectorielle* lorsque les auteurs indiquent des adresses correspondant à au moins deux secteurs différents (p. ex. un chercheur universitaire peut cosigner une publication avec un chercheur de l'industrie ou du gouvernement). Le taux correspond au nombre de collaborations intersectorielles divisé par le nombre total de publications attribuées à chaque entité (Robitaille *et al.*, 2022).

disciplines des sciences naturelles et du génie, où ils n'ont contribué qu'à 4 % des publications. Robitaille *et al.* (2022) attribuent cette grande différence à l'activité de recherche de l'Institut Perimeter et à la recherche soutenue par le CIFAR, qui ont produit respectivement 678 et 354 publications au cours de cette période. Le tableau 3.4 présente une ventilation détaillée des collaborations intersectorielles entre 2016 et 2020.

Tableau 3.4 Matrice de la collaboration intersectorielle pour les publications canadiennes sur la technologie quantique, 2016–2020

Secteur 2 / Secteur 1	Gouvernement fédéral	Hôpitaux	Industrie	Post-secondaire	Gouvernement provincial/ territorial	Autres
Gouvernement fédéral		0,9 %	4,5 %	73,6 %	0,0 %	10,0 %
Hôpitaux	5,3 %		0,0 %	89,5 %	5,3 %	10,5 %
Industrie	5,3 %	0,0 %		38,4 %	0,0 %	10,6 %
Post-secondaire	5,3 %	0,8 %	2,7 %		0,2 %	18,8 %
Gouvernement provincial/ territorial	5,3 %	25,0 %	0,0 %	100,0 %		0,0 %
Autres	5,3 %	0,3 %	2,7 %	67,9 %	0,0 %	

Source des données : Robitaille *et al.* (2022)

Le Canada dispose d'une solide liste d'entreprises, de bailleurs de fonds privés et de réseaux industriels qui peuvent aider les entreprises en démarrage dans le domaine des technologies quantiques

Si les BTT agissent souvent comme facilitateurs entre les universités et l'industrie, les entreprises intermédiaires peuvent également favoriser l'adoption de nouvelles technologies (Miller, 2022). Ces entreprises peuvent aider les entreprises en démarrage à décoller, les mettre en contact avec des marchés plus importants et, d'une manière générale, faciliter l'établissement de liens entre les organisations au sein d'un écosystème d'innovation, et servir de médiatrices. Parmi les services offerts par les entreprises intermédiaires figurent la recherche et la création de feuilles de route, la facilitation des contacts entre partenaires potentiels, la gestion de la propriété intellectuelle, les essais pratiques, la formation de talents, les possibilités de financement et les conseils en matière de commercialisation.

Outre les collèges et universités et les instituts de recherche universitaires, le Canada compte de nombreux incubateurs et accélérateurs technologiques, ainsi que des groupes industriels qui peuvent aider les PME sur le plan financier et technique. Cependant, il est difficile de déterminer les pratiques exemplaires ou l'efficacité de ces programmes. Le tableau 3.5 répertorie quelques organismes notables, dont beaucoup possèdent des filières de la technologie quantique et recherchent activement de toutes nouvelles entreprises en démarrage quantiques avec lesquelles elles pourraient s'associer ou qu'elles pourraient financer.

Tableau 3.5 Organismes soutenant la conception et l'adoption des technologies quantiques

Initiative	Détails
Banque de développement du Canada (BDC)	Société d'État fédérale chargée d'aider les PME canadiennes en matière de financement, de croissance, de capital de transition, de capital de risque et de services consultatifs. En 2021, la BDC a lancé son Fonds pour les technologies profondes, doté de 200 millions de dollars, qui priorise les investissements en capitaux propres de démarrage dans les technologies quantiques (BDC, 2022).
Accélérateurs technologiques canadiens (ATC)	Ensemble de programmes relevant du Service des délégués commerciaux (SDC) du Canada visant à faciliter la croissance des entreprises à l'échelle mondiale dans 12 pôles technologiques en Amérique du Nord, en Europe et dans la région Asie-Pacifique. Les ATC offrent des services de mentorat, de mise en relation avec des investisseurs et des clients potentiels et, dans certains cas, des espaces de travail collaboratifs. L'accent est mis sur les marchés internationaux (SDC, 2021b).
CIFAR	Organisme de bienfaisance enregistré qui finance des chercheurs et des programmes dans divers domaines. Il procure du financement à des chercheurs boursiers, des conseillers, des chercheurs mondiaux, des chaires de recherche, des établissements et des partenaires internationaux par le biais de plusieurs programmes, dont Informatique quantique et Matériaux quantiques (CIFAR, 2022a, 2022b). Le CIFAR est soutenu par les gouvernements du Canada, de l'Alberta et du Québec, ainsi que par des fondations, des particuliers, des entreprises et des organismes canadiens et internationaux.
Creative Destruction Lab (CDL)	Organisme sans but lucratif offrant des programmes visant à aider les entreprises technologiques en phase de démarrage à élaborer des modèles financiers et des stratégies d'expansion. Créé à Toronto, le programme s'est étendu à 11 autres villes, dont Vancouver, Calgary, Montréal, Halifax et plusieurs villes étrangères. En 2023, le flux CDL-Quantum a travaillé avec 50 entreprises en démarrage en technologies quantiques (CDL, s.d.).
Réseau d'innovation pour la cybersécurité	Initiative financée par ISDE dans le but de soutenir la collaboration entre l'industrie et les universités afin de bâtir l'infrastructure de cybersécurité du Canada (SDC, 2021b). En 2021, le Consortium national pour la cybersécurité (fondé en 2020 par l'Université Concordia, l'Université métropolitaine de Toronto, l'Université de Calgary, l'Université du Nouveau-Brunswick et l'Université de Waterloo) a été choisi pour diriger cette initiative (GC, 2022c).

Initiative	Détails
Mitacs	Organisme non gouvernemental dont l'objectif est d'accroître l'expertise technique et les écosystèmes d'innovation du Canada par la formation, la mise en relation d'étudiants avec des partenaires industriels et l'établissement de liens entre le Canada et des partenaires étrangers (Mitacs, 2021). Mitacs a été mentionné dans la SQN du Canada comme un élément clé du pilier en matière du talent et a reçu 40 millions de dollars pour financer des programmes de technologie quantique (CRSNG, 2022; ISDE, 2023d). Il collabore également avec le CRSNG dans le cadre de son programme FONCER.
Programme FONCER du CRSNG	Concours annuel destiné à attirer, à former et à retenir des équipes de personnel hautement qualifié (PHQ) et qui s'adresse aux étudiants et aux postdoctorants. Le concours se déroule chaque année et offre au moins trois subventions pour la recherche en sciences quantiques (CRSNG, 2023).
PINQ^2	Organisme sans but lucratif dont l'objectif est de soutenir les entreprises dans leur transition numérique vers les nouvelles technologies. PINQ^2 tire profit de liens notables avec l'Accélérateur de découvertes Québec-IBM, qui aide les entreprises cherchant à intégrer l'informatique quantique en tant que service (QCaaS) dans leurs activités (PINQ^2, 2023).
Quantum Industry Canada (QIC)	Consortium d'entreprises canadiennes de technologies quantiques lancé en 2020 dans le but de relier les entreprises en démarrage et les entreprises matures aux marchés internationaux, à l'expertise en matière de gestion de la propriété intellectuelle et à d'autres entreprises intéressées par les technologies quantiques (QIC, 2020). Parmi ses 31 entreprises membres figurent des concepteurs de technologies pour l'informatique, les communications et la détection quantiques et la QRC.
Quantum-Safe Canada	Groupe sans but lucratif qui se préoccupe de l'adoption responsable et sécuritaire des technologies quantiques, en particulier en ce qui concerne la cryptographie et le chiffrement (Quantum-Safe Canada, s.d.). Quantum-Safe Canada considère le processus du National Institute of Standards and Technology (NIST) des États-Unis comme le « principal facteur d'organisation externe » pour la transition vers l'informatique prête pour le quantique; il a aussi désigné la mission QEYSSat et Open Quantum Safe (un projet de logiciel en source ouverte de conception de QRC) comme des projets clés pouvant l'aider à atteindre ses objectifs (Quantum-Safe Canada, s.d.).
Quantum Valley Investments (QVI)	Fonds d'investissement privé de la Quantum Valley qui entoure la région de Waterloo. Ce fonds de 100 millions de dollars est axé sur les percées scientifiques dans le domaine de l'information quantique ayant un potentiel commercial. Il offre un espace de R-D et la proximité d'autres centres de la Quantum Valley (QVI, 2022).
Investisseurs en capital de risque et autres bailleurs de fonds	En 2022, d'importants investissements en capital de risque avaient été réalisés dans des entreprises canadiennes d'informatique quantique (p. ex. QCR, 2022).

3.1.4 Financement public

Le Canada a toujours disposé de programmes quantiques bien financés, mais il est aujourd'hui à la traîne par rapport aux autres pays en ce qui concerne le financement des stratégies quantiques

En 2022, le Canada et de nombreux autres pays ont annoncé ou publié une stratégie quantique nationale visant le développement et l'adoption des technologies quantiques. Les technologies quantiques ont figuré dans plusieurs budgets fédéraux, d'importantes sommes étant allouées à l'élaboration et à l'exécution d'une stratégie nationale. Le tableau 3.6 présente le financement public actuel de l'informatique quantique dans plusieurs pays. Comme prévu, ce financement n'est pas aussi élevé au Canada qu'il l'est dans des pays comme la Chine et les États-Unis, mais il est comparable à celui des pays européens étudiés. Toutefois, plusieurs des pays recensés dans ce tableau sont également membres de l'Union européenne, qui a lancé son programme Quantum Flagship d'un montant d'un milliard de dollars américains (Cartlidge, 2018). Le Canada est membre de collaborations internationales, mais aucune de l'ampleur de ce programme.

Tableau 3.6 Investissements dans les technologies quantiques par les pays à forte production de recherche quantique

Pays	Année d'annonce	Montant (G$US)	Détails
Australie	2021	Jusqu'à 1 (Smith et Coorey, 2023)	Soutien de la stratégie quantique nationale et d'autres technologies essentielles.
Canada	2021	0,3[9]	Soutien de la SQN sur 7 ans (d'autres sources parlent de 1 G$US, montant qui peut inclure des fonds destinés à des initiatives connexes) (ISDE, 2023d).
Chine	2017	25,3	Renseignements publics limités.
Union européenne	2022	1,1	Programme Quantum Flagship de l'Union européenne, sur 10 ans (CE, s.d.).
France	2021	2,2	Stratégie nationale, sur 5 ans.
Allemagne	2021	4,8	Soutien à un cadre quantique, jusqu'en 2028.
Inde	2020	1,0	Soutien de la stratégie quantique nationale, sur 5 ans.
Japon	2020	0,7	
Russie	2020	0,7	
Royaume-Uni	2023	4,4	Stratégie nationale, sur 10 ans (financement précédent annoncé en 2018); subventions supplémentaires de UKRI (UKRI, 2023).
États-Unis	2018	2,8	National Quantum Initiative Act (répartie en 5 pôles)

Source : UofT (2023) sauf mention contraire

9 Selon le taux de change annuel de la Banque du Canada pour 2021 (1 $US = 1,2535 $CA) (Banque du Canada, s.d.).

Au Canada, la SQN alloue des fonds selon de trois piliers : recherche, talents et commercialisation

Avant la publication de la SQN du Canada, le gouvernement fédéral a annoncé qu'il consacrerait 360 millions de dollars supplémentaires au développement des technologies, des entreprises et des talents quantiques au pays (FIN, 2021). En 2023, il a rendu publics les détails sur la manière dont ces fonds seront attribués (ISDE, 2023d). La stratégie définit trois piliers fondamentaux, qui seront directement soutenus par plusieurs programmes, et une variété de programmes connexes. L'annexe G résume les différents fonds accordés en vertu de la SQN.

Outre ce cadre à trois piliers de financement, la SQN souligne la nécessité d'une gouvernance coordonnée, dont elle prévoit établir plusieurs niveaux (ISDE, 2023d) :

- Un **Conseil consultatif sur la quantique**[10] composé de représentants de l'industrie (entreprises habilitantes et adoptives), du milieu universitaire, d'organismes sans but lucratif et de la communauté des investisseurs (section 6.3);
- Des **groupes de travail propres à chaque mission**, chargés d'élaborer des feuilles de route et des jalons, et de déterminer les priorités d'investissements potentiels;
- Un **comité sur la science quantique** soutenu par le **Secrétariat de la SQN**, qui assurera la coordination avec les ministères fédéraux intéressés par les technologies quantiques afin de garantir une mise en œuvre unifiée et en concordance avec la SQN;
- L'**Initiative de recherche et développement en quantique (IRDQ)**, un nouveau programme doté de 9 millions de dollars relevant du CNRC et destiné à rapprocher le milieu universitaire et l'industrie de l'expertise et de l'infrastructure gouvernementales afin d'atteindre les objectifs fixés dans la SQN.

10 Il convient de noter que le président du comité d'experts, Raymond Laflamme, et Stephanie Simmons, pair examinatrice, ont été nommés coprésidents du Conseil consultatif sur la quantique, et que Shohini Ghose, membre du comité d'experts, a été nommée membre de ce même Conseil. Ces nominations sont intervenues plusieurs mois après leur recrutement au comité d'experts du CAC.

Encadré 3.1 Réflexions du comité d'experts sur la Stratégie quantique nationale

Dans l'ensemble, le comité d'experts est satisfait de la SQN du Canada, en tant que première étape. Il souligne toutefois la nécessité d'une démarche de mise en œuvre exhaustive et réfléchie. Le comité approuve l'accent mis dans la SQN sur les éléments clés des technologies quantiques, tels que les matériaux et l'infrastructure, mais il trouve qu'elle néglige l'adoption et la mise en œuvre de ces technologies par les utilisateurs potentiels, ce qui est souvent un indicateur clé de l'état de préparation du marché. De même, la stratégie n'aborde que très peu les questions éthiques, juridiques, sociales ou politiques liées au développement des technologies quantiques. Le comité d'experts constate aussi un décalage entre les ambitions énoncées dans la SQN et les programmes existants ainsi que la manière dont la feuille de route pourrait contribuer à résoudre ce problème. Il note également la nécessité de disposer d'indicateurs pour mesurer le succès du financement et l'importance des matériaux dans ces technologies. Il s'inquiète de la répartition du financement au pays; bien que l'infrastructure et les installations quantiques permettant à l'ensemble du Canada d'accéder aux technologies quantiques soient cruciales, leur soutien ne doit pas se faire au détriment de l'aide aux pôles d'innovation. Le comité d'experts estime que pour surmonter ces problèmes, il faudra une cohésion entre le milieu universitaire, l'industrie et le gouvernement, éventuellement par l'intermédiaire du comité sur la science quantique et du Secrétariat de la SQN mentionnés dans la stratégie.

3.1.5 Coopération internationale

Les chercheurs du Canada collaborent activement à la recherche internationale, près de 70 % de leurs publications sur la science quantique étant affiliées à des établissements internationaux. En raison de la taille relativement petite de sa population, pour devenir un acteur important de l'industrie quantique, le Canada aura aussi besoin de partenariats commerciaux internationaux (Dunlop, 2019; ISDE, 2023d). Plus précisément, il peut chercher à tirer parti des collaborations internationales en s'insérant dans les chaînes de valeur mondiales (par la production de technologies habilitantes spécialisées), en participant à l'élaboration de normes d'interopérabilité, en embauchant ou en formant du PHQ provenant de l'étranger et en continuant à participer à des collaborations internationales en matière de recherche (ISDE, 2023d).

Le Canada a mis en place diverses collaborations internationales sur le plan gouvernemental et industriel

En plus des relations internationales entre chercheurs universitaires, il existe déjà plusieurs collaborations et projets internationaux. Certaines initiatives sont menées par les gouvernements, mais de nombreuses entreprises privées s'engagent également dans des collaborations internationales. Par le biais de la SQN, le gouvernement s'est engagé à financer divers programmes destinés à stimuler ce type de partenariat (ISDE, 2023d). Les subventions Alliance du CRSNG, par exemple, comportent un volet international qui aide les chercheurs universitaires à nouer des relations à l'étranger, tandis que le Programme canadien de l'innovation à l'international, géré par le SDC, s'adresse aux entreprises canadiennes. La SQN mentionne également plusieurs projets internationaux en cours entre les États-Unis et des pays européens (ISDE, 2023d). Le tableau 3.7 présente quelques collaborations internationales notables.

Tableau 3.7 Collaborations internationales et programmes soutenant le développement et l'adoption des technologies quantiques

Initiative	Détails
Partenariat Canada-Royaume-Uni en science quantique	Annoncée en 2023, cette initiative est vouée à accroître la recherche collaborative, la formation de personnel hautement qualifié et la mise sur pied de chaînes d'approvisionnement robustes pour les produits quantiques (ISDE, 2022f).
Ericsson Canada, Université de Sherbrooke et Université d'Ottawa	Lancé en 2023, ce nouveau pôle de recherche quantique situé à Montréal se concentre sur les algorithmes quantiques utiles aux réseaux de télécommunications et à l'informatique quantique distribuée. Il associe des chercheurs d'Ericsson à des boursiers postdoctoraux de l'Université de Sherbrooke et de l'Université d'Ottawa (Ericsson, 2023).
Réseau international de recherche France-Canada sur la science et les technologies quantiques	Programme de collaboration entre chercheurs canadiens et français regroupant actuellement 16 universités (dont l'Université McMaster, l'Université de Montréal, l'Université de Sherbrooke, l'Université de la Colombie-Britannique, l'Université de Calgary, l'Université d'Ottawa, l'Université de Toronto et l'Université de Waterloo pour le Canada) (CNRS, 2022). L'initiative se concentre sur la recherche sur le campus, l'intégration de jeunes scientifiques et les échanges d'étudiants.
Google/Alphabet	Google/Alphabet a travaillé avec Anyon Systems à des simulations de processeurs quantiques en 2017 et avec Quantum Benchmark de Kitchener, en 2018, durant lesquelles le logiciel de détection d'erreurs True-Q de ce dernier a été associé au cadre en source ouverte Cirq de Google (Anyon Systems Inc., 2017; Simpson, 2018).

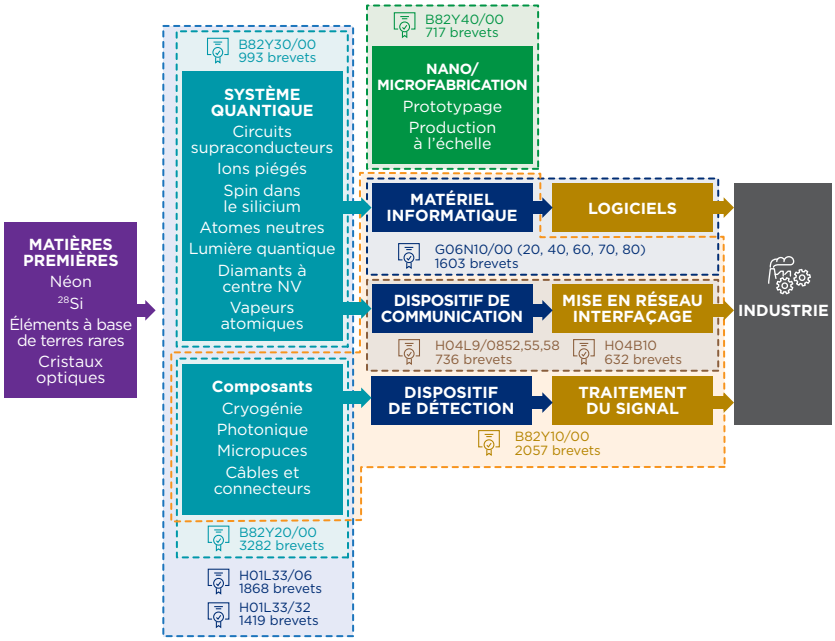
Initiative	Détails
Microsoft	L'entreprise propose actuellement des ordinateurs quantiques accessibles en nuage et une variété de services logiciels conçus par Microsoft et ses partenaires internationaux, qui incluent des entreprises canadiennes comme 1QBit, ProteinQure, Xanadu et Zapata Computing. Azure Quantum fournit également un accès au matériel conçu par Quantinuum, IonQ, Quantum Circuits et Rigetti Computing (Microsoft, 2022). Microsoft est un membre fondateur du Quantum Algorithms Institute de la Colombie-Britannique (Wong, 2021).
Concours du CRSNG et de UK Research and Innovation (UKRI) relatif aux technologies quantiques	Huit projets menés par des chercheurs au Canada, en collaboration avec des entreprises et des universités britanniques, se sont partagé des subventions d'un montant de 2 millions de livres accordées par le Royaume-Uni et de 4,4 millions de dollars octroyés par le Canada en 2020 (CRSNG, 2020b). Les lauréats ont présenté des projets quantiques touchant l'informatique, les communications et la détection (CRSNG, 2020a).
CRSNG et National Science Foundation	Ces deux organismes, l'un canadien et l'autre américain, ont signé en 2021 un protocole d'entente qui officialise leur intention d'encourager davantage la collaboration en matière de recherche fondamentale dans plusieurs domaines, y compris en science quantique (CRSNG, 2021b).
CRSNG et Commission européenne (Horizon Europe)	Ces organismes ont appelé en 2021 à des projets de collaboration portant sur l'informatique quantique et la simulation, les réseaux et les communications, ainsi que sur la détection et la métrologie, en mettant l'accent sur l'établissement de partenariats stratégiques en recherche, éducation et formation (CRSNG, 2021a).
QEYSSat et ReFQ	La mission QEYSSat est financée par l'Agence spatiale canadienne en collaboration avec l'Institut d'informatique quantique de l'Université de Waterloo et Honeywell (GC, 2022f). Le projet ReFQ est dirigé conjointement par Craft Prospect au Royaume-Uni et par l'Université de Waterloo. Il vise à développer une technologie aidant la mission QEYSSat à transmettre des signaux quantiques entre l'espace et les stations terrestres (UKRI, 2020b).
Accélérateur de découvertes Québec-IBM	Annoncée en février 2022, cette initiative prévoit la construction d'un ordinateur quantique (IBM Quantum System One) à l'usine IBM de Bromont, au Québec. Cette usine sera au cœur du pôle quantique IBM (Espace IBM Q) à l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke. Le programme se focalise sur l'informatique et la conception de matériaux, grâce à l'expertise acquise avec les processeurs quantiques et les semiconducteurs, ainsi qu'à la modélisation assistée par l'IA (IBM, 2022b).

3.2 Chaîne de valeur quantique

La plupart des technologies quantiques de deuxième génération n'en sont qu'à leurs débuts, ce qui rend difficile toute évaluation quantitative de la chaîne de valeur ou toute analyse des étapes de la transformation des matières premières en produits prêts à être consommés. Toutefois, la description des technologies habilitantes et de l'état actuel des applications commerciales peut être utile pour définir les défis, les possibilités et les goulots d'étranglement sur la voie de la

commercialisation. En règle générale, les technologies quantiques reposent sur une sorte de *système quantique*, c'est-à-dire la partie de la technologie qui prépare, manipule et mesure les matériaux ou composants quantiques (en informatique, par exemple, il s'agit de l'ensemble des qubits). Les technologies quantiques dépendent également d'une variété de composants classiques (p. ex. la cryogénie, les lasers ou les semiconducteurs) qui peuvent déjà être en production dans d'autres secteurs d'activité. Il existe également un besoin pour une variété de produits (p. ex. des logiciels, des algorithmes, des réseaux ou le traitement des signaux), qui permettent aux consommateurs d'utiliser ces technologies.

Dans une enquête réalisée en 2022 auprès de 47 représentants internationaux du secteur de l'informatique quantique, les principales préoccupations exprimées à propos de la chaîne d'approvisionnement pour les trois prochaines années étaient le manque de matières premières essentielles (21 %), d'équipement de fabrication ou d'assemblage (17 %), d'expertise dans la conception et la production de matériel (17 %) et d'expertise dans le développement de logiciels (13 %) (QED-C, 2022c). La figure 3.7 présente une vue d'ensemble de la chaîne de valeur des technologies quantiques.



Source des données : Aboy *et al.* (2022); Shaw (2022)

Figure 3.7 Chaîne de valeur quantique pour l'informatique, la détection et les communications, avec le nombre de brevets délivrés associé, 2001–2021

Les données sur les brevets sont présentées selon les codes typologiques de l'USPTO et de l'OEB (p. ex. B82Y10/00).

3.2.1 Dépendances internationales

La plupart des technologies quantiques ne peuvent actuellement pas être achetées dans le commerce, et la liste des pièces et matériaux nécessaires à leur construction pourrait inclure des centaines de fournisseurs différents. Cependant, nombre de ces composants ne peuvent être obtenus qu'auprès d'un ou deux fournisseurs dans le monde, et le temps d'attente pour l'équipement spécialisé peut, dans certains cas, atteindre un an, voire plus (INDU, 2022b). Bien que les ordinateurs quantiques soient parmi les technologies quantiques les plus complexes, les dispositifs de communication et de détection peuvent se heurter à des difficultés similaires en ce qui concerne la chaîne d'approvisionnement et la dépendance internationale.
Le tableau 3.8 résume les conclusions de la section 3.2 et répertorie certains des matériaux et composants cruciaux que les entreprises quantiques canadiennes doivent actuellement importer, ainsi que leur pays d'origine.

Tableau 3.8 Dépendances de la chaîne d'approvisionnement internationale pour les technologies quantiques

Catégorie	Produit	Fournisseurs principaux	Précarité	Criticité	Remarques
Matières premières	Néon	Ukraine, Chine	Élevée	Moyenne	
	^{28}Si	Russie	Élevée	Faible	
	^{3}He	Russie, États-Unis	Moyenne	Élevée	Le Canada peut devenir un grand fournisseur
	Plaquettes de saphir	Russie, Japon	Moyenne	Moyenne	Applications d'ions piégés
	^{87}Rb	États-Unis	Élevée	?	Le Canada peut devenir un grand fournisseur
	Matériaux à base de terres rares	Chine	Variable	Variable	
	^{43}Ca	États-Unis	?	?	Fourni par le Laboratoire national d'Oak Ridge
	Isotopes du baryum	États-Unis	?	?	Fourni par le Laboratoire national d'Oak Ridge

Catégorie	Produit	Fournisseurs principaux	Précarité	Criticité	Remarques
Composants fabriqués	Réfrigérateurs à dilution	Finlande, Royaume-Uni, Pays-Bas	Faible	Élevée	Une entreprise est à la tête du secteur, mais d'autres peuvent en fournir.
	Câbles et connecteurs	Pays-Bas, Japon	Faible	Élevée	
	Lasers	Allemagne, Japon, États-Unis, Australie, Canada	Variable	Élevée	
	Semi-conducteurs et puces	Taïwan, États-Unis	Élevée	Élevée	Actuellement, certains produits ne sont disponibles qu'à Taïwan
Fabrication	Prototypage	s.o.	Faible	Élevée	Le Canada dispose d'une variété d'usines qui pourraient convenir
	Production à l'échelle	Chine, États-Unis	Élevée	Moyenne	

Source des données : Giles (2019); Parker *et al.* (2022); INDU (2022b); QED-C (2022c)

Les événements géopolitiques peuvent également nuire à l'accès aux matériaux et aux appareils (INDU, 2022b). Par exemple, depuis 2022, la guerre en Ukraine a considérablement réduit la disponibilité de matériaux essentiels tels que le néon et le silicium 28 très pur, alors qu'une grande partie du monde dépend actuellement de Taïwan pour certains types de semiconducteurs et de microcontrôleurs. L'évaluation des dépendances de la chaîne d'approvisionnement internationale n'est donc pas insignifiante. De plus, la provenance de certains composants ou matériaux n'est parfois pas apparente. Par exemple, les produits électroniques, les aimants en terres rares et d'autres matières premières peuvent provenir de fournisseurs étrangers, mais on ne sait pas toujours où ces derniers se trouvent (Parker *et al.*, 2022).

La demande de produits et de matériaux spécialisés du secteur des technologies quantiques est faible par rapport à d'autres secteurs

Les difficultés de la chaîne d'approvisionnement découlent du nombre limité de fournisseurs et de problèmes de qualité des produits (Parker *et al.*, 2022; INDU, 2022b). Dans certains cas, le secteur des technologies quantiques n'est aujourd'hui

pas assez gros pour que les fournisseurs fabriquent davantage qu'une poignée de composants spécialisés à la fois voire les fabriquent sur commande. De même, les grands fabricants dont les marges sont faibles peuvent ne pas être en mesure de justifier la production de si petites quantités d'équipement spécialisé. Cela peut accroître la rareté de certaines ressources, les technologies quantiques n'étant pas toujours des marchés prioritaires pour les fournisseurs. Pour ces raisons, les grandes entreprises quantiques en démarrage ont exprimé leur volonté d'obtenir — ou ont commencé à produire elles-mêmes — davantage de composants nécessaires à leurs technologies (INDU, 2022b). Cette stratégie se heurte toutefois à des difficultés, car le coût de l'infrastructure nécessaire à la construction de ces dispositifs spécialisés peut être prohibitif.

3.2.2 Matières premières

Les lasers sont souvent cités comme des goulots d'étranglement importants

Une grande variété de composants électroniques dépendent des terres rares, dont beaucoup proviennent de Chine. Les applications qui ont recours aux technologies photoniques (p. ex. les capteurs ou les produits de communication) dépendent parfois de lasers spécialisés, dont les besoins en matières premières peuvent être différents de ceux des autres technologies à qubits (Parker *et al.*, 2022). Pour ce qui est du cas particulier des lasers et des qubits piégés optiquement, en raison de la rareté des matériaux permettant de produire des faisceaux et des qubits particuliers (p. ex. le rubidium 87, le calcium 43 ou les isotopes du baryum), il est nécessaire de faire des compromis de conception : les entreprises doivent parfois choisir entre des matériaux peu idéaux ou des dispositifs laser plus accessibles et des systèmes laser spécialisés qui pourraient rendre ces entreprises dépendantes d'un nouveau fournisseur de niche (Parker *et al.*, 2022).

On a proposé d'utiliser les atomes de rubidium en informatique quantique et dans les capteurs (Singh *et al.*, 2022), dont le Canada pourrait devenir une nouvelle source mondiale (Jaccobsen, 2022). L'utilité pour les technologies vertes des sources canadiennes de terres rares fait également l'objet d'une analyse (Climenhaga, 2022). D'autres matériaux — tels que le calcium 43, les isotopes du baryum, les aimants en terres rares et les matériaux optiques — restent difficiles à obtenir (Parker *et al.*, 2022).

L'approvisionnement en néon et en silicium 28 dépend de la Russie et de l'Ukraine

Élément essentiel de la production de semiconducteurs, le néon provient en grande partie d'Ukraine et est inaccessible depuis le déclenchement de la guerre

(Alper, 2022). Alors que certains pays et de grandes entreprises ont constitué des stocks de ce gaz, les petites entreprises, telles que les entreprises en démarrage quantiques, ne peuvent plus en faire autant. De même, le silicium 28 est un isotope du silicium relativement abondant, mais son isolement et sa purification nécessitent un équipement spécialisé qui n'est pas à la portée de la plupart des entreprises (Tyson, 2022). Avant 2022, la Russie était une source importante de cet élément, et bien que des efforts soient déployés pour mettre au point des techniques évolutives de purification, il n'existe actuellement aucune source largement accessible (Webb, 2014).

L'approvisionnement en hélium 3 pourrait grandement freiner à l'informatique quantique; toutefois, le Canada en a récemment découvert de nouveaux gisements

L'hélium 3 est un *nucléide primordial*, c'est-à-dire qu'il a été créé naturellement avant la formation de la Terre (Bania *et al.*, 2002). Il se trouve dans la croûte terrestre, d'où il peut être extrait, capté ou libéré dans l'atmosphère. Bien qu'il en existe des réserves exploitables, l'approvisionnement de cet isotope est limité et ce dernier ne se renouvelle pas. En raison notamment des problèmes de chaîne d'approvisionnement dus à la COVID-19 et à l'utilisation de l'hélium 3 à certaines fins en imagerie médicale, la demande a dépassé la production ces dernières années, ce qui a entraîné une hausse annuelle constante du prix depuis 2010 (Green *et al.*, 2021).

Le Canada se classe au cinquième rang pour ce qui est de l'abondance naturelle de l'hélium 3, qui provient essentiellement de la Saskatchewan. En 2022, la province produisait environ 1 % de l'offre mondiale, mais elle a annoncé son intention de porter sa production à 10 % d'ici à 2030, grâce à de nouvelles mesures d'incitation et à des crédits d'impôt (Canada Action, 2021; Nickel, 2022). Un gisement d'hélium récemment découvert en Alberta est également en cours d'exploration (Shea et Morgan, 2010; Aldrich, 2023). Fait notable, les gisements d'hélium de la Saskatchewan et de l'Alberta sont très concentrés, ce qui permet de recueillir l'isotope par forage direct, plutôt que par captage en tant que sous-produit de l'extraction du gaz naturel — ce qui est la méthode d'obtention de la majeure partie de l'hélium 3. Le forage direct présente également l'avantage de minimiser les émissions de gaz à effet de serre pendant la production (Silverthorn, 2021). Parallèlement à ces nouvelles sources, la société North American Helium, située en Alberta, a construit une usine de purification et de liquéfaction pour faciliter le transport (Silverthorn, 2021; Cook, 2022).

Cependant, le coût élevé de l'extraction de l'hélium 3, ainsi que sa rareté, fait qu'il est actuellement plus rentable de le recueillir en tant que sous-produit d'autres procédés, notamment des programmes d'énergie et d'armement nucléaires (Shea

et Morgan, 2010); il peut être créé à partir de la désintégration radioactive du tritium, qui est un élément essentiel des ogives nucléaires. Traditionnellement, la majeure partie de l'approvisionnement mondial en hélium 3 provient d'ailleurs de ces sources. Comme il peut également être converti en tritium, c'est une substance nucléaire contrôlée, conformément au *Règlement sur le contrôle de l'importation et de l'exportation aux fins de la non-prolifération nucléaire* (DORS/2000-210) du Canada; il est donc soumis à des restrictions à l'importation et à l'exportation (GC, 2010).

3.2.3 Composants fabriqués

Les différentes technologies quantiques peuvent avoir plusieurs exigences qui se chevauchent en matière de fabrication et de composants

À la base, l'informatique, les communications et la détection quantiques reposent sur la préparation et la mesure d'états quantiques qui peuvent être interprétés de manière à permettre aux utilisateurs d'effectuer des calculs, de transmettre de l'information ou de quantifier certains aspects de l'environnement (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Les ordinateurs et autres appareils peuvent y parvenir de différentes manières, mais en général, chaque méthode nécessite une variété de composants manufacturés hautement spécialisés fonctionnant ensemble.

Les qubits peuvent reposer sur plusieurs systèmes quantiques, dont certains sont plus intéressants, accessibles ou près du marché que d'autres. Par exemple, la plupart des réalisations d'ordinateurs quantiques bruyants à échelle intermédiaire (NISQ) reposent sur des qubits supraconducteurs et des pièges à ions, bien que d'autres procédés soient également explorés (Dekate *et al.*, 2021) (section 2.2.1). De même, les technologies de communication et les dispositifs à capteurs auront leurs propres architectures prédominantes. Toutefois, certaines exigences concernant la chaîne d'approvisionnement sont communes à de nombreux systèmes quantiques, si ce n'est à tous. Les dispositifs cryogéniques, par exemple, sont essentiels pour réduire le genre de bruit de signal qui limite l'utilisation pratique de certains systèmes quantiques (Green *et al.*, 2021). De son côté, la construction de certains des composants des ordinateurs, des capteurs et des dispositifs de communication nécessite des techniques de nanofabrication, des installations et des matériaux spécialisés (Laucht *et al.*, 2021). Ces installations et ces composants — et les produits consommables de laboratoire qu'ils requièrent — peuvent être rares et coûteux à obtenir, ce qui limite dans certains cas l'accès généralisé au marché, sauf pour les grandes entreprises et les gouvernements.

Les systèmes cryogéniques sont nécessaires à de nombreuses applications quantiques

Les technologies quantiques de deuxième génération dépendent du contrôle des propriétés quantiques des systèmes atomiques et subatomiques. Ces systèmes sont généralement très sensibles aux petites perturbations de leur environnement, qui entraînent des erreurs et des pertes d'information. Une fois encodés avec de l'information, les qubits peuvent se décohésionner avant de pouvoir être mesurés ou utilisés dans des calculs. Pour certaines technologies, il est toutefois possible d'augmenter les temps de cohérence en maintenant le système en surfusion (Ezratty, 2021). Les réfrigérateurs à dilution constituent actuellement le moyen le plus pratique d'atteindre les basses températures nécessaires pour maintenir la stabilité de ces systèmes; cependant, il s'agit généralement d'appareils volumineux, coûteux, énergivores et dont le fonctionnement requiert des produits consommables onéreux (Green *et al.*, 2021; Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Cependant, il n'est pas possible de refroidir un appareil entier à des températures aussi basses. Par conséquent, de nombreux concepts divisent les couches en fonction de leurs besoins en refroidissement et déchargent les besoins les moins grands sur des dispositifs plus efficaces (Charbon *et al.*, 2016; Patra *et al.*, 2018). Les câbles et le câblage qui traversent les différentes couches de refroidissement sont un autre élément crucial de ces systèmes (Giles, 2019), et ils sont également offerts par un nombre restreint d'entreprises dans le monde.

Peu d'entreprises canadiennes proposent des réfrigérateurs à dilution adaptés à l'informatique quantique

Comme mentionné précédemment, les réfrigérateurs à dilution sont des appareils hautement spécialisés, qui peuvent coûter plusieurs centaines de milliers de dollars. Growth Market Reports prévoit que leur marché dépassera 200 millions de dollars américains d'ici à 2027 (contre 112,1 millions en 2019). Malgré les prévisions d'augmentation, la réfrigération à dilution est un marché de niche seulement desservi par quelques entreprises — Oxford Instruments, Bluefors, Lake Shore Cryotronics, Leiden Cryogenics et Cryomagnetics (Growth Market Reports, 2021). En 2023, Zero Point Cryogenics et Anyon Systems sont les deux seules entreprises au Canada à faire de la publicité pour des systèmes de réfrigération à dilution destinés à des applications quantiques (GACG, 2021a). En 2022, le CNRC a lancé un appel aux entreprises canadiennes pour qu'elles testent et fassent la démonstration de nouveaux réfrigérateurs à dilution de taille réduite (ISDE, 2022c). Selon l'appel, les réfrigérateurs à dilution sont « toujours très grands et complexes, nécessitant en principe un laboratoire entier dédié pour les accueillir et un personnel formé au doctorat pour les faire fonctionner » (ISDE, 2022c). L'appel fait état de systèmes de petites dimensions faciles à utiliser sans connaissances

spécialisées, qui atteignent des températures suffisamment basses pour les technologies quantiques et qui disposent d'assez d'espace pour accueillir des composants quantiques complexes. Parmi les autres problèmes des réfrigérateurs à dilution, citons leur consommation d'énergie et la faible disponibilité des produits consommables nécessaires à leur fonctionnement, à savoir l'hélium 3 et l'hélium 4.

Taïwan est un goulot d'étranglement mondial pour les dispositifs à puces

Certains composants avancés à puces à semiconducteurs ne sont produits à grande échelle que dans un petit nombre d'usines. Selon les représentants des entreprises canadiennes du secteur quantique, Taïwan constitue le goulot d'étranglement mondial pour tout un ensemble de composants électroniques essentiels, qui ne se limitent pas à l'industrie quantique (INDU, 2022b). Les problèmes de chaîne d'approvisionnement causés par la pandémie de COVID-19 ont mis en évidence la précarité du marché mondial, ce qui a incité divers gouvernements, dont ceux des États-Unis et des membres de l'Union européenne, à hausser leurs dépenses (Shankland, 2022). La Loi américaine sur les semiconducteurs et la science (*CHIPS and Science Act*) prévoit 52,7 milliards de dollars américains destinés « à la recherche, au développement, à la fabrication et à la formation de la main-d'œuvre dans le domaine des semiconducteurs » (The White House, 2022c). L'annonce de cette loi souligne que, bien que les États-Unis produisent environ 10 % de l'offre mondiale de semiconducteurs, ils ne fabriquent actuellement aucun des dispositifs les plus avancés. Le Canada, de son côté, dispose d'une certaine capacité de recherche et de prototypage dans ce domaine, mais il manque énormément d'installations pour être un acteur important du marché. Toutefois, un accord qu'il a conclu en 2023 avec IBM renforce le rôle du Québec dans la chaîne d'approvisionnement en semiconducteurs nord-américaine (Platt, 2023).

Le Canada possède une expertise en photonique qui peut être utile pour une gamme de dispositifs quantiques

La photonique s'applique à un large éventail de dispositifs, y compris aux produits électroniques grand public (p. ex. ceux utilisant un laser), aux technologies de communication (p. ex. la fibre optique), aux biocapteurs et aux lidars, et continue d'être un domaine de recherche très actif (Moody *et al.*, 2022). Elle s'intéresse à la manipulation de la lumière; les photons — des parcelles quantifiées de lumière — peuvent être préparés de diverses manières (p. ex. polarisation, énergie ou cohérence) et utilisés pour coder des renseignements ou contrôler d'autres types de particules. En ce qui concerne les technologies quantiques, la photonique peut jouer de nombreux rôles. Les photons peuvent servir de qubits ou au contrôle de

certains types de qubits, faciliter le transfert d'informations codées sous forme quantique ou être influencés par leur environnement, cette influence étant ensuite captée et analysée à des fins de détection. En général, la technologie photonique peut inclure des lasers à haute performance, des sources et des capteurs à photon unique et autres dispositifs fonctionnant avec la lumière utilisée dans les ordinateurs, les technologies de communication et les capteurs quantiques.

La chaîne valeur photonique comporte des goulots d'étranglement, mais plusieurs technologies émergentes peuvent faciliter la préparation de dispositifs en vue de leur commercialisation

L'intégration des différents composants dans les puces est un problème majeur pour les multiples technologies photoniques (Moody *et al.*, 2022). Par exemple, les segments d'appareils qui nécessitent un important refroidissement pourraient bénéficier d'une réduction du nombre de connexions aux composants situés en dehors des zones refroidies. Différentes méthodes de refroidissement ne nécessitant pas la réfrigération à dilution pourraient alors être utilisées pour refroidir les zones moins sensibles de l'appareil. De plus, les capteurs supraconducteurs à nanofils, qui fonctionnent à des températures cryogéniques, pourraient être intégrés dans une puce. Une autre limite pratique de la photonique concerne les émetteurs de photons (production de photons à la demande) et les sources (production de photons probabilistes). Le développement des technologies photoniques bénéficierait donc de l'amélioration de la qualité, de l'efficacité et du débit de photons, ainsi que de l'intégration dans des dispositifs sur puce. Les convertisseurs de fréquence et autres méthodes d'intégration de différents types de dispositifs photoniques pourraient également contribuer à l'interopérabilité de diverses technologies photoniques (p. ex. ions piégés ou atomes neutres) (Moody *et al.*, 2022). Cela pourrait faciliter la conception d'appareils exploitant diverses technologies photoniques à des fins différentes ou permettre à plusieurs appareils de communiquer entre eux. Les récentes allocations budgétaires annoncées par le gouvernement du Canada (encadré 3.3) pourraient contribuer à la R-D sur certains de ces concepts.

Encadré 3.3 Amélioration de la recherche, du développement et de la fabrication relatifs aux semiconducteurs et à la photonique

Les designs sur puce tels que ceux requis pour les ordinateurs, les capteurs et les dispositifs de communication quantiques dépendent de semiconducteurs et de procédés photoniques avancés qui, dans de nombreux cas, nécessitent des installations de nanofabrication et de microfabrication spécialisées. En 2021, le gouvernement du Canada a annoncé un investissement de 90 millions de dollars pour rééquiper et moderniser le Centre canadien de fabrication de dispositifs photoniques du CNRC, à Ottawa, qui mène ses propres recherches tout en fournissant des services d'essai, de prototypage et de fabrication pilote aux chercheurs universitaires et aux entreprises (ISDE, 2022g). Cet engagement a été renforcé en 2022 par un investissement de 150 millions de dollars dans la conception et la fourniture de semiconducteurs.

3.2.4 Micro et nanofabrication

Les technologies quantiques reposent sur la manipulation de systèmes atomiques et subatomiques, qui sont, dans de nombreux cas, contrôlés par des dispositifs nanométriques. La fabrication de dispositifs pouvant fonctionner à cette échelle nécessite des techniques avancées et des installations spécialisées, dont l'accès est prohibitif pour des entreprises ou des équipes de recherche seules.

Le Canada dispose d'installations à petite échelle adaptées au prototypage et à la recherche, mais incapables d'assurer une fabrication avancée à grande échelle

La *nanofabrication* comprend un large éventail de techniques qui portent sur la fabrication de composants nécessitant des éléments à l'échelle nanométrique. En raison de la petite taille et de la nature délicate de ces systèmes, elle doit s'effectuer dans des usines extrêmement propres — un grain de poussière peut être 100 à 1 000 fois plus gros que les dimensions des éléments requis. Mais garantir la propreté appropriée est coûteux et nécessite de grosses installations spécialisées dotées d'un PHQ. C'est pourquoi la plupart des entreprises externalisent leurs activités de nanofabrication (Laucht *et al.*, 2021; INDU, 2022b).

Les usines de nanofabrication et de microfabrication peuvent présenter des différences sur le plan de l'accès, de la gestion et des tarifs. De multiples universités et centres de recherche universitaires offrent un accès à une infrastructure dont le coût serait sinon prohibitif, ainsi que l'expertise nécessaire à la conception, au prototypage et à la production d'un grand nombre des dispositifs qui composent les technologies quantiques. Ces installations plus petites et plus spécialisées se concentrent sur la recherche fondamentale et conviennent mieux à la R-D de démarrage. Elles sont en grande partie financées par des fonds publics, partiellement subventionnées et tendent à être situées à proximité de réseaux de recherche régionaux et d'universités à forte orientation quantique. En dehors des centres universitaires et gouvernementaux, des entreprises privées de recherche et de technologie proposent également des services de nanofabrication. Toutefois, le traitement de la propriété intellectuelle varie d'un centre à l'autre. Dans certains cas, les installations financées par des fonds publics peuvent être obligées de publier les résultats de leurs activités, alors que les centres privés sont plus susceptibles de garder leurs résultats secrets (NanoFabNet, 2021). Il demeure que peu de ces installations, voire aucune, sont en mesure de produire des dispositifs à grande échelle.

Des organismes tiers comblent les lacunes techniques en mettant les entreprises en relation avec la micro et la nanofabrication, les services de R-D et les talents

CMC Microsystèmes, un organisme sans but lucratif, facilite les relations entre les entreprises et d'autres organisations afin de combler les lacunes technologiques. Il assure la conception, la fabrication et la production et attribue des prix pour des projets réalisés dans l'un des multiples centres de recherche et de fabrication. Il gère également le Réseau national de conception du Canada — un bénéficiaire du Fonds des initiatives scientifiques majeures des grandes installations de recherche du Canada et de la Fondation canadienne pour l'innovation — qui réunit 10 000 participants universitaires et 1 000 entreprises (CMC Microsystèmes, 2022). De même, C2MI de Bromont, au Québec, se spécialise dans les systèmes microélectromécaniques, l'assemblage et le test de semiconducteurs, l'électronique imprimée, les services d'analyse et l'expertise en soutien à ses clients potentiels (C2MI, s.d.). De plus, l'Institut national d'optique (INO), une autre société de soutien située au Québec, se spécialise dans les technologies optiques et la photonique par l'intermédiaire de quatre unités d'affaires : biomedtech; défense, sécurité et aérospatiale; ressources durables, agriculture et infrastructures et fabrication avancée (INO, s.d.).

Le CNRC dispose de 42 installations de fabrication avancée au Canada, dont deux consacrées à la fabrication additive et six aux matériaux avancés (CNRC, 2022f).

L'une des plus notables est le Centre de recherche en nanotechnologie d'Edmonton, qui possède une expertise en micro et nanofabrication, en optoélectronique, en synthèse chimique et en instruments avancés permettant des expériences et une fabrication dépassant ce qui est possible dans la plupart des installations commerciales. Certains instruments sont mis à la disposition des clients et des collaborateurs; le Centre emploie également du personnel expérimenté capable de donner des conseils et de réaliser lui-même des expériences et des essais (CNRC, 2022g). Il comprend un laboratoire de microscopie et des installations de dépôt et de caractérisation de nanomatériaux, et propose des programmes de recherche collaborative (p. ex. Initiative en nanotechnologie CNRC-Université de l'Alberta ou collaboration CNRC-Institut de nanotechnologie de Waterloo) (CNRC, 2022d, 2022e, 2022h).

Les grandes entreprises quantiques canadiennes ont constaté que leurs besoins en composants spécialement fabriqués dépassaient la capacité des installations du pays, ce qui les obligeait à faire appel à des entreprises étrangères. Dans certains cas, cela les a conduits à se pencher sur des solutions nationales, comme des programmes de production interne, pour renforcer leurs chaînes d'approvisionnement et assurer la compatibilité entre les éléments qui composent leurs produits (INDU, 2022b). Les représentants de l'industrie notent également que le renforcement de l'écosystème de fabrication du Canada améliorerait l'accès des entreprises canadiennes aux services de fabrication et attirerait des entreprises étrangères (INDU, 2022b).

3.2.5 Chaîne de valeur de l'informatique quantique

La chaîne de valeur de l'informatique peut être divisée en chaînes de valeur *primaire* et *secondaire*, la première étant étroitement liée à l'aspect matériel et la seconde comprenant les logiciels et les services qui permettent le fonctionnement d'un système d'informatique quantique; toutes deux sont nécessaires à l'adoption de ces systèmes (PAC, 2019). Cette division est comparable à celle qui existe en informatique classique, les produits primaires étant analogues à ceux produits par les fabricants d'ordinateurs et de matériel et les produits secondaires correspondant à ceux qui catalysent l'adoption et l'utilité des produits primaires (p. ex. les applications phares ou les services). Il est à noter que la chaîne de valeur de l'informatique quantique repose largement sur la coopération entre les chercheurs fondamentaux financés par l'État, les grandes entreprises et les entreprises en démarrage. Les entreprises interviennent souvent soit dans la chaîne de valeur primaire, soit dans la chaîne de valeur secondaire; toutefois, certaines interviennent actuellement dans les deux.

La prévalence des entreprises associées aux différents segments de la chaîne de valeur peut être un indicateur utile de la maturité du secteur

PAC (2019) estime que 20 % de l'industrie informatique classique peut être considérée comme axée sur le matériel (autrement dit, sur la chaîne primaire). Pour l'informatique quantique, ce serait plus près de 66 %. En général, le matériel d'informatique quantique est loin d'être prêt à être commercialisé, nécessite encore d'importants investissements en capital, est tributaire de la recherche fondamentale et appliquée en cours et, par conséquent, ses projets ont un long cycle de vie — alors que le marché secondaire peut entraîner moins de frais généraux et présenter des cycles de développement plus courts. On prévoit que les produits secondaires finiront par dépasser les produits de la chaîne de valeur primaire pour ce qui est de la taille du segment de marché, mais pas avant que l'infrastructure matérielle ne soit mieux établie (PAC, 2019).

La chaîne de valeur primaire est dominée par de grandes entreprises internationales

La chaîne de valeur primaire n'est pas particulièrement accueillante pour les entreprises en démarrage; l'entrée sur le marché nécessite généralement d'importants investissements en capital, une grande expertise technique et la capacité de concevoir des projets ayant un cycle de vie très long. En général, les entreprises présentes sur ce marché sont des géants multinationaux, comme Amazon Web Services, Honeywell et IBM (ce qui, à mesure que le marché se développe, pourrait poser des problèmes de propriété intellectuelle et de liberté d'exploitation, comme nous le verrons au chapitre 5). Cependant, tous les maillons de cette chaîne n'ont pas vocation à construire leur propre ordinateur quantique; ils peuvent plutôt s'occuper (i) de l'infrastructure, (ii) du matériel quantique et (iii) des plateformes de gestion des connexions — tous des éléments nécessaires pour faciliter le développement et la production d'un dispositif d'informatique quantique proprement dit (PAC, 2019; MacQuarrie *et al.*, 2020). Les sections suivantes examinent les composants propres au marché de l'informatique quantique.

Le principal goulot d'étranglement dans la chaîne de valeur primaire est la conception et le contrôle des qubits

En ce qui concerne les composants de la chaîne de valeur primaire de l'informatique quantique, un goulot d'étranglement particulièrement embarrassant est le moteur à qubits (ou système quantique) lui-même. Bien qu'il existe un certain nombre de systèmes informatiques quantiques opérationnels, on n'a pas encore assisté à une démonstration universellement acceptée de l'avantage

des ordinateurs quantiques sur les ordinateurs classiques. D'autres plateformes basées sur différents types de systèmes quantiques sont en cours de mise au point, mais ne sont pas encore disponibles pour les utilisateurs potentiels. Dans tous les cas, un financement important de la R-D est nécessaire pour faire avancer l'état de ces systèmes quantiques avant qu'ils puissent offrir un avantage commercial à leurs utilisateurs (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Le comité d'experts note qu'à terme, l'informatique quantique pourrait suivre l'exemple de l'informatique classique, c'est-à-dire que peu d'entreprises de produits primaires en sortiraient « gagnantes »; elles évinceraient ou consolideraient leurs concurrents en optimisant (et en réduisant) le reste de la chaîne d'approvisionnement primaire. Toutefois, plusieurs systèmes quantiques peuvent s'avérer plus avantageux que d'autres pour certaines applications.

La chaîne de valeur secondaire est plus facile à pénétrer pour les entreprises en démarrage, mais elle dépend de fournisseurs principaux et des utilisateurs finaux

La figure 3.8 classe les composants secondaires de la chaîne de valeur de l'informatique quantique en outils, applications, systèmes supplémentaires et services. Si les produits et services secondaires constituent actuellement des niches (étant donné que le matériel informatique n'est pas, en grande partie, encore prêt à être commercialisé), ils regroupent ceux susceptibles de favoriser l'adoption de l'informatique quantique par des entreprises qui n'ont pas nécessairement l'expertise nécessaire pour mettre au point leurs propres solutions commerciales.

Outils	Applications	Systèmes supplémentaires	Services
• Développement de logiciels quantiques et évaluation des performances • Logiciels d'intégration • Bases de données	• Algorithmes quantiques • Analyse des données • Modèles et cas d'utilisation	• Simulation quantique • Informatique en nuage • Cybersécurité • Communications	• Éducation et formation • Services professionnels • Externalisation et services en nuage

Reproduit avec l'autorisation de PAC (2019)

Figure 3.8 Composants de la chaîne de valeur secondaire de l'informatique quantique

Les maillons de la chaîne de valeur secondaire sont généralement moins gourmands en ressources et ont de cycles de vie plus courts (PAC, 2019). Il s'agit donc d'un marché particulièrement propice à l'entrée d'entreprises en démarrage; par conséquent, bon nombre des entreprises qui composent l'écosystème quantique canadien se situent dans cette chaîne de valeur. Comme pour

l'informatique classique, les entreprises secondaires d'informatique quantique sont celles qui proposent des logiciels, des outils et des services qui complètent les produits (c.-à-d. le matériel) offerts dans la chaîne de valeur primaire, et qui font souvent le lien entre les services primaires et les utilisateurs ou les consommateurs. Cela comprend également les services permettant à l'informatique quantique de s'agencer avec les technologies existantes et classiques. Selon le comité d'experts, bien que certaines entreprises canadiennes aient fait preuve de leadership dans la conception de matériel informatique quantique, l'environnement quantique actuel au Canada pourrait être mieux adapté aux PME qui se concentrent sur la chaîne de valeur secondaire.

4

Problèmes éthiques, sociaux et institutionnels

Constatations du chapitre

- La capacité des technologies quantiques à causer ou à accroître les risques pour la sécurité, la vie privée et l'environnement, et à élargir la fracture numérique, pose des problèmes éthiques. Les effets positifs de ces technologies peuvent être pleinement atteints si les politiques existantes et proposées prévoient ces problèmes et font progresser la recherche éthique, le développement et l'adoption des technologies quantiques.
- L'abus de position dominante par des entreprises établies peut causer des disparités dans l'accès aux technologies quantiques.
- Les technologies quantiques peuvent offrir des avantages sur le plan de l'efficacité et de la sécurité, mais leur adoption dans les secteurs privé et public canadiens est entravée par des lacunes dans la procédure d'approvisionnement fédérale et par des incertitudes concernant l'utilité, la maturité et l'interopérabilité des technologies.
- Un personnel qualifié, doté d'une formation et d'une expérience variées, est déterminant pour l'adoption des technologies quantiques. Des obstacles concernant l'éducation, l'immigration et la situation socioéconomique limitent toutefois les possibilités de formation, d'amélioration des compétences et de maintien de la main-d'œuvre.
- Le manque de concurrence dans le secteur des télécommunications au Canada n'incite pas les opérateurs établis à exploiter les technologies quantiques pour acquérir un avantage concurrentiel.

Les technologies quantiques peuvent apporter de nombreux avantages à l'économie canadienne, aux communautés de recherche et à la société. Leur adoption et leur acceptation sociale dépendent toutefois de la capacité des acteurs publics et privés à relever de manière proactive un certain nombre de problèmes sociaux et éthiques qui entravent leur adoption ou qui pourraient se poser plus tard, lorsque l'utilisation des technologies quantiques se sera quelque peu généralisée. Ces problèmes se répartissent en deux grandes catégories : (i) ceux qui *émergent* en raison des nouvelles formes de comportement et de l'élargissement des limites du possible (notamment les risques pour l'infrastructure numérique et la vie privée, l'impact potentiel sur l'environnement et l'exploitation d'idées fausses sur les technologies quantiques) et (ii) ceux qui *existent déjà*, mais qui seront amplifiés par la capacité des technologies quantiques à optimiser des processus familiers (notamment la surveillance et la prise de

décision automatisée) et à élargir la fracture numérique. L'examen des problèmes présenté dans ce chapitre est la première partie d'une vaste analyse des conséquences éthiques, juridiques, sociales et politiques multidimensionnelles des technologies quantiques, également connues sous le nom d'*ELSPI quantiques* (Kop, s.d.). Ce chapitre se concentre sur les questions sociales et éthiques dans le cadre de ces conséquences, tandis que le chapitre 5 passe en revue les conséquences juridiques et politiques interdépendantes.

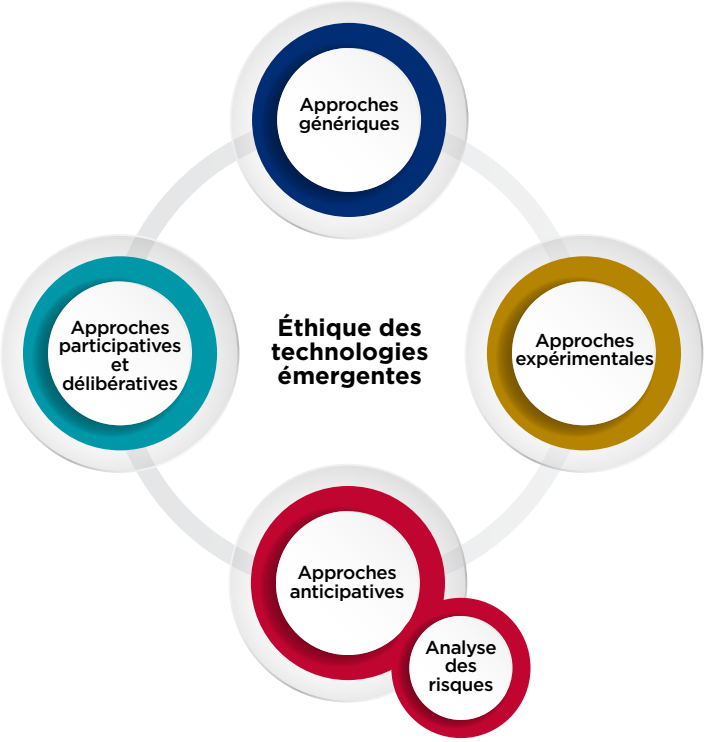
Le présent chapitre se conclut par l'analyse de certains problèmes institutionnels qui nuisent à l'adoption des technologies quantiques par les utilisateurs potentiels, et met l'accent sur le manque de leadership et d'intérêt des secteurs public et privé, ainsi que sur la pénurie de personnel qualifié dans les secteurs qui les adoptent.

4.1 Problèmes éthiques et éthique quantique

Comme beaucoup d'autres technologies, les technologies quantiques peuvent avoir des utilisations à la fois bénéfiques et néfastes. Par exemple, la cryptographie résistante aux méthodes quantiques (QRC) peut améliorer la sécurité et la protection de la vie privée individuelle et collective, mais la capacité des ordinateurs quantiques à contourner la cryptographie actuelle peut faciliter la surveillance de masse et l'accès à des renseignements confidentiels et compromettre l'infrastructure numérique essentielle dans le secteur de la santé, le domaine bancaire et les services publics. Les technologies quantiques sont susceptibles de permettre des percées scientifiques en recherche médicale et en chimie, mais certains acteurs peuvent exploiter la complexité des phénomènes quantiques sous-jacents pour diffuser des renseignements erronés et saper la confiance du public dans le progrès scientifique. En outre, l'accès disparate aux technologies quantiques et à l'expertise nécessaire à leur adoption peut exacerber la fracture numérique entre les communautés, régions et pays.

En raison de la relative nouveauté de ces technologies, les principes éthiques guidant le comportement humain face aux applications bénéfiques et néfastes commencent seulement à émerger. *L'éthique quantique* est un nouveau domaine de l'éthique appliquée, qui se concentre sur le comportement moral dans le domaine des technologies quantiques (Kop, 2021a). Elle « demande aux humains d'agir de manière vertueuse, en respectant les normes de pratique et les normes de conduite éthiques fixées par la communauté quantique, et de faire en sorte que leurs actions ont des conséquences souhaitables, ces dernières étant prioritaires en cas de conflit avec les premières » (Kop, 2021a).

Selon Brey (2017), plusieurs méthodologies sont utilisables pour élaborer des normes de conduite éthique pour les technologies émergentes (figure 4.1).



Source : Brey (2017)

Figure 4.1 Éthique des technologies émergentes

Les **approches génériques** examinent les caractéristiques générales de la technologie, indépendamment de toute application spécifique. Les **approches expérimentales** considèrent l'introduction d'une nouvelle technologie dans la société comme un processus aux conséquences intrinsèquement incertaines. Au lieu de se demander si cette technologie est moralement acceptable, elles se demandent s'il est éthiquement acceptable d'expérimenter cette technologie. Les **approches anticipatives** combinent l'analyse éthique avec des « techniques d'anticipation, de prévision ou d'étude prospective » afin de prévoir et d'analyser les questions éthiques soulevées par les utilisations possibles des technologies émergentes. L'analyse des risques peut être vue comme un sous-ensemble des approches anticipatives, qui comprend l'évaluation des risques, la gestion des risques et l'analyse risques-avantages. Les **approches participatives et délibératives** comptent sur le public ou sur les parties prenantes pour effectuer « une évaluation éthique ou éthiquement éclairée d'une technologie émergente » (Brey, 2017).

Les approches anticipatives ont été approuvées par un certain nombre de chercheurs œuvrant dans le domaine des technologies émergentes (p. ex. Johnson, 2011; Scott et Selin, 2019; Scott et Barlevy, 2022). Selon Brey (2017), ce sont elles qui devraient permettre les évaluations les plus complètes des technologies

émergentes, notamment en raison de leur capacité à intégrer l'analyse des risques et les approches génériques, participatives et délibératives. Elles sont fondamentales pour le tout nouveau cadre d'adoption responsable des technologies quantiques, qui comprend des évaluations de l'impact quantique, la protection et la gouvernance des données, des contrôles d'accès, des mécanismes de droit souple, ainsi qu'une recherche et une innovation responsables (chapitre 7).

4.2 Problèmes éthiques et sociaux nouveaux et émergents

L'adoption plus répandue des technologies quantiques s'accompagne de nouveaux problèmes éthiques et sociaux, qui découlent du fait que les applications commerciales peuvent favoriser de nouvelles formes de comportement et repousser les limites du possible. Ces problèmes incluent les risques pour l'infrastructure numérique et l'atteinte à la confidentialité des données, les impacts potentiels sur l'environnement, ainsi que l'exploitation d'idées fausses sur les technologies quantiques.

4.2.1 Risques pour la sécurité et l'intégrité de l'infrastructure informatique

Le décryptage rétroactif des données et des communications personnelles présente des risques pour la vie privée

L'un des risques pour la vie privée posés par les ordinateurs quantiques est leur capacité à casser les systèmes de chiffrement à clé publique fréquemment utilisés, qui ne sont pas encore décryptables. Selon Campagna *et al.* (2015), les ordinateurs quantiques pourraient porter atteinte aux contrôles de sécurité des catégories suivantes :

1. *Tout système de chiffrement reposant sur la complexité mathématique de la factorisation des nombres entiers et des logarithmes discrets. Cela comprend les chiffrements RSA, DSA, DH, ECDH, ECDSA et autres variantes de ces algorithmes. Il est important de souligner que la quasi-totalité du chiffrement à clé publique des produits et protocoles de sécurité utilisés aujourd'hui font appel à ces types de chiffrement.*
2. *Tout protocole de sécurité dont le fonctionnement repose sur les algorithmes de chiffrement à clé publique mentionnés ci-dessus.*
3. *Tout produit ou système de sécurité dont le fonctionnement repose sur les protocoles mentionnés ci-dessus.*

Le chiffrement protège deux types de données personnelles : les données stockées (c.-à-d. les données en mémoire) et les données envoyées sur Internet (c.-à-d. les données en transition). Certains chercheurs estiment qu'il est relativement facile de créer des systèmes de données en mémoire résistants aux méthodes quantiques, et de nombreux systèmes de chiffrement modernes prennent déjà en compte un possible risque de décryptage (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Les ordinateurs quantiques menaceront très probablement les données en transition qui ont été envoyées sur Internet dans le passé et ont été capturées et archivées par des acteurs non gouvernementaux ou des agences de renseignement (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Bien qu'il n'existe pas de renseignements accessibles au public et fiables sur l'actuelle interception de données en transition, il est raisonnable de supposer que tout message transmis n'importe où dans le monde peut être capté et stocké par une personne ou une agence, pour être déverrouillé dans le futur (Mosca et Munson, s.d.). Si ce risque est réel, il peut également être surestimé, car la réalisation d'une cryptoanalyse nécessitera l'accès à un ordinateur quantique puissant, ainsi que du temps (Hoofnagle et Garfinkel, 2021).

Un ordinateur quantique peut décrypter les clés publiques de l'infrastructure à la base d'importantes fonctions sociétales

Le chiffrement à clé publique rend possibles des fonctions essentielles d'Internet. Il sert à sécuriser les transactions financières et commerciales et à authentifier les utilisateurs et les sites Web (encadré 4.1). En théorie, si un ordinateur quantique pouvait être utilisé pour décrypter les clés publiques de messages chiffrés, il pourrait également décrypter celles de l'infrastructure fondamentale des systèmes de santé, financiers et industriels (Hoofnagle et Garfinkel, 2021; DeNardis, 2022).

Encadré 4.1 Utilisations du chiffrement à clé publique

Le protocole de transfert hypertexte sécurisé (HTTPS) valide l'authenticité des sites Web sécurisés. Ce processus d'authentification — qui dépend également d'autorités de certification tierces pour vérifier les sites et fournir des clés de navigateur — est essentiel pour accéder aux sites et effectuer des transactions en ligne (DeNardis, 2022). Si le certificat est compromis, un pirate pourrait se faire passer pour une banque ou un utilisateur normal, accéder au compte bancaire ou fouiller dans les fichiers d'un utilisateur ou encore activer secrètement le micro et la caméra d'un ordinateur (Hoofnagle et Garfinkel, 2021).

(Continue)

(a continué)

Le protocole d'échange de clés Internet rend possible le protocole de sécurité IP (IPsec) qui, à son tour, est utilisé pour bâtir des réseaux privés virtuels (VPN) (Felsch *et al.*, 2018). IPsec est utilisé sur Internet pour des tâches essentielles, « telles que garantir la confidentialité des renseignements, effectuer le contrôle d'accès, authentifier les sources de données et assurer l'intégrité des données » (DeNardis, 2022). Les communications protégées par IPsec sont souvent utilisées par les entreprises dont les employés accèdent à distance aux ressources internes (Felsch *et al.*, 2018).

Les extensions de sécurité du système des noms de domaine (DNSSEC), qui sont basées sur le système de chiffrement à clé publique RSA, ont été conçues pour protéger le système mondial de noms de domaine (DNS) contre les cyberattaques (DeNardis, 2022). Les DNSSEC appliquent le chiffrement à clé publique au DNS afin de pouvoir attester que l'information qui traduit le nom de domaine en adresse Internet pour localiser le site provient véritablement de ce site (DeNardis, 2022). Des acteurs de la cybermenace pourraient utiliser de faux DNS pour diriger les utilisateurs vers de faux sites Web afin de commettre des fraudes et des délits financiers.

4.2.2 Impacts environnementaux des technologies quantiques

Les matériaux et nanomatériaux de faibles dimensions (p. ex. les points quantiques semiconducteurs adimensionnels, les nanofils semiconducteurs ou les nanotubes de carbone) offrent des promesses pour les technologies quantiques (Alfieri *et al.*, 2022). Les nanomatériaux peuvent, entre autres, améliorer la cohérence des qubits ainsi que la pureté et la luminosité des émetteurs quantiques, et servir ainsi de conduits à la détection et à l'imagerie quantiques (Alfieri *et al.*, 2022). Il s'agit toutefois d'une arme à double tranchant. Les propriétés uniques qui les rendent utiles pour la conception de produits, telles que leur taille et leur forte réactivité, soulèvent également des craintes sur le plan de l'environnement et de la sécurité (NIEHS, 2021). Par exemple, les nanotechnologies peuvent permettre aux capteurs de détecter de minuscules quantités de vapeurs chimiques; cependant, il est souvent impossible de détecter des éléments de la taille des nanoparticules dans l'air. Cette impossibilité est préoccupante pour la santé et la sécurité des employés qui utilisent des nanomatériaux sur leur lieu de travail (NIEHS, 2021). De plus, l'emploi de nanomatériaux par l'industrie quantique peut accroître le volume de nanoparticules rejetées dans l'environnement.

Les principaux défis de la recherche sur les matériaux nanométriques sont la détermination de leur quantité, l'évaluation de la réaction biologique et la mesure du niveau d'exposition et de risque (NIEHS, 2022). En 2022, Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada ont publié une ébauche de Cadre pour l'évaluation des risques associés aux nanomatériaux manufacturés, prescrite par la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)* (LCPE) (ECCC et SC, 2022). Ce cadre prévoit que les conclusions sur une substance tirée de l'évaluation peuvent différer selon sa forme (p. ex. forme chimique traditionnelle ou forme de nanomatériau ou encore variations entre les différentes formes à l'échelle nanométrique). Les scientifiques gouvernementaux ont l'intention d'utiliser une approche fondée sur le poids des données probantes pour décider si un nanomatériau libéré dans l'environnement est jugé comme toxique au sens de la LCPE (ECCC et SC, 2022). S'il est adopté, ce cadre pourrait déterminer la manière dont le gouvernement réglementera les nanomatériaux employés dans les technologies quantiques, ainsi que les évaluations des risques pour l'environnement et la santé humaine. Le cadre n'avait pas encore été adopté en septembre 2023.

4.2.3 Exploitation d'idées fausses sur les technologies quantiques

Les technologies quantiques sont fondamentalement différentes des autres technologies perturbatrices, telles que les nanotechnologies ou l'IA, en raison de leur capacité perçue à opérationnaliser les principes de la mécanique quantique (chapitre 1). Si leur prolifération (et la capacité des ordinateurs quantiques à résoudre certains problèmes normalement compliqués) a suscité un intérêt dans les principes de la mécanique quantique, les spécialistes — et encore moins les non-spécialistes — ont du mal à comprendre et à expliquer leur fonctionnement et ce qu'elles permettraient de réaliser (Aaronson, 2021). Par exemple, un exercice de dialogue avec la population mené en 2017 au Royaume-Uni a révélé que le public connaissait le mot *quantique*, mais comprenait mal comment il s'appliquait aux technologies quantiques (EPSRC, s.d.). Et le fait que la recherche quantique soit dominée par des organismes publics et privés spécialisés, notamment par les agences de défense et de renseignement, contribue à l'atmosphère de mystère et de secret qui entoure les technologies quantiques.

L'exploitation d'idées fausses sur les technologies quantiques peut alimenter la peur et saper la confiance du public

Certains acteurs peuvent exploiter la complexité scientifique de la mécanique quantique pour faciliter la diffusion et l'acceptation par le public d'informations erronées[11] sur les technologies quantiques, ce qui peut conduire à des controverses

11 La mésinformation comprend « les informations fausses ou trompeuses partagées par inadvertance (mésinformation proprement dite) et les informations fausses ou trompeuses délibérément créées ou partagées (désinformation) » (CAC, 2023).

publiques. Des leçons peuvent d'ailleurs être tirées des incidents alimentés par la mésinformation, tels que les attaques contre les tours 5G au Royaume-Uni (Parveen et Waterson, 2020), les comportements antivaccins et la tentative d'attentat à la bombe contre les installations de nanotechnologie d'IBM en Suisse (FEM, 2022b).

En plus de nuire à la réputation, voire à l'intégrité physique des chercheurs et des organisations travaillant dans le domaine quantique, la mésinformation pourrait éroder la confiance du public dans les technologies quantiques (FEM, 2022b). Dans ce contexte, le renforcement de la confiance du public peut nécessiter l'allocation de fonds publics pour confirmer des résultats de recherche déjà établis. Par exemple, dans l'Union européenne, la recherche sur la sécurité des aliments génétiquement modifiés a bénéficié d'un important financement accordé à la suite de la controverse publique sur les organismes génétiquement modifiés (OGM) (Ryan *et al.*, 2020). Entre 1982 et 2010, la Commission européenne a dépensé plus de 300 millions d'euros en recherche sur l'innocuité des OGM, qui a conduit les scientifiques à conclure que la biotechnologie n'était pas plus risquée que les procédés de sélection végétale couramment employés (CE, 2010).

Le battage médiatique peut nuire à l'adoption des technologies quantiques

L'adage connu sous le nom de *loi d'Amara*, du nom du chercheur et prévisionniste américain Roy Amara, stipule que :

> *Nous avons tendance à surestimer l'effet d'une technologie à court terme et à sous-estimer son effet à long terme.*

À long terme, il est extrêmement probable que les technologies quantiques — et l'informatique quantique en particulier — seront incroyablement perturbatrices et transformatrices, et qu'elles auront une incidence sur la société d'une manière impossible de prévoir actuellement. Cependant, comme pour de nombreuses technologies, les technologies quantiques font l'objet d'un immense battage médiatique. D'une manière générale, ce battage comprend des « affirmations exagérées, excessives ou trompeuses » sur les capacités de diverses technologies quantiques, ou sur leur utilité ou leur potentiel de transformation pour certaines applications ou industries (Ezratty, 2022). Ces affirmations émanent souvent de vendeurs de technologies quantiques et d'analystes qui promettent des avantages aux entreprises clientes et aux investisseurs, et peuvent être motivées par des attentes exagérées concernant le marché potentiel de ces technologies. Le battage autour des technologies quantiques peut également être motivé par la nature relativement impénétrable et par « l'étrangeté » inhérente aux phénomènes quantiques, qui sont susceptibles de conduire à une « pensée magique » et à des références à la science-fiction (Ezratty, 2022).

Le battage technologique n'est pas mauvais en soi; il peut contribuer à stimuler la recherche et l'innovation ainsi qu'à attirer des fonds des secteurs privé et public. Cependant, un battage qui promet trop par rapport à ce que la technologie est en mesure de fournir peut également avoir un effet négatif sur les progrès dans le domaine, et entraîner une baisse de la recherche et de l'investissement, qui pourrait aboutir à un « hiver quantique » similaire à l'« hiver de l'IA » des années 1980 et 1990 (Hoofnagle et Garfinkel, 2021; Ezratty, 2022). De l'avis du comité d'experts, les craintes d'un « hiver quantique » à court terme ne sont probablement pas fondées, étant donné la grande concurrence géopolitique en matière de technologies quantiques.

Les doutes des décideurs politiques quant aux promesses des technologies quantiques pourraient conduire à l'impréparation de l'infrastructure cruciale pour l'avènement de l'informatique quantique. Par exemple, des retards dans l'adoption de la QRC seraient préjudiciables à la cybersécurité et à la protection de la vie privée individuelle et collective. Cet effet potentiellement néfaste du battage médiatique souligne la nécessité d'apporter des réponses politiques fondées sur les données probantes aux risques et aux occasions présentés par les technologies quantiques. Éviter la surenchère dans les messages sur ces technologies est l'une des tactiques permettant de limiter la propagation de la mésinformation et d'accroître la confiance du public dans la science quantique dans le cadre de la recherche et de l'innovation responsables (chapitre 7).

4.3 Problèmes éthiques et sociaux exacerbés par l'adoption des technologies quantiques

L'adoption généralisée des technologies quantiques pourrait exacerber un certain nombre de problèmes éthiques et sociaux bien connus, notamment les atteintes à la vie privée, la discrimination individuelle et collective et d'autres formes d'injustice. Elle pourrait également accroître la fracture numérique en raison, entre autres, des disparités dans l'accès à ces technologies.

4.3.1 Atteintes à la vie privée

La détection quantique présente des risques pour la vie privée

Le plus grand risque à court terme pour la vie privée découle des progrès de la détection quantique (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Certains dispositifs de détection quantique devenant plus petits et moins coûteux, ils peuvent servir à améliorer le recueil de renseignements et la surveillance dans les espaces publics. Par exemple, l'éclairage quantique peut faciliter la surveillance et le filmage constants et répandus des gens dans les espaces sombres et la nuit. De même, les magnétomètres sensibles permettront de détecter à distance des objets cachés

(p. ex. dans une maison ou un véhicule) ou exposés. Contrairement aux recherches physiques, qui ciblent certaines personnes ou certains objets pendant une durée limitée, la recherche par capteurs quantiques peut s'effectuer secrètement, à distance et en continu. La capacité des détecteurs à voir à travers les toits et les murs, voire à l'intérieur du corps humain, rendent inefficaces les barrières physiques contre les intrusions quantiques dans la vie privée (Hoofnagle et Garfinkel, 2021).

Les forces de l'ordre locales peuvent utiliser des dispositifs de surveillance puissants conçus à des fins de renseignement et des fins militaires pour recueillir des données et des informations sur la vie quotidienne des gens (Koller, 2019). Ces données et informations sont souvent utilisées de manière clandestine et posent des problèmes de contrôle démocratique et de responsabilité (Crump, 2016; Robertson *et al.*, 2020) (encadré 4.2).

Encadré 4.2 Utilisation de logiciels espions par la GRC

En 2022, le Comité permanent de l'accès à l'information, de la protection des renseignements personnels et de l'éthique de la Chambre des communes a entamé une étude spéciale sur les dispositifs et logiciels espions que la GRC utilise pour mener des activités de surveillance ou recueillir des données au cours d'enquêtes (Aiello, 2022). Des craintes sont apparues après que la Chambre des communes du Canada a reçu des documents décrivant comment la police utilisait « secrètement et à distance » des logiciels espions pour accéder aux textos, aux communications privées, aux micros et aux caméras des téléphones des suspects au lieu de recourir à l'écoute téléphonique ou à d'autres techniques d'enquête moins intrusives (Aiello, 2022).

À la lumière de ces faits, les députés et l'Association canadienne des libertés civiles se sont inquiétés du manque de renseignements sur la manière dont les forces de l'ordre utilisent des logiciels espions durant des enquêtes ciblées et sur les circonstances de leur emploi. McPhail (2022) a notamment posé les questions suivantes :

- *Quels types d'enquêtes sont jugées suffisamment sérieuses pour utiliser des outils aussi invasifs?*
- *Quels outils sont utilisés et qui les fournit ?*
- *Quels sont les processus internes de décision et d'autorisation entrepris pour autoriser cette option nucléaire pour la surveillance des Canadiens?*

Les puissantes technologies de détection mises au point à des fins répressives peuvent également se retrouver entre les mains d'acteurs privés, ce qui exacerbe les problèmes de responsabilité et de transparence. Par exemple, le renseignement électromagnétique (SIGINT) est considéré comme une fonction intrinsèquement gouvernementale (Weinbaum *et al.*, 2017). Auparavant, seuls les gouvernements disposaient des ressources et des pouvoirs légaux pour mener des activités de SIGINT afin de recueillir des informations sur les communications, les dispositifs électroniques ou les instruments étrangers. Mais au fil du temps, les outils de SIGINT ont fait leur apparition dans le commerce. Ils peuvent désormais être utilisés par des acteurs privés pour exercer des activités posant des risques pour la vie privée et la sécurité nationale, comme « la cartographie du spectre radiofréquence; l'écoute, le brouillage et le détournement des communications par satellite et la cybersurveillance » (Weinbaum *et al.*, 2017). Les enquêtes sur l'utilisation de logiciels espions mercenaires révèlent que les outils technologiques privés facilitent les activités de recueil de renseignements et de surveillance commanditées par l'État (Deibert, 2022). Des entreprises technologiques privées pourraient à l'avenir exploiter les possibilités offertes par les technologies quantiques à des fins illicites.

La création de sens quantique présente des risques pour les droits et libertés constitutionnels, ainsi que pour la vie privée

Les services de renseignement, les forces de l'ordre et d'autres acteurs peuvent soumettre les données et les informations à un examen et à une contextualisation quantiques, également connus sous le nom de processus de *création de sens* (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Par exemple, combinés à l'apprentissage machine, les capteurs à quantum unique pourraient améliorer la séparation aveugle des signaux, une technique utilisée pour attribuer les voix aux locuteurs dans des environnements bruyants et encombrés. Jusqu'ici, l'anonymat relatif de la foule permettait de protéger l'identité des participants aux manifestations de masse contre les forces de l'ordre, les employeurs et des groupes et organisations susceptibles d'infliger des préjudices aux manifestants. En réduisant le risque de représailles, l'anonymat permettait « l'exercice des libertés fondamentales d'expression, de réunion pacifique et d'association » (Robertson *et al.*, 2020). La capacité des instruments de séparation aveugle des signaux à identifier des individus à partir du son de leur voix lors d'un rassemblement public amoindrit la protection de la vie privée offerte par l'anonymat de la foule et peut avoir un effet paralysant sur les droits et libertés constitutionnels.

En outre, l'informatique quantique pourrait être utilisée pour optimiser les instruments analytiques d'apprentissage machine qui prétendent prévoir la personnalité (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Les entreprises de médias sociaux,

les publicitaires, les agences d'évaluation du crédit, les compagnies d'assurance et d'autres entreprises incitées à la surveillance pourront tirer parti des ordinateurs quantiques pour créer des profils plus précis des individus et analyser davantage de données historiques. Les ordinateurs quantiques sont susceptibles de perpétuer la marchandisation des données personnelles (Zuboff, 2019; Krishnamurthy, 2022) en rendant « les désirs, la personnalité et la vie des individus plus lisibles pour les décideurs puissants » (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). En fin de compte, l'informatique quantique accentuera les déséquilibres de pouvoir actuels, car les gens ordinaires n'auront, eux, pas le même accès à des technologies plus efficaces et à de meilleures informations pour contrôler les entreprises (Hoofnagle et Garfinkel, 2021).

4.3.2 Technologies quantiques et fracture numérique

L'abus de position dominante par des entreprises établies peut créer des disparités dans l'accès aux technologies

Les recherches menées aux États-Unis montrent que les grandes entreprises utilisent des technologies de l'information exclusive pour accroître leur domination sur le marché (Bessen, 2022a). Les investissements considérables des institutions financières, des détaillants et des compagnies d'assurance dans des logiciels exclusifs permettent aux grandes entreprises de surpasser leurs concurrents, y compris les entreprises en démarrage innovantes (Bessen, 2022b). Outre leurs ressources financières, les grandes entreprises profitent également d'une vaste clientèle, de services complémentaires et de l'analyse des mégadonnées pour améliorer leurs technologies exclusives, étouffer les innovations introduites par des entreprises plus petites et plus récentes ou freiner la croissance de ces dernières (Bessen, 2022b).

Malgré le nombre croissant d'entreprises en démarrage et de PME dans le secteur quantique, ce dernier suit la tendance des marchés numériques, dans lesquels de grosses entreprises technologiques — Microsoft, Amazon, Google, IBM, Intel et Quantinuum (collectivement appelées « MAGIIQ ») — établissent et assurent leur domination (MacQuarrie *et al.*, 2020; Dekker et Martin-Bariteau, 2022). Ces entreprises peuvent accroître leur clientèle en acquérant des entreprises d'informatique quantique plus petites afin d'éliminer la concurrence potentielle ou en offrant un accès aux processeurs quantiques par le biais de l'informatique quantique en tant que service (QCaaS) (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). Ayant établi leur position dominante sur le marché, les MAGIIQ peuvent influencer la capacité des individus et des organisations à accéder aux QCaaS en dictant les prix et les conditions d'utilisation. La concentration de la QCaaS entre les mains de quelques entreprises peut créer des disparités dans l'accès à la technologie entre

les groupes économiquement favorisés et défavorisés, et entre les utilisateurs de différents pays et régions du monde. L'abus de position dominante est particulièrement important pour les utilisateurs du Canada, car la plupart des grandes entreprises donnant accès aux technologies quantiques sont situées à l'étranger. Cette vulnérabilité est aggravée par la politique de concurrence relativement faible du Canada. L'application et la mise en œuvre du droit de la concurrence peuvent favoriser les principaux acteurs du marché, à condition qu'ils exercent leur pouvoir dans le respect de la loi (chapitre 5).

Les pouvoirs publics ne soutiennent pas suffisamment la production et la diffusion de produits quantiques au pays

Selon la *Stratégie quantique nationale* (SQN), le gouvernement du Canada financera les entreprises quantiques à hauteur de 70 millions de dollars, par l'intermédiaire d'un réseau d'organismes de développement régional. Développement économique Canada pour le Pacifique, Développement économique Canada pour les Prairies et l'Agence fédérale de développement économique pour le sud de l'Ontario ont commencé à accepter des demandes en 2022, et le Québec devrait également recevoir des fonds (Hemmadi, 2023; ISDE, 2023d). Dans le même temps, certaines régions sont exclues du système de financement — comme il est indiqué au chapitre 3, la concentration géographique des entreprises et des chercheurs du domaine quantique peut entraîner des disparités à l'échelle du pays; les utilisateurs finaux situés dans les grappes quantiques peuvent avoir accès aux ressources et à l'expertise qui facilitent la diffusion et l'adoption technologiques. Bien que l'accès à distance puisse démocratiser la disponibilité de l'informatique quantique, l'utilisation de la technologie pour des tâches particulière (p. ex. la simulation ou l'optimisation) nécessite l'expertise des utilisateurs finaux, qui peut être répartie de manière inégale à travers le Canada. En l'absence d'interventions politiques spécifiques, la diffusion de technologies en grappes pourrait priver certaines régions et communautés de la possibilité de profiter pleinement des avantages économiques et sécuritaires offerts par les technologies quantiques, ce qui aggravera la fracture numérique.

Les disparités dans l'accès aux communications sécurisées peuvent exacerber la fracture numérique

Le recours au chiffrement pour sécuriser les communications est crucial pour la protection des données, l'accès à l'information et la liberté d'expression. Le chiffrement protège les données et les opinions privées de la surveillance extérieure, ce qui est particulièrement important dans certains contextes politiques et juridiques (Kaye, 2015). Face aux risques importants de cybersécurité posés par l'informatique quantique, les participants aux consultations publiques

sur les technologies quantiques au Royaume-Uni se sont inquiétés de la fracture numérique entre les personnes qui auront accès à des réseaux de communication résistants aux méthodes quantiques et celles qui n'y auront pas accès (EPSRC, s.d.).

Au Canada, par exemple, la SQN prévoit qu'un « un réseau national de communications quantiques combiné à la cryptographie post-quantique », construit sur une architecture terrestre et satellitaire, pourrait améliorer la sécurité de l'infrastructure et le partage des renseignements (ISDE, 2023d). Cependant, les efforts du gouvernement fédéral pour assurer la connectivité Internet à haute vitesse universelle dans tout le pays n'ont pas permis de procurer un accès équitable à l'infrastructure numérique, ce qui désavantage certaines régions rurales et éloignées (CAC, 2021).

À l'échelle mondiale, les nouveaux éléments d'infrastructure de réseau accessibles dans certains pays en développement pourraient réduire le coût de la mise à niveau vers la QRC. Toutefois, les disparités mondiales en matière d'accès à la technologie et à l'expertise auront probablement pour conséquence que les pays à hauts revenus obtiendront un « avantage stratégique, tandis que d'autres nations tomberont dans la "pauvreté quantique" » (FEM, 2020). Par exemple, les scientifiques quantiques des pays à hauts revenus travaillent à des solutions de stockage de données hybrides combinant chiffrement classique et chiffrement quantique, et à la conception de réseaux de communications pouvant être adaptés de façon à être utilisés dans des zones locales et métropolitaines (VeriQloud, s.d.-a, s.d.-b). Les politiques protectionnistes en matière de commerce et de propriété intellectuelle visant à garantir un avantage quantique national peuvent étouffer davantage les collaborations internationales et l'accès équitable à la technologie. De plus, la fracture numérique pourrait constituer un obstacle important à l'exploitation de tous les avantages économiques et sociétaux des technologies quantiques (FEM, 2020).

L'adoption des technologies quantiques peut entraîner la transformation ou la perte d'emplois

La robotique, l'IA et les autres formes d'automatisation et d'optimisation des flux de travail sont une arme à double tranchant. Si elles créent une demande de nouveaux emplois, elles rendent également obsolètes des emplois existants ou conduisent à des transformations d'emplois dues à l'automatisation. Selon Frenette et Frank (2020), en 2016, 10,6 % des travailleurs au Canada couraient un risque élevé (70 % ou plus) de voir leur emploi transformé en raison de l'automatisation, et 29,1 % un risque modéré (entre 50 et 70 %). Plusieurs catégories de personnes, notamment les travailleurs âgés (55 ans et plus), ceux qui n'ont pas suivi d'études postsecondaires ou ceux qui travaillent dans le secteur manufacturier, risquent davantage d'être touchés (Frenette et Frank, 2020).

D'après les résultats d'une consultation publique sur les technologies quantiques menée au Royaume-Uni, les pertes d'emplois dans les fonctions analytiques et logistiques sont perçues comme des risques pressants et à court terme posés par les technologies quantiques (EPSRC, s.d.) (encadré 4.3).

Encadré 4.3 Optimisation logistique du port de Los Angeles

Le port de Los Angeles est le plus grand centre américain de manutention de marchandises transportées par bateau. Il a exploité la puissance de calcul de D-Wave pour optimiser sa logistique au quai 300, l'un de ses plus grands terminaux (D-Wave, 2022). Pour cela, il avait préalablement utilisé le moteur Hyper-Optimized Nodal Efficiency (HONE) pour traiter des données provenant de plus de 100 000 opérations de manutention différentes, selon un ensemble de scénarios réels et hypothétiques, afin de déterminer les possibilités. Depuis, le terminal utilise près de 40 % moins de grues pour le déchargement, et chacune des grues parcourt quotidiennement une distance moyenne considérablement réduite. Elles ont également augmenté leurs livraisons de plus de 50 %, et chaque camion passe près de 10 minutes de moins à réceptionner la charge utile au terminal (D-Wave, 2022). On peut soutenir que le port aurait pu utiliser un programme classique pour optimiser la logistique, mais il a choisi la solution de recuit de D-Wave parce que l'équipe de projet la connaissait bien (QCR, 2022b).

Parallèlement, l'utilisation croissante de l'automatisation et de la robotique est une question complexe. Il faut tenir compte à la fois du désir du secteur privé d'accroître l'efficacité de la gestion de la chaîne d'approvisionnement et de l'impact de l'optimisation des flux de travail sur la main-d'œuvre. Par exemple, pour aider le personnel du port de Los Angeles, le gouvernement californien a financé le Goods Movement Training Campus, un centre de formation destiné aux chauffeurs de camion, aux mécaniciens, aux soudeurs et à d'autres personnes susceptibles de nécessiter un perfectionnement ou un recyclage à cause de l'automatisation, et a créé des possibilités de perfectionnement professionnel pour les futurs employés (Spectrum News 1, 2022).

4.3.3 Biais et manque d'explicabilité

L'apprentissage machine quantique peut exacerber la discrimination ou d'autres types d'injustices résultant de la prise de décision automatisée. L'une des raisons pour lesquelles les systèmes d'IA actuels produisent des résultats déformés, inexacts ou discriminatoires est que les ensembles de données et les modèles disponibles font de l'IA une technologie biaisée à sa conception (Robertson *et al.*, 2020; CAC, 2022; Crawford, 2022). Les personnes et les groupes marginalisés et racisés sont touchés de manière disproportionnée par l'IA entraînée sur de *mauvaises données* (c.-à-d. manquantes, incorrectes ou incohérentes) (Richardson *et al.*, 2019). Les chercheurs ont constaté que l'utilisation de l'IA pour prendre des décisions d'embauche était discriminatoire à l'égard des femmes (Dastin, 2018) et des personnes souffrant d'un handicap physique ou mental (Fruchterman et Mellea, 2018). L'IA a perpétué la discrimination à l'égard des Noirs dans divers milieux, notamment dans les soins de santé (Obermeyer *et al.*, 2019), le système de justice pénale (Robertson *et al.*, 2020) et la modération de contenu en ligne (Sap *et al.*, 2019). Au Canada, les pratiques de collecte et de traitement des données sont souvent discriminatoires à l'égard des peuples autochtones (Robertson *et al.*, 2020) et minimisent ou ignorent leur savoir et leur expérience (CAC, 2022). Toutefois, les modèles de financement actuels permettent à certaines institutions de définir le programme de la recherche et d'extraire des données propres à ces peuples tout en minimisant les répercussions négatives potentielles de ces pratiques sur leurs communautés (GC, 2019).

Le manque de diversité raciale et de genre en science, technologie, génie et mathématiques (STGM) (section 4.4.2) pourrait également aggraver les biais dans les systèmes automatisés de prise de décision fondés sur les technologies quantiques. Il est possible de tirer des leçons de nombreuses applications de l'IA — notamment dans la reconnaissance faciale, la reconnaissance vocale et les outils d'embauche — le manque de diversité dans cette industrie s'étant répercuté sur les processus de sélection des données et de conception des technologies et ayant abouti à des résultats biaisés à l'encontre des femmes et des personnes minorisées ou racisées (West *et al.*, 2019; Stinson, 2022).

L'utilisation de mauvaises données pour former des systèmes décisionnels reposant sur les technologies quantiques exacerbera les inégalités existantes en raison d'une corrélation inverse entre la capacité d'apprentissage et d'explication dans l'apprentissage machine (c.-à-d. que les systèmes d'apprentissage les plus puissants trouvent les connexions les moins explicables et les moins prévisibles) (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). En l'absence de mesures de gouvernance spéciales, les applications qui sont déjà sujettes à des biais peuvent le devenir encore plus.

4.4 Problèmes institutionnels entravant l'adoption des technologies quantiques

Bien que les technologies quantiques n'en soient encore qu'aux premiers stades de développement, certaines applications (p. ex. la détection, la métrologie et certaines formes d'informatique quantique) sont suffisamment mûres pour offrir des avantages sur le plan de l'efficacité et de la sécurité aux utilisateurs potentiels. Malgré cela, l'adoption de ces technologies dans les secteurs privé et public au Canada reste relativement faible. Des obstacles tels que le manque de soutien ou d'intérêt des secteurs public et privé pour les technologies quantiques et la pénurie de personnel qualifié dans les secteurs qui les adoptent peuvent limiter la vitesse et l'étendue de leur adoption.

4.4.1 Manque de leadership et d'incitations dans les secteurs public et privé

Les gouvernements peuvent mobiliser un certain nombre d'instruments — tels que les marchés publics, les encouragements à la consommation ou les normes réglementaires — pour stimuler la demande de produits innovants (Edler *et al.*, 2016; Meckling et Nahm, 2018). La mise en œuvre d'instruments de politique d'innovation en ce qui concerne la demande présente plusieurs avantages. Premièrement, à la suite des réductions des dépenses publiques provoquées par la crise financière de 2008, les décideurs politiques ont manifesté un intérêt croissant pour les instruments d'innovation ayant trait à la demande, en particulier pour les marchés publics, afin d'accroître l'efficacité des dépenses (Kundu *et al.*, 2020). Deuxièmement, en se concentrant sur les utilisateurs finaux au lieu des producteurs, les instruments relatifs à la demande pourraient corriger certaines faiblesses de la politique canadienne d'innovation axée sur l'offre, telles que l'absence de stratégies de diffusion des technologies et la capacité réduite du marché à adopter les innovations (Edler, 2019). Troisièmement, les instruments concernant la demande permettraient aux gouvernements de mieux déterminer l'orientation de la politique d'innovation (c.-à-d. de l'adapter à d'importants problèmes sociaux, environnementaux et économiques) (Mazzucato, 2018). Les gouvernements peuvent, par exemple, tirer parti de leurs « demandes complexes et de leur pouvoir d'achat suffisant » (Uyarra *et al.*, 2020) pour guider la formation des marchés des technologies quantiques et déterminer l'orientation de leur développement. De l'avis du comité, cet élément est particulièrement intéressant étant donné la nécessité potentielle d'une intervention gouvernementale pour corriger les problèmes sociaux et éthiques causés par les technologies quantiques.

Le gouvernement du Canada a mis du temps à adopter des instruments stimulant la demande d'innovation

Malgré les avantages des instruments d'innovation axés sur la demande, le gouvernement du Canada a été lent à les adopter (Southin, 2022). Un comité indépendant formé en 2010 par le gouvernement fédéral dans le but d'examiner le soutien fédéral à la R-D des entreprises (GC, 2011) — également connu sous le nom de comité Jenkins — a conclu que le Canada s'appuyait fortement sur les instruments d'innovation concernant l'offre qui « compensent le coût des intrants du processus d'innovation de l'entreprise privée » (Southin, 2022), tels que les investissements dans la R-D, les compétences, les conseils et les services techniques (Edler *et al.*, 2016; Edler, 2019). Cependant, dans le contexte canadien, ces instruments n'ont pas réussi à inciter le privé à s'engager dans des programmes d'innovation (GC, 2011; Breznitz, 2021). Malgré l'importance des dépenses publiques consacrées à la R-D et à la science, l'industrie canadienne affiche un faible taux d'adoption des technologies et d'investissement dans l'innovation (Breznitz, 2021).

Les entreprises en démarrage et les PME technologiques se heurtent à des obstacles pour accéder aux marchés publics fédéraux

Les marchés publics sont l'achat de biens, de services et de travaux externes par les ministères et les organismes gouvernementaux. Au Canada, ils représentaient 14,6 % du PIB national en 2020 (OCDE, s.d.). À ce titre, ils pourraient constituer un instrument politique important pour encourager l'adoption des technologies quantiques, en particulier lorsque le secteur privé n'est pas disposé à agir en tant que premier acheteur (ISDE, 2022d). Toutefois, les entreprises en démarrage et les PME canadiennes qui travaillent dans des domaines technologiques en rapide évolution constatent plusieurs obstacles politiques qui limitent leur capacité à participer au processus de passation de marchés.

Tout d'abord, la domination des fournisseurs de technologies en place fait qu'il est difficile pour les entreprises en démarrage quantiques de se qualifier pour les contrats du gouvernement fédéral et d'entrer sur le marché, ce qui limite leur liberté d'action (chapitre 5). Les PME qui fournissent des biens et des services au gouvernement fédéral présentent souvent des caractéristiques similaires (OGGO, 2018). Il s'agit généralement d'entreprises établies qui se sont développées avant d'accéder aux possibilités de marchés fédéraux. Ces entreprises « se concentrent de manière disproportionnée dans les secteurs axés sur les connaissances et sur la technologie, ainsi que dans le secteur de la construction » (OGGO, 2018). En outre, les possibilités de marchés publics fédéraux sont mal adaptées aux technologies quantiques, qui en sont au stade du prototype et ne peuvent pas répondre aux

exigences gouvernementales standard en matière de services ou de produits facilement disponibles (Donahue, 2009). Le gouvernement du Canada a introduit de nouveaux programmes d'approvisionnement qui visent à offrir des conditions plus souples pour les technologies émergentes; toutefois, la faiblesse des montants alloués à ces programmes limite leur aptitude à influencer significativement la commercialisation et l'adoption des technologies quantiques (chapitre 6).

Deuxièmement, le gouvernement du Canada fait appel au secteur privé une fois que les décisions sur les technologies à acquérir ont déjà été prises, plutôt qu'au début du processus d'acquisition (OGGO, 2018). En raison d'exigences particulières et prescriptives en matière de marchés publics, seules certaines entreprises familiarisées avec le processus peuvent répondre à des offres fédérales. En outre, il est difficile pour les services d'approvisionnement gouvernementaux de rédiger des cahiers des charges moins restrictifs pour un produit innovant sans participation de l'industrie. Cette dernière peut toutefois fournir des connaissances et de l'expertise sur les technologies et les solutions de pointe (OGGO, 2018).

Enfin, si certaines entreprises en démarrage technologiques considèrent la participation précoce comme une occasion d'accéder aux offres du gouvernement, d'autres craignent que la création d'un plus grand nombre d'allers-retours dans le processus de passation de marchés augmente le coût des affaires, car « le gouvernement sollicite de plus en plus les commentaires de l'industrie par le biais de demandes de renseignements, de consultations et d'ébauches de demandes de propositions » (OGGO, 2018). De l'avis de certaines PME, « cela revient à de la consultation gratuite. C'est une perte de temps et d'argent » (OGGO, 2018). À l'inverse, consulter l'industrie tôt dans le processus peut présenter des avantages pour les grandes entreprises, car leurs représentants ont les moyens d'y participer.

Les nouveaux programmes visant à stimuler l'adoption des technologies par le secteur public se heurtent à des difficultés

Après la publication du rapport du comité Jenkins en 2011, le gouvernement du Canada a commencé à réformer ses instruments politiques d'innovation, en partie pour accroître le rôle des marchés publics dans l'adoption des technologies (Crisan, 2020). Le budget 2018 a consolidé certains programmes d'innovation gouvernementaux au sein de Solutions innovatrices Canada (SIC), une initiative administrée par ISDE (FIN, 2018). En vertu de SIC, les ministères et les organismes lancent des appels à propositions à l'intention des PME pour qu'elles fournissent divers services ou biens (chapitre 6).

Malgré quelques projets réussis, cette initiative n'atteint pas ses objectifs de dépenses. En 2017, lorsqu'elle a été lancée, le gouvernement fédéral devait dépenser environ 100 millions de dollars par an dans différents projets d'innovation (Hemmadi, 2022). En 2022, les dépenses allouées ont été portées à 113,8 millions annuellement. Pourtant, en quatre ans, de mars 2017 à mars 2021, les ministères et organismes fédéraux n'ont consacré que 102,6 millions aux défis de SIC, soit moins que ce qu'ils étaient tenus de dépenser pour la seule année 2022. Une grande partie du déficit de dépenses de SIC est attribuable au ministère de la Défense nationale (MDN), qui a pour mandat de dépenser 65 millions par an, mais qui n'a dépensé que 3,38 millions durant l'exercice 2019–2020 et 4,9 millions durant l'exercice 2020–2021. Cela s'explique en partie par le fait que le MDN dispose d'Innovation pour la défense, l'excellence et la sécurité (IDEeS), un programme similaire à SIC, dans le cadre duquel il a engagé près de 12,5 millions de dollars en 2020–2021 (Hemmadi, 2022). En avril 2022, IDEeS a versé 8,2 millions à des innovateurs travaillant à la mise au point de technologies de détection quantique (ISDE, 2023d).

Le manque de concurrence dans le secteur des télécommunications pourrait ralentir l'adoption des technologies quantiques

Le secteur des télécommunications est souvent cité comme l'un des premiers à adopter les technologies quantiques au Canada (chapitre 2). Toutefois, le manque de concurrence entre les fournisseurs nationaux pourrait freiner l'adoption des technologies quantiques. Certaines recherches montrent que l'ampleur de la concurrence sur le marché auquel une entreprise fait face influence sa décision de recourir ou non à l'innovation technologique comme principale stratégie de développement commercial. La forte concentration peut freiner l'innovation en éliminant les incitations créées par la concurrence (CAC, 2009). À partir de six indicateurs de rivalité commerciale[12], Geroski (1990) a conclu que « le monopole réel a un effet inhibiteur indubitable et que la rivalité a un effet stimulant indubitable sur la capacité d'innovation ».

La concurrence entre les opérateurs historiques du Canada est très limitée; celle qui existe est en grande partie due à l'intervention réglementaire dans la fourniture de services en gros (CRTC, 2015, 2020). Dans ce contexte, les opérateurs historiques établis peuvent être peu motivés à tirer parti de l'innovation pour lutter pour une part du marché national. L'absence de concurrence dans le secteur des communications canadien peut avoir un effet négatif sur l'adoption de

12 Le degré de pénétration du marché par les nouveaux arrivants, la part de marché des importations, le nombre relatif de petites entreprises, les variations de concentration, la part de marché des entreprises sortantes et le taux de concentration.

technologies qui pourraient grandement améliorer la sécurité des données et des communications (p. ex. les réseaux QKD à longue distance et la QRC).

Les grandes banques canadiennes adoptent des innovations technologiques implantées ailleurs, à condition que les risques et les avantages soient bien connus

Plusieurs rapports citent le secteur financier parmi les principaux secteurs à adopter les technologies quantiques (chapitre 2). Toutefois, comme dans le cas des télécommunications, l'état de la concurrence peut influer sur la rapidité de l'adoption. D'une part, le système bancaire canadien présente une forte concentration; les six plus grandes banques, connues sous le nom de Big Six (Banque de Montréal, Banque Scotia, Banque canadienne impériale de commerce, Banque Nationale du Canada, Banque Royale du Canada et Banque Toronto Dominion), contrôlaient environ 90 % de l'ensemble des actifs bancaires entre 1996 et 2015 (McKeown, 2017). Par contre, contrairement aux télécommunications, il n'existe pas de preuves concluantes de l'état de la concurrence dans le secteur financier (Bednar *et al.*, 2022), et une forte concentration n'est pas indicative du degré de concurrence entre les entreprises en place ou de la disputabilité du marché (CAC, 2009). Dans un marché disputable, les entreprises désireuses d'entrer sur le marché et d'en sortir ne sont pas confrontées à des barrières prohibitives, et la perspective d'une concurrence naissante peut encourager l'innovation des entreprises en place (CAC, 2009).

Une étude qui a mesuré le degré de disputabilité dans le secteur bancaire canadien a conclu que ce secteur se caractérise par une concurrence monopolistique (Allen et Liu, 2007), qui décourage ce qu'on appelle les *innovations visibles* (p. ex. en matière de services) parce qu'elles peuvent être assez rapidement reproduites par les concurrents, ce qui minimise les avantages recherchés par le premier innovateur (CAC, 2009). L'innovation cible généralement plutôt les processus internes (p. ex. le capital physique et les logiciels de TIC), qui sont cachés aux concurrents et donc plus difficiles à reproduire. Par exemple, entre 2009 et 2019, les six plus grandes banques canadiennes ont investi collectivement 100 milliards de dollars en technologie afin d'améliorer considérablement la cybersécurité interne. Cela indique que les banques canadiennes pourraient vouloir investir dans les technologies quantiques qui augmentent la sécurité. Toutefois, le secteur bancaire reste relativement peu enclin à prendre des risques en ce qui concerne les innovations technologiques. En général, il adopte des innovations technologiques fructueuses et déjà implantées ailleurs, à condition que leurs risques et leurs avantages soient bien connus (stratégie d'innovation dite du « suiveur précoce ») (CAC, 2009).

Les PME canadiennes font face à des difficultés lorsqu'elles adoptent de nouvelles technologies

De 2015 à 2019, les PME canadiennes ont été à l'origine de plus de 50 % de la valeur ajoutée au PIB du pays et, en décembre 2021, elles représentaient 99,8 % des entreprises employeuses nationales (ISDE, 2022b). Malgré leur rôle important dans l'économie du Canada, elles ont du mal à atteindre la maturité technologique, ce qui étouffe leur croissance (Goldsmith, 2021). Les facteurs les plus courants retardant la numérisation des PME sont « l'accès [limité] à l'infrastructure, la faible interopérabilité des systèmes, l'absence d'une culture des données et de sensibilisation au numérique, le manque de compétences en interne, un déficit de financement pour couvrir les coûts irrécupérables élevés de la transformation, l'incertitude quant aux obligations et aux responsabilités lorsqu'elles se lancent dans de nouvelles activités numériques » (OCDE, 2021b). Une enquête menée en 2017 auprès de près de 1 000 entreprises manufacturières canadiennes comptant moins de 500 employés a révélé que les entreprises rencontraient une multitude d'obstacles à la mise en œuvre de nouvelles technologies telles que les capteurs et les logiciels d'optimisation de la production. Les principaux sont le manque de main-d'œuvre qualifiée (42 %), les coûts excessifs (38 %), la résistance des employés au changement (31 %) et l'incertitude quant au rendement du capital investi (31 %) (Bédard-Maltais, 2017).

Les problèmes d'interopérabilité ralentissent l'adoption des ordinateurs et des communications quantiques

L'*interopérabilité* peut être définie comme la capacité des appareils produits par différents fabricants à fonctionner ensemble (Gartner, s.d.). Deux types de problèmes d'interopérabilité ralentissent l'adoption des ordinateurs quantiques. Premièrement, l'intégration de ces derniers dans les systèmes informatiques nécessite de nouveaux flux de travail qui coordonnent l'informatique quantique et l'informatique classique et s'attaquent aux questions de sécurité, de gestion des données et de conformité (Zapata Computing, 2021, 2022). Deuxièmement, les utilisateurs finaux potentiels s'inquiètent de l'interopérabilité des applications quantiques conçues par différents fournisseurs avec divers dispositifs matériels mélangés à l'informatique classique (Zapata Computing, 2021). De même, le succès de l'Internet quantique dépend de son interopérabilité avec les protocoles et infrastructures établis. Pour atteindre la « rétrocompatibilité » et l'intégration des réseaux, il faut une collaboration entre les innovateurs quantiques et les experts qui travaillent déjà au développement de l'architecture de base d'Internet (DeNardis, 2022).

4.4.2 Manque de main-d'œuvre qualifiée

Il est difficile de définir l'expertise technique nécessaire à la main-d'œuvre quantique de demain

S'il est généralement admis que la main-d'œuvre quantique nécessitera un large éventail d'expertises, les besoins particuliers de ce marché en développement ne sont pas entièrement connus. Le défi est d'autant plus grand que les technologies sont vastes, tout comme les connaissances spécialisées requises pour concevoir et mettre en œuvre de nouvelles technologies (probablement à tous les niveaux d'innovation, de la recherche fondamentale à l'utilisation finale) (NSTC-SCQIS, 2022). Selon certaines estimations, la demande d'experts en informatique quantique était en décembre 2021 trois fois supérieure au nombre de diplômés pouvant occuper les postes vacants (Masiowski *et al.*, 2022). Toutefois, ces estimations ne sont pas propres au Canada et peuvent ne pas être caractéristiques de la dynamique de son marché du travail. Un meilleur ciblage du recueil de données et des enquêtes sur l'offre et la demande de main-d'œuvre quantique en pleine croissance pourrait aider à prévoir les compétences dont l'industrie aura besoin.

Les possibilités d'éducation et de formation aux technologies quantiques sont insuffisantes

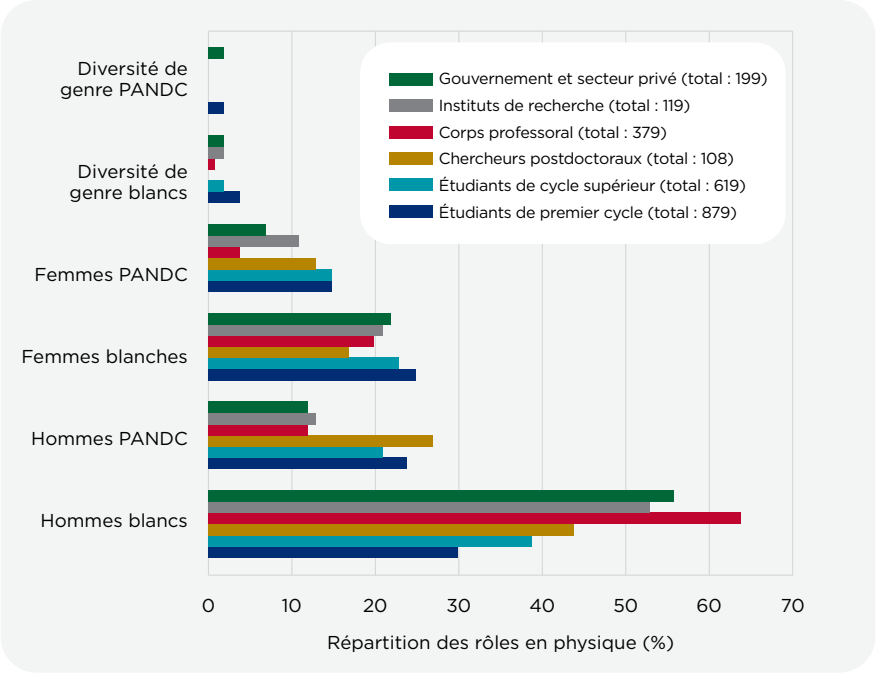
Des recherches réalisées par McKinsey en 2021 ont montré qu'un nombre important d'universités dans le monde offraient des programmes de recherche spécialisés dans les technologies quantiques; cependant, relativement peu d'entre elles (29 sur 176) proposaient une maîtrise dans ce domaine, 41 % de ce genre de programme étant proposé aux États-Unis (Masiowski *et al.*, 2022). Un modèle estime que l'absence de programmes de maîtrise en technologies quantiques limite les possibilités d'amélioration des compétences de 350 000 professionnels titulaires d'une maîtrise dans des domaines tels que la biochimie, l'électronique, le génie chimique, les TIC et les mathématiques (Masiowski *et al.*, 2022). De plus, à mesure que les technologies quantiques s'étendent à différents secteurs d'adoption, tels que la finance, les télécommunications, les soins de santé et la fabrication de produits pharmaceutiques, les programmes de perfectionnement professionnel destinés à des personnes ayant une formation et une expérience diverses sont de plus en plus importants pour faciliter la diffusion de la technologie (INDU, 2022a, 2022b).

Il y a un manque de diversité en STGM

Le manque persistant de diversité en STGM est une autre raison pour laquelle il est difficile de trouver du personnel qualifié et pour laquelle les talents ne sont pas utilisés à leur pleine capacité. Par exemple, les peuples autochtones représentent moins de 2 % des employés de ces disciplines (Cooper, 2020) et seuls 4,1 % des travailleurs autochtones ont suivi une formation postsecondaire en STGM, contre 10,4 % pour les travailleurs non autochtones (Kazmi, 2022). Des études révèlent que les professeurs minorisés et racisés sont sous-représentés, ont des salaires inférieurs à ceux de leurs collègues blancs et estiment que leurs contributions sont sous-évaluées par leurs pairs (Henry *et al.*, 2017). Les professeurs racisés obtiennent également leur titularisation et des promotions plus tard que leurs homologues masculins blancs à qualifications comparables (Wijesingha et Ramos, 2017). Ces études donnent une idée des barrières et des préjugés systémiques auxquels les étudiants racisés pourraient faire face en STGM, y compris en science quantique. En outre, le manque de mentors autochtones, noirs et issus de la diversité raciale décourage les étudiants sous-représentés de poursuivre des études et des carrières dans ces domaines (Adams, 2021).

Les mathématiques, l'informatique et l'ingénierie sont dominées par les hommes

Lorsqu'il s'agit d'attirer des chercheuses dans les domaines quantiques au Canada, « il y a une énorme concurrence pour les candidates, qui sont relativement peu nombreuses dans les technologies quantiques, mais cela ne s'est pas nécessairement traduit par un plus grand nombre de femmes entrant dans les programmes d'études pertinents » (ISDE, 2022d). Les établissements canadiens ont mis sur pied des initiatives pour encourager l'inscription des femmes en STGM, mais les résultats ont été faibles. Par exemple, les femmes représentaient 56 % des inscriptions dans l'enseignement postsecondaire entre 2010 et 2019. Cependant, elles représentaient à peine 38,5 % des étudiants en STGM, leur proportion étant encore plus faible en mathématiques et en informatique (28 %) et en ingénierie (22 %) (Mahboubi, 2022). Une enquête démographique réalisée en 2021 auprès des physiciens canadiens a constaté qu'un faible nombre de femmes étaient inscrites en mathématiques, en informatique et en ingénierie (Smolina *et al.*, 2021) (figure 4.2).



Source des données : Smolina *et al.* (2021)

Figure 4.2 Données démographiques sur les répondants ayant suivi une formation en physique au Canada en 2021

L'enquête a été réalisée en ligne au moyen d'une méthode d'échantillonnage dit « en boule de neige », dans laquelle on attendait des participants qu'ils recrutent d'autres répondants. Elle a reçu des réponses de tout le Canada, la plupart (42 %) provenant de l'Ontario, suivie du Québec (18 %) et de la Colombie-Britannique (16 %). L'enquête demandait aux répondants d'indiquer leur situation actuelle (p. ex. étudiant diplômé ou professeur), puis de s'identifier en fonction de leur race et de leur genre. Les étudiants de premier cycle affichaient une bien plus grande diversité que les autres cohortes; cependant, dans tous les cas, les hommes blancs constituaient les groupes démographiques les plus représentés.

Ces constatations indiquent que les initiatives visant à accroître le nombre de femmes en STGM ne sont peut-être pas efficaces. Il est possible que les politiques ne tiennent pas compte de l'intersectionnalité — c'est-à-dire, de la capacité d'une personne à posséder plusieurs identités sociales qui se recoupent et qui pourraient avoir une incidence négative sur ses chances de réussir une carrière dans ces domaines (Adams, 2021). Par exemple, « les femmes de couleur subissent une "double contrainte" de race et de genre lorsqu'elles font face aux barrières et aux difficultés dans leurs études en STGM » (Adams, 2021). Les politiques d'emploi, de

rétention et d'immigration centrées sur l'humain — telles que l'offre de services de garde abordables et de meilleurs congés pour tous les parents — sont essentielles pour attirer des candidats diversifiés (ISDE, 2022d).

Il est difficile d'attirer et de retenir les talents quantiques internationaux

Dans les cas où la pénurie de main-d'œuvre pose des problèmes pour l'adoption des technologies, attirer des talents internationaux grâce à des politiques d'immigration peut être la façon la plus rapide de résoudre ces problèmes. Toutefois, les employeurs des secteurs à forte demande, tels que l'informatique et les télécommunications, se heurtent à des difficultés et à des retards dans l'obtention d'autorisations de travail afin de permettre à des professionnels hautement qualifiés de venir au Canada. L'arriéré des demandes à Immigration, Réfugiés et Citoyenneté Canada et les retards de traitement qui en découlent sont les principaux obstacles rencontrés par les employeurs lorsqu'ils recrutent des talents internationaux (CCA, 2022; Singer, 2022). Parmi les autres obstacles courants figurent la complexité des procédures bureaucratiques, le chevauchement des politiques fédérales et provinciales ou territoriales et les coûts administratifs (CCA, 2022). En outre, les entreprises des secteurs nouveaux et émergents, tels que les technologies quantiques, éprouvent des difficultés à attirer des talents internationaux parce qu'il existe peu ou pas de codes dans la Classification nationale des professions (CNP) pour les postes qu'elles tentent de pourvoir (Cameron et Faisal, 2016).

Les employeurs au Canada éprouvent également des difficultés à conserver leurs employés. La concurrence d'autres pays et les difficultés rencontrées par les travailleurs qualifiés temporaires (y compris les anciens étudiants étrangers) pour obtenir le statut de résident permanent figurent parmi les entraves les plus courantes à la rétention des talents internationaux (CCA, 2022). En 2019, les étudiants étrangers représentaient 28 % des étudiants inscrits dans un domaine lié aux STGM. Si l'on considère les sous-domaines, ils représentaient respectivement 33 % et 40 % des étudiants en génie et en mathématiques ou informatique (Mahboubi, 2022). Environ 3 étudiants étrangers sur 10 entrés au Canada dans les années 2000 ont acquis la résidence permanente dans les 10 ans qui ont suivi l'obtention de leur premier permis d'études (Choi *et al.*, 2021). Dans certains cas, il peut être plus facile pour les diplômés de retourner dans leur pays d'origine ou de chercher un emploi dans des pays où les procédures d'immigration sont plus accessibles et plus rapides (chapitre 6).

5

Problèmes juridiques et réglementaires

Constatations du chapitre

- Le cadre juridique canadien actuel peut protéger contre certaines formes de surveillance quantique, mais l'adoption des technologies quantiques amplifiera probablement les problèmes juridiques découlant de l'identification de données jusque-là anonymes et pourrait compromettre le chiffrement en tant que moyen de défense contre la responsabilité en cas d'atteinte à la confidentialité des données.
- Les entreprises établies et les premiers arrivés pourraient utiliser les normes techniques, les mesures de protection de la propriété intellectuelle et les règles de concurrence pour créer des obstacles commerciaux aux entreprises quantiques et étouffer l'adoption de technologies concurrentes. Des modifications substantielles des règles juridiques et une meilleure application de celles-ci peuvent remédier aux préjudices économiques et sociaux découlant de la position dominante de certaines entreprises sur le marché quantique.
- Les autorités réglementaires commerciales canadiennes et étrangères conservent un pouvoir discrétionnaire important en matière de contrôle des exportations et des importations de technologies, d'infrastructure et de matériaux. La discrétion réglementaire peut avoir des conséquences négatives pour les entreprises quantiques et les utilisateurs finaux au Canada, en limitant leur accès aux marchés mondiaux et aux chaînes d'approvisionnement.

Outre les critères éthiques et sociaux recensés au chapitre 4, le cadre de conséquences éthiques, juridiques, sociales et politiques en matière quantique (ELSPI quantiques) exige également que l'on prête attention aux aspects juridiques et politiques. L'adoption des technologies quantiques soulève un certain nombre de questions, notamment à propos du renforcement des capacités de surveillance, de la dépersonnalisation et du décryptage des données qu'elles permettent et de l'abus de position dominante par certaines entreprises. Le comité d'experts examine le droit canadien relatif à la protection de la vie privée, à la propriété intellectuelle et à la concurrence afin d'esquisser différentes approches pour faire face aux risques décelés, dans l'optique de réformes substantielles et d'une meilleure application des lois en vigueur. Il étudie également le rôle des normes et de la réglementation commerciale nationale et étrangère dans la production, la diffusion et l'adoption des technologies, en particulier en ce qui concerne le marché canadien.

5.1 Attente raisonnable en matière de protection de la vie privée et de sécurité des renseignements personnels

5.1.1 Attente raisonnable en matière de protection de la vie privée

Si les capteurs quantiques renforcent les capacités de surveillance publique (chapitre 4), les principes constitutionnels actuels concernant l'attente raisonnable en matière de respect de la vie privée (encadré 5.1) sont probablement suffisants pour l'utilisation des technologies de surveillance quantique telles que l'imagerie thermique et les caméras corporelles (Dekker et Martin-Bariteau, 2022).

Encadré 5.1 Attente raisonnable en matière de protection de la vie privée dans le droit canadien

Dans la cause *R. c. Tessling*, la Cour suprême a jugé à la majorité que l'utilisation de caméras d'imagerie infrarouge frontale (FLIR) par les forces de l'ordre à des fins de surveillance résidentielle ne contrevenait pas à l'attente raisonnable des propriétaires en matière de respect de la vie privée (CSC, 2004). Bien que les caméras FLIR puissent détecter les sources de chaleur à l'intérieur d'une maison et permettre aux forces de l'ordre de recueillir des renseignements, elles ne peuvent pas identifier les sources exactes de cette chaleur ou « "voir" à travers les surfaces externes d'un édifice » (CSC, 2004). En raison des différences significatives entre les caméras FLIR et les capteurs quantiques, cette décision peut cependant ne pas être applicable à ces derniers (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). Réfléchissant aux conséquences possibles des progrès technologiques sur la vie privée, le juge Binnie a relevé que si « les possibilités de la technique FLIR et d'autres techniques évoluent et entraînent des changements dans la nature et la qualité des renseignements obtenus, les circonstances seront différentes et les tribunaux devront se prononcer sur son incidence en matière de vie privée à ce moment-là, en fonction des faits qui leur seront alors présentés » (CSC, 2004).

L'évolution des technologies de surveillance au cours de la dernière décennie a eu des répercussions sur l'attente raisonnable en matière de protection de la vie privée des gens au Canada. Dans la cause *R. c. Jarvis*, le juge en chef Wagner a statué que la vie privée est contextuelle et que « "l'attente raisonnable de protection en matière de vie privée"

(Continue)

(a continué)

est de nature normative et non descriptive » (CSC, 2019). S'appuyant sur le raisonnement du juge Binnie dans la cause *R. c. Tessling*, la majorité dans la cause *R. c. Jarvis* a relevé que « la jurisprudence relative à la protection de la vie privée reconnaît la menace que peuvent représenter de façon générale les nouvelles technologies en évolution pour la vie privée et le besoin de tenir compte de la capacité de la technologie pour examiner si les attentes raisonnables de protection en matière de vie privée ont été frustrées par le recours à cette technologie » (CSC, 2019).

Selon Dekker et Martin-Bariteau (2022), les cadres actuels de protection de la vie privée permettent d'évaluer si une utilisation donnée de la détection quantique est raisonnable « en fonction des capacités de détection de cette technologie (c.-à-d. du degré d'atteinte à la vie privée qu'elle entraîne) ». Par exemple, la technique d'imagerie fantôme contrefactuelle (encadré 5.2) montre que, d'un point de vue juridique, le recours à la détection quantique à des fins de surveillance n'est pas très différent de l'utilisation de n'importe quelle autre technologie de surveillance. Cette technique permet à un tiers de recueillir des renseignements sur une personne à son insu et sans son consentement. La technique de détection n'est toutefois pas pertinente du point de vue légal, car le critère d'attente raisonnable en matière de protection de la vie privée reste le même tant que certaines circonstances factuelles sont réunies. Ces pratiques de surveillance peuvent être illégales tant dans le secteur privé que dans le secteur public (Dekker et Martin-Bariteau, 2022).

Encadré 5.2 Imagerie fantôme contrefactuelle

La *contrefactualité* est l'utilisation des effets quantiques pour examiner des objets ou transmettre des messages sans échange de matière ou d'énergie entre les deux parties lors du transfert d'information (Hance et Rarity, 2021). Il est possible de faire traverser un interféromètre (un dispositif qui fusionne plusieurs sources de lumière pour créer un diagramme d'interférence) à un photon unique afin d'identifier un objet ou ses caractéristiques sans interaction physique avec lui (LIGO Caltech, s.d.). La méthode dite d'*imagerie fantôme* utilise des paires de photons intriqués pour détecter des objets opaques avec un « rapport signal-bruit [nettement meilleur], tout en évitant la surillumination » (Zhang *et al.*, 2019).

Néanmoins, l'évaluation des répercussions de la surveillance quantique sur la vie privée peut être compliquée pour les tribunaux, qui ne sont pas familiarisés avec cette technique de détection. La détection quantique s'accompagne de facteurs éthiques qui lui sont propres, et son application sans guide ou supervision peut entraîner des atteintes à la vie privée. Une réglementation proactive et une supervision continue pourraient favoriser l'utilisation responsable de la détection quantique par les gouvernements, les forces de l'ordre et des acteurs privés (Dekker et Martin-Bariteau, 2022).

5.1.2 Protection des renseignements personnels

Dans la mesure où l'informatique quantique peut optimiser le profilage, les prédictions, la surveillance et la prise de décision basés sur l'IA (chapitre 4), elle peut également accroître les problèmes juridiques relatifs à la réglementation des systèmes algorithmiques. Un de ces problèmes découle de la notion de renseignements personnels dans la législation canadienne sur la protection de la vie privée. Plusieurs termes peuvent décrire l'éventail des renseignements issus de l'être humain, des données personnelles totalement anonymes jusqu'aux données personnelles totalement identifiées (encadré 5.3).

Encadré 5.3 Éventail des données issues de l'être humain

Les **données anonymisées** sont des « données sous une forme qui n'identifie pas les individus et pour lesquelles l'identification par [leur] combinaison avec d'autres données n'est pas susceptible de se produire » (U.K. ICO, 2012).

Les **données dépersonnalisées** sont des données dont « l'association entre un ensemble de données d'identification et la personne concernée » a été éliminée (NIST, s.d.).

Les **données pseudonymisées** sont un sous-ensemble des données dépersonnalisées (CPVP, 2016). Lors de la pseudonymisation, « une référence codée ou un pseudonyme est rattaché à un enregistrement afin de pouvoir associer les données à une personne particulière sans identifier cette dernière » (U.K. ICO, 2012).

Les **données personnelles** sont des données qui identifient une personne.

L'informatique quantique peut exacerber le problème de la réidentification des données

Le droit canadien sur la protection des données protège les renseignements qui, directement ou en combinaison avec d'autres renseignements, permettent d'identifier une personne (comme le nom, l'âge, les numéros d'identification, le revenu, l'origine ethnique, les opinions, les évaluations, les dossiers d'employé, les dossiers de crédit et de prêt ou le dossier médical) (CPVP, 2019a, 2019b). Cela exclut toutefois les données anonymisées. Cependant, certains chercheurs avancent que l'anonymisation des données est inefficace parce qu'un utilisateur peut toujours être identifié à l'aide de techniques d'exploration de données (Ohm, 2010). À l'ère de la science des données et de l'IA, seules des méthodes perfectionnées de dépersonnalisation peuvent garantir le respect de la vie privée (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). L'emploi de l'informatique quantique accroît ce risque et souligne la nécessité d'une réforme de la protection des données qui prend en compte les défis d'une économie des données en pleine croissance (Scassa, 2020).

La *Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques* ne définit pas les données anonymisées et ne prévoit pas de dispositions particulières pour leur traitement

La *Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques* (LPRPDE) est une loi fédérale qui régit l'utilisation par les organisations privées des renseignements personnels dans le cadre d'activités commerciales (GC, 2000). Cette loi ne définit pas expressément les *données pseudonymisées* et ne prévoit pas de dispositions particulières pour leur traitement par ces organisations. L'absence de telles dispositions distingue la LPRPDE du *Règlement général sur la protection des données* (RGPD) de l'Union européenne, qui établit une norme mondiale en matière de protection des données. Le RGPD fait une distinction entre les données pseudonymisées et les données anonymisées — il s'applique aux premières, mais pas aux secondes (ETHI, 2022). Au Canada, les décisions de la Cour fédérale peuvent donner à penser que les données pseudonymisées pourraient constituer des renseignements personnels au sens de la LPRPDE (CPVP, 2016). Toutefois, comme l'utilisation de l'informatique quantique peut accroître les risques de réidentification des données, l'absence de dispositions législatives claires sur le statut des données anonymisées présente des risques pour la vie privée des personnes au Canada.

Le projet de loi C-27 exclut les données anonymisées des règles de protection des données

En juin 2022, le gouvernement du Canada a présenté le projet de loi C-27 (*Loi édictant la Loi sur la protection de la vie privée des consommateurs, la Loi sur le Tribunal de la protection des renseignements personnels et des données et la Loi sur l'intelligence artificielle et les données et apportant des modifications corrélatives et connexes à d'autres lois*) (Chambre des communes, 2022a). La *Loi sur la protection de la vie privée des consommateurs*, proposée dans ce projet de loi, définit des catégories distinctes de données : les données anonymisées et les données dépersonnalisées. Selon le projet de loi, anonymiser signifie « [m]odifier définitivement et irréversiblement, conformément aux pratiques exemplaires généralement reconnues, des renseignements personnels afin qu'ils ne permettent pas d'identifier un individu, directement ou indirectement, par quelque moyen que ce soit », tandis que dépersonnaliser signifie « [m]odifier des renseignements personnels afin de réduire le risque, sans pour autant l'éliminer, qu'un individu puisse être identifié directement » (Chambre des communes, 2022a). Le projet de loi C-27 maintient les données dépersonnalisées dans le cadre réglementaire, mais exclut les données anonymisées, en partant du principe qu'elles ne peuvent pas être réidentifiées (Dekker et Martin-Bariteau, 2022; Chambre des communes, 2022a). Ces catégories de données ont été introduites en partie pour offrir aux organisations une plus grande souplesse dans le traitement des renseignements anonymisés et dépersonnalisés « à des fins de recherche, d'analyse et de développement internes » (Chambre des communes, 2022a; Gratton *et al.*, 2023). Les données anonymisées sont également exemptées des limites de conservation et le droit à l'effacement ne leur est pas applicable (Chambre des communes, 2022a; Scassa, 2022).

Certains chercheurs ont toutefois critiqué la proposition d'exclure les données anonymisées des règles de protection des données, en partie parce que les systèmes d'IA quantiques pourraient être en mesure de réidentifier les données anonymisées, amplifiant ainsi les risques pour la vie privée (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). La proposition de *Loi sur l'intelligence artificielle et les données* (incluse dans C-27) vise à résoudre partiellement ce problème en imposant aux organisations privées des exigences de gouvernance des données anonymisées, qui les obligent à établir « des mesures concernant : a) la manière d'anonymiser les données et b) l'utilisation ou la gestion des données anonymisées » (Chambre des communes, 2022a). En septembre 2023, le projet de loi C-27 n'avait pas été adopté.

L'informatique quantique pourrait remettre en cause le chiffrement comme moyen de défense contre la responsabilité en cas d'atteinte à la confidentialité des données

Un autre défi juridique en ce qui concerne la protection de la vie privée à l'ère quantique touche la responsabilité en cas d'atteinte à la confidentialité des données. En vertu de la LPRPDE, toute entreprise relevant du champ d'application de la loi doit divulguer les atteintes à la protection des renseignements personnels à la fois au Commissariat à la protection de la vie privée du Canada (CPVP) et à la personne concernée lorsqu'il existe un « risque réel de préjudice grave à l'endroit d'un individu » (GC, 2000). Pour évaluer le risque réel de préjudice grave, le CPVP suggère aux organisations de tenir compte, entre autres, de la nature de l'atteinte et de déterminer si les données perdues ont été convenablement chiffrées ou anonymisées. Cela signifie que, dans certains cas, les organisations peuvent être en mesure de réduire leur responsabilité en cas d'atteinte à la confidentialité des données si elles peuvent prouver que les données ont été chiffrées (CPVP, 2021). Toutefois, le risque de décryptage rétroactif des données recueillies et stockées peut compromettre l'usage du chiffrement comme moyen de défense contre cette responsabilité. S'il se peut que certaines données soient périmées au moment où le premier ordinateur quantique sera en mesure de casser le chiffrement actuel, d'autres renseignements, tels que les dossiers médicaux et les numéros d'assurance sociale, seront toujours précieux pour les acteurs malveillants.

5.2 Propriété intellectuelle

Les ordinateurs quantiques et les applications quantiques, telles que la détection, la cryptographie et les communications, peuvent bénéficier d'une protection de la propriété intellectuelle (Kop, 2021b; Rand et Rand, 2022). Les droits de propriété intellectuelle englobent plusieurs régimes de droits, notamment les brevets, le droit d'auteur et les secrets commerciaux. En général, ces régimes visent à promouvoir l'innovation en accordant aux détenteurs un droit exclusif de rendre publiques, de commercialiser, de reproduire et de limiter la distribution de leurs inventions (McKenna, 2006). Les droits de propriété intellectuelle jouent un rôle essentiel dans l'élaboration de la stratégie d'appropriation de la valeur du secteur quantique, car ils peuvent empêcher, pendant un certain temps, des tiers de tirer des avantages économiques des inventions ou des expressions originales des détenteurs de ces droits (DOJ et FTC, 2007).

Les stratégies de propriété intellectuelle déployées par les grandes entreprises peuvent étouffer l'innovation et créer des obstacles pour les PME quantiques nationales

En vertu de la *Loi sur les brevets* canadienne, un brevet confère à l'inventeur « le droit, la faculté et le privilège exclusif de fabriquer, construire, exploiter et vendre » une invention, qui est définie comme « [t]oute réalisation, tout procédé, toute machine, fabrication ou composition de matières, ainsi que tout perfectionnement de l'un d'eux, présentant le caractère de la nouveauté et de l'utilité » (GC, 1985d). Pour qu'un brevet soit accordé, l'invention doit satisfaire à l'exigence de nouveauté, être inventive (c.-à-d. ne pas être évidente pour une personne possédant les compétences nécessaires), avoir une utilité et se rapporter à un objet brevetable. Le régime juridique codifié des brevets est interprété par un ensemble de décisions judiciaires qui, entre autres, établissent les conditions de brevetabilité (Hagen *et al.*, 2022).

L'un des principaux objectifs du système des brevets est de garantir la divulgation publique des inventions (Hagen *et al.*, 2022). Dans l'affaire *Teva Canada Ltd. c. Pfizer Canada Inc.*, la Cour suprême a décrit le système des brevets comme une sorte de « marché » : en échange de l'obtention d'un brevet, l'inventeur doit rendre son invention publique (CSC, 2012). Malgré l'objectif de divulgation publique du régime des brevets, l'utilisation d'une combinaison de droits de propriété intellectuelle par les grandes entreprises peut nuire à l'objectif d'encourager l'innovation et exacerber les inégalités sociales. Kop (2020) note que « l'utilisation stratégique d'une combinaison de droits de propriété intellectuelle pour maximiser et protéger la valeur du portefeuille de propriété intellectuelle du propriétaire de l'ordinateur quantique peut aboutir à rendre illimitée la durée des droits d'exploitation exclusifs mondiaux pour les premiers arrivés ».

L'exercice des droits de propriété intellectuelle par un acteur dominant peut rendre plus probable un scénario dans lequel le gagnant rafle tout. Par exemple, Microsoft a utilisé une structure topologique pour bâtir un ordinateur quantique alors que nombre de ses concurrents se sont appuyés sur des supraconducteurs (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Si son approche est plus fructueuse, Microsoft pourrait protéger les aspects techniques des structures topologiques en invoquant le secret commercial et « en vendant ses ordinateurs quantiques comme un service plutôt que comme des appareils autonomes » (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Si cette stratégie conférait à l'entreprise un avantage concurrentiel, elle pourrait également entraver la conception de processeurs quantiques hybrides qui exploitent les forces des technologies mises au point par les différents détenteurs de propriété intellectuelle.

Les brevets détenus par les grandes entreprises peuvent également décourager la recherche de suivi, ainsi que la mise au point et la commercialisation de produits

par les PME, car « le coût de l'accès à ces brevets, que ce soit en raison des redevances ou des batailles juridiques, peut tout simplement être inaccessible pour les petites entreprises » (Gallini et Hollis, 2019). On retrouve des tissus denses « de droits de propriété intellectuelle qui se chevauchent » et qui entravent la commercialisation des technologies par les PME (c.-à-d. des fourrés de brevets) (Shapiro, 2000) dans deux domaines technologiques où les innovateurs du Canada ont historiquement joui d'un avantage relatif : les ordinateurs et les communications (Gallini et Hollis, 2019).

Le manque de stratégies nationales de conservation de la propriété intellectuelle ciblant la recherche financée par des fonds publics a facilité la domination du marché canadien par de grandes entreprises étrangères (Hinton *et al.*, 2023). La majorité des brevets générés par les universités canadiennes financées par des fonds publics sont déposés à l'étranger, ce qui diminue la capacité des entreprises nationales « à commercialiser [leur] technologie, alors qu'elles font également face à la position de [leurs] concurrents en matière de propriété intellectuelle et d'actifs incorporels » (leur liberté d'exploitation est donc restreinte) (Hinton et Witzel, 2023). Le plan directeur de la Corporation d'innovation du Canada reconnaît ce problème, et relève que « [e]n l'absence de mesures de protection adéquates, les multinationales puissantes peuvent contester la propriété d'actifs incorporels afin de compliquer la commercialisation de technologies concurrentielles par des entreprises canadiennes » (GC, 2023a). En fin de compte, en l'absence de stratégie nationale de conservation de la propriété intellectuelle, la recherche financée par des fonds publics tend à générer des avantages économiques pour les entreprises et les pays étrangers, plutôt que pour le Canada.

La détention de propriété intellectuelle peut être avantageuse pour les petites entreprises

Les actifs de propriété intellectuelle peuvent stimuler la croissance des PME à différents stades de leur développement (y compris pour les entreprises en démarrage et les entreprises dérivées de travaux universitaires) (OEB, 2017). Par rapport aux entreprises qui en sont dépourvues, les PME détentrices de droits de propriété intellectuelle sont plus susceptibles de recevoir davantage de financement (puisque la propriété intellectuelle peut être utilisée comme garantie pour les prêts), d'innover, de réaliser des plans d'expansion nationale et internationale et de connaître une croissance élevée (Collette et Santilli, 2019). Les droits de propriété intellectuelle, et en particulier les brevets, permettent aux innovateurs de repousser leurs concurrents, de protéger leur entreprise contre les grosses sociétés et de constituer des portefeuilles de brevets qui facilitent les accords de licences croisées (Gallini et Hollis, 2019). Sur les marchés

technologiques dominés par plusieurs grandes entreprises, les PME qui détiennent des brevets sur des éléments d'un processus innovant peuvent encaisser de fortes redevances de licence (Galasso et Schankerman, 2018).

Les législateurs seront confrontés à des difficultés pratiques pour codifier un régime de brevets *sui generis* pour les différentes applications des technologies quantiques

Les éléments suivants d'un ordinateur quantique peuvent être protégés par des brevets :

> *les composants technologiques de base (qubits), les portes et multiplicateurs quantiques, les circuits intégrés quantiques, les différents types de processeurs quantiques, tels que [...] les dispositifs d'interférence quantique, les moteurs de compilation (c.-à-d. les optimiseurs, les traducteurs et les cartographieurs (mappers)), les décodeurs, le simulateur et l'émulateur, le dessinateur de circuits, la microarchitecture [...], l'interface quantique classique, l'architecture du jeu d'instructions quantique et la mémoire quantique.*
>
> Kop (2021a)

Les inventions exécutées par ordinateur (p. ex. les programmes ou les méthodes) (OEB, 2023) peuvent également être brevetables si elles satisfont à l'exigence d'existence physique ou produisent un effet ou un changement perceptible (OPIC, 2020). Par conséquent, le procédé informatique peut bénéficier d'une protection par brevet. Enfin, l'infrastructure quantique, telle que les réfrigérateurs à dilution, peut également être brevetable si elle remplit les conditions d'utilité, de nouveauté et de non-évidence (Kop, 2021b).

Une étude de la situation mondiale qui s'est penchée sur les données relatives aux demandes et aux octrois de brevets entre 2001 et 2021 révèle que le système actuel incite à la divulgation publique dans le domaine de l'informatique quantique (Aboy *et al.*, 2022). Les grandes entreprises technologiques, les PME quantiques, les entreprises en démarrage, les universités et le secteur public figurent parmi les premiers cessionnaires de brevets. Toutefois, il existe un risque que l'altération du système de brevets ait des conséquences négatives sur l'innovation et l'adoption de l'informatique quantique (Aboy *et al.*, 2022). Les décideurs politiques seront donc confrontés à des difficultés pratiques dans la codification d'un régime de propriété intellectuelle différencié pour les diverses applications de la science quantique (Kop et Brongersma, 2021). En effet, le chevauchement croissant entre les technologies classiques et quantiques soulève la question de la définition d'un brevet de technologie quantique et de la création d'un régime *sui generis* de droit

des brevets pour les technologies quantiques (Aboy *et al.*, 2022). De plus, l'Accord de l'Organisation mondiale du commerce sur les aspects des droits de propriété intellectuelle interdit toute discrimination entre les technologies dans le droit des brevets (OMC, s.d.).

Étant donné les effets négatifs potentiels des brevets sur les PME et sur l'innovation, le suivi sera un élément essentiel de la politique quantique en matière de propriété intellectuelle. Les interventions politiques proactives dépendent de la recherche empirique, des connaissances théoriques et des leçons tirées du développement antérieur. Pour être efficaces, les interventions devront également tenir compte de l'interaction entre la protection de la propriété intellectuelle et le droit de la concurrence (Kop *et al.*, 2022) (section 5.3).

Le code objet, qui dirige les fonctions des ordinateurs quantiques, soulève des problèmes de droits d'auteur

Contrairement aux brevets, le droit d'auteur est automatique et protège les expressions originales d'idées, y compris celles contenues dans les logiciels, comme « le code source informatique, les éléments visuels de l'interface utilisateur, la structure de l'interface de programmation d'application (API), la documentation destinée aux utilisateurs et les guides de produits » (Bereskin et Parr LLP, s.d.). Il ne protège toutefois pas les aspects fonctionnels des logiciels (Samuelson, 2017).

Le droit d'auteur peut, en revanche, protéger les parties des technologies quantiques qui constituent des « œuvres littéraires » au sens de la *Loi sur le droit d'auteur* (GC, 1985e; Bereskin et Parr LLP, s.d.). Par exemple, dans certains contextes, les composants suivants d'un ordinateur quantique peuvent bénéficier d'une protection en vertu du droit d'auteur : « le logiciel quantique, les API, l'unité arithmétique quantique (addition, soustraction, multiplication et exponentiation quantiques), les assertions et la configuration du moteur d'exécution, les plateformes d'informatique quantique, le paradigme et les langages de programmation, le code de stabilisation Bacon-Shor, les codes de couleur et les codes de surface » (Kop, 2021b).

Ces éléments peuvent être soumis au droit d'auteur s'ils répondent au critère de *fixation* (White, 2013; Dylan, 2019). Une œuvre est fixée lorsqu'elle est « exprimée dans une certaine mesure, au moins sous une forme matérielle, susceptible d'être identifiée et ayant une durée de vie plus ou moins permanente » (CEC, 1954; Hagen *et al.*, 2022). La fixation est l'une des principales exigences du droit d'auteur, car elle empêche les personnes de revendiquer la protection juridique de leurs pensées (Schmit, 2013). Toutefois, selon Schmit (2013), l'exigence de forme matérielle pourrait être problématique pour les logiciels quantiques, car le code objet

quantique ne peut être fixé pour « un temps supérieur à une durée transitoire en raison de la superposition [qui] permet à un système de n-qubits d'être dans n'importe lequel de deux états différents *simultanément* » [accentuation dans l'original].

Les mesures de protection du secret commercial sont populaires, mais elles ne protègent pas les inventions contre la rétro-ingénierie

Les études qui utilisent les demandes de brevets et les données relatives à l'octroi de brevets pour évaluer les effets anticoncurrentiels de la propriété intellectuelle se heurtent à des limites, car les renseignements sur les innovations protégées par des secrets commerciaux ne sont pas accessibles au public et ne peuvent pas être analysés (Kop *et al.*, 2022). Les entreprises en démarrage des secteurs des logiciels et du matériel informatique ont souvent recours aux secrets commerciaux en raison de leur moindre coût et de leur plus grande certitude juridique (par rapport au droit d'auteur — qui ne protège que l'expression originale d'une idée — et aux brevets) (Levine et Sichelman, 2019). Certaines entreprises en démarrage fructueuses qui conçoivent des capteurs, des ordinateurs et des systèmes de communication quantiques s'appuient sur la protection du secret commercial pour le matériel et les logiciels afin d'attirer davantage les investisseurs (Kop et Brongersma, 2021). Les secrets commerciaux présentent toutefois des inconvénients : ils restreignent les flux de connaissances et la mobilité de la main-d'œuvre, entravent l'innovation et créent des barrières à l'entrée pour les concurrents. Ils ne protègent pas non plus les inventions contre la rétro-ingénierie (Gouv. du R.-U., 2021); les clauses contractuelles qui interdisent la rétro-ingénierie limitent ce risque, mais ne l'éliminent pas (Kop, 2021b).

5.3 Droit de la concurrence

Le droit de la concurrence interdit les refus de négocier, la monopolisation, les cartels, la fixation des prix et autres pratiques commerciales susceptibles de nuire au marché et aux consommateurs (Kop et Brongersma, 2021). Au Canada, la *Loi sur la concurrence* assure, entre autres, « à la petite et à la moyenne entreprise une chance honnête de participer à l'économie canadienne, [et…] aux consommateurs des prix compétitifs et un choix dans les produits » (GC, 1985b). Conformément à cette loi, certains comportements anticoncurrentiels (p. ex. la collusion horizontale sous la forme de cartels) constituent une infraction criminelle, qui ne nécessite pas la preuve d'un préjudice concurrentiel pour être établie. D'autres formes de comportement anticoncurrentiel (p. ex. l'abus de position dominante ou les pratiques commerciales restrictives) sont considérées comme moins

dangereuses et font l'objet de recours différents, comme des amendes et des ordonnances de cesser et de s'abstenir (GC, 1985b).

L'utilisation et la mise à exécution du droit de la concurrence peuvent favoriser les principaux acteurs du marché

Les marchés en formation et fragmentés, tels que ceux des technologies quantiques, présentent rarement des signes de comportement anticoncurrentiel susceptibles de déclencher une intervention réglementaire (Kop et Brongersma, 2021). De plus, le droit de la concurrence n'est pas pensé pour empêcher les situations où le « gagnant rafle tout » en raison de l'exercice de divers droits de propriété intellectuelle. Au contraire, son application peut renforcer une position dominante légale sur le marché et favoriser les grands acteurs disposant d'un portefeuille de droits de propriété intellectuelle quantique, tant qu'ils exercent leur position dominante de manière légale (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). Toutefois, la protection accordée par le droit de propriété intellectuelle n'est pas absolue; dans certains cas, les autorités de la concurrence et les tribunaux peuvent interdire certains comportements aux détenteurs de tels droits parce qu'ils contreviennent au droit de la concurrence (Anderman, 2007; Kop *et al.*, 2022).

La *Loi sur la concurrence* a été modifiée pour permettre une mise à exécution plus efficace dans l'économie numérique

L'émergence de marchés numériques dominés par des entreprises technologiques mondiales a suscité des appels à modifier le droit sur la concurrence au Canada, afin de décourager la concentration abusive et l'exploitation de la position dominante. Les modifications à la *Loi sur la concurrence* adoptées en 2022 visent à améliorer l'application de la loi dans l'économie numérique (GC, 2022a). Plus précisément, les dispositions relatives à l'abus de position dominante ont été modifiées afin d'élargir la définition des *actes anticoncurrentiels* (GC, 1985b). Alors que cette définition portait auparavant sur les comportements visant « l'exclusion, l'éviction ou la mise au pas d'un concurrent », sa version modifiée vise le comportement « *destiné à* avoir un effet négatif visant l'exclusion, l'éviction ou la mise au pas d'un *concurrent* » (GC, 1985b). Ce changement, qui vise à inclure les actes *destinés à* causer un préjudice concurrentiel au sens large, est particulièrement important face aux marchés numériques, dans lesquels les grandes entreprises technologiques peuvent abuser de leur position dominante en acquérant un certain nombre d'entreprises quantiques prometteuses. S'il apparaît au Bureau de la concurrence qu'une entreprise dominante a adopté une stratégie d'acquisition de concurrents émergents, il pourrait juger que la pratique de ces acquisitions constitue un effet négatif sur un concurrent au sens de la *Loi sur la concurrence* (Iacobucci, 2021).

De nouvelles modifications de la *Loi sur la concurrence* et le renforcement des pouvoirs d'exécution pourraient contribuer à réparer les préjudices économiques résultant d'une position dominante sur le marché

La *Loi sur la concurrence* pourrait encore être modifiée afin d'empêcher les entreprises technologiques dominantes d'acquérir des concurrents émergents avant qu'ils ne puissent acquérir une part de marché majeure du point de vue concurrentiel. La loi exige que le Bureau de la concurrence n'évalue que les effets anticoncurrentiels « quantifiables » d'une fusion, si les parties à la fusion invoquent comme défense un gain d'efficacité (GC, 1985b). Cette exigence porte sur l'effet des fusions sur les prix. Selon Iacobucci (2021), les économétriciens peuvent en principe quantifier n'importe quel effet, y compris « l'impact économique d'un effet dissuasif sur l'innovation ». Une modification à la loi pourrait éliminer l'obligation de s'appuyer sur des données quantitatives pour déterminer si une fusion est susceptible de réduire considérablement ou d'empêcher la concurrence. En outre, le Bureau de la concurrence pourrait accorder une plus grande attention à l'influence des fusions qui non seulement réduisent, mais aussi empêchent la concurrence, en particulier dans le cas d'acquisition d'entreprises prometteuses. Il serait également possible de modifier la *Loi sur la concurrence* afin de préciser que le Tribunal de la concurrence est habilité à rendre des ordonnances lorsqu'un comportement anticoncurrentiel risque d'étouffer l'innovation (Iacobucci, 2021).

5.4 Normes et normalisation

Les normes relatives aux technologies de l'information peuvent être définies comme des « caractéristiques techniques écrites dictant comment concevoir des logiciels et du matériel pour qu'ils soient compatibles avec tout autre type de logiciel et de matériel qui respecte également ces caractéristiques techniques » (DeNardis, 2013). La normalisation est un long processus, qui comprend l'intervention de comités spécialisés, la publication de normes par des organismes autorisés, la reconnaissance nationale des normes, l'application des normes par le secteur privé, l'évaluation de la conformité et l'agrément des organismes d'évaluation de la conformité (Conseil canadien des normes, 2021). C'est un instrument clé de la politique d'innovation parce qu'elle peut protéger la sécurité des consommateurs et éliminer les barrières au commerce international, facilitant ainsi l'adoption internationale des technologies quantiques conçues au Canada (Girard, 2019; Kop, 2020). En outre, les normes techniques jouent un rôle important dans l'élaboration des politiques publiques en matière d'accessibilité des technologies, de droits individuels et de sécurité. Les conséquences politiques des normes soulèvent des questions sur la manière dont celles-ci sont établies sur

le plan procédural et sur qui les établit (DeNardis, 2013), et sur le rôle que joue le Canada dans la conception de normes concernant les technologies quantiques afin de garantir qu'elles promeuvent les droits de la personne individuels et collectifs.

Les normes sur les technologies quantiques sont fragmentées

Les travaux en cours sur les technologies quantiques sont répartis entre plusieurs organismes qui effectuent souvent des travaux similaires (DeNardis, 2022). L'émergence de nouvelles technologies entraîne des conflits dans l'élaboration des normes entre les organismes traditionnels ayant une expertise dans les TIC (mais pas nécessairement dans les technologies quantiques) et les groupes industriels ponctuels chargés de la rédaction des normes, qui ont une expertise dans les technologies quantiques (mais pas dans d'autres TIC). Plusieurs organismes et forums ont commencé à travailler à la cryptographie résistante aux méthodes quantiques (QRC), à la normalisation des réseaux d'information quantique et, plus spécifiquement, aux menaces que l'informatique quantique devrait faire peser sur le chiffrement à clé publique (tableau 5.1) (section 2.1.3). Certains de ces efforts sont axés sur les caractéristiques exclusives de certaines entreprises, ce qui permettrait à ces dernières d'acquérir un avantage commercial sur leurs concurrents (DeNardis, 2022).

Tableau 5.1 Aperçu des efforts de normalisation quantique

Organisme de normalisation	Principaux sujets concernés	Type de produits
Les travaux pertinents de l'*Institut européen des normes de télécommunications (ETSI)* se déroulent au sein du comité technique sur la cybersécurité (CYBER) et du groupe des spécifications industrielles (ISG) sur l'échange quantique de clés (QKD).	QKD : authentification, composants et interfaces internes; architectures et cadres; vocabulaire; études de cas; caractérisation optique. Impact de l'informatique quantique sur les systèmes de TIC. Cryptographie résistante aux méthodes quantiques.	Informatifs : rapports de groupe, rapports techniques, livres blancs, guides de l'ETSI. Normatifs : caractéristiques techniques et de groupe.

Organisme de normalisation	Principaux sujets concernés	Type de produits
L'*Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* est une association professionnelle basée aux États-Unis qui a établi des normes concernant l'électronique grand public, les ordinateurs et les télécommunications.	Communication quantique définie par logiciel. Définitions des technologies quantiques. Mesures et évaluations des performances de l'informatique quantique.	Normatifs : normes.
L'*Internet Research Task Force (IRTF)* se concentre sur les questions de recherche à long terme touchant Internet, tandis qu'un organisme parallèle, l'*Internet Engineering Task Force (IETF)*, porte son attention sur les questions à court terme d'ingénierie et d'élaboration de normes.	Applications, cas d'utilisation et principes architecturaux de l'Internet quantique. Passage à la QRC.	Informatifs : documents d'information. Normatifs : normes proposées.
L'Organisation internationale de normalisation (ISO), la Commission électrotechnique internationale (CEI) et le Comité technique mixte (JTC) comptent deux entités qui élaborent des normes en matière de technologie quantique : le groupe de travail 14 Quantum computing et le sous-comité 27 Information security, qui traite spécifiquement de la sécurité du QKD.	Terminologie. Exigences de sécurité; méthodes d'essai et d'évaluation du QKD.	Normatifs : normes internationales.
Les commissions d'étude (CE) du *Secteur de la normalisation des télécommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT-T)* regroupent des experts mondiaux afin d'élaborer des normes internationales connues sous le nom de « Recommandations UIT-T ». La CE 11 (Exigences de signalisation), la CE 13 (Réseaux futurs), la CE 15 (Transport, accès et installations domestiques) et la CE 17 (Sécurité) sont en train d'élaborer des documents intéressant le secteur quantique.	Sécurité, gestion et architecture des réseaux de QKD.	Normatifs : recommandations. Normatifs : normes internationales.

Adapté de : UIT (2021)

Le gouvernement chinois travaille également à l'élaboration de normes relatives aux technologies quantiques. En 2021, il a annoncé son Programme national de développement de la normalisation, qui établit que la normalisation est une priorité nationale et fixe des orientations nationales sur la manière dont le secteur public, les chercheurs et les individus doivent l'intégrer dans leur travail (Frantz, 2022). Selon ce programme, les chercheurs et les scientifiques devront consacrer une partie de leurs projets à la normalisation. La stratégie se focalise sur l'établissement de normes nationales, mais il reste à voir dans quelle mesure ces normes correspondront aux normes internationales sur les technologies quantiques définies par divers organismes (Frantz, 2022). Le SAC/TC578 — le groupe chinois chargé d'élaborer ces normes — a commencé à se pencher sur la terminologie et sur les définitions élémentaires de l'informatique quantique en 2020 (CIRA, 2022).

Aux premiers stades du développement technologique, la fragmentation des normes peut s'expliquer par la nécessité de concevoir rapidement de nouveaux produits, plutôt que de se concentrer sur l'interopérabilité (DeNardis, 2022). Le Groupe spécialisé de l'UIT sur l'informatique quantique prévient toutefois que « les normes candidates peuvent se chevaucher et entrer en conflit, empêchant l'adoption répandue d'une norme unique et obligeant les entreprises à supporter la charge financière de rendre leurs produits compatibles avec de multiples normes » (UIT, 2021). Une fois que des normes et des produits opérationnels se concrétisent, l'harmonisation — possiblement encouragée par les politiques de sécurité ou d'approvisionnement des gouvernements — peut remédier aux problèmes de fragmentation et assurer l'innovation (DeNardis, 2022).

La normalisation n'a cependant pas la même incidence juridique que les lois et les règlements. Comme indiqué à la section 5.1, les lois sur la protection des données et de la vie privée qui s'appuient sur le chiffrement pour prévenir les atteintes à la confidentialité des données ou limiter la responsabilité ne tiennent pas compte de l'informatique quantique. À cet égard, les normes s'avéreront efficaces pour garantir la sécurité de l'infrastructure numérique et des communications privées si elles sont incorporées dans les lois et les règlements et appliquées par l'État administratif (Girard, 2019; Bruno et Spano, 2021). Le Canada prend des mesures dans ce sens; certains commentateurs estiment toutefois que les propositions législatives confèrent trop de pouvoir discrétionnaire aux organismes de réglementation (ACLC, 2022; Parsons, 2022), ce qui accroît le risque de capture réglementaire (section 5.6).

La prédominance de certains pays dans l'élaboration des normes pourrait avoir des conséquences négatives pour les producteurs et les utilisateurs finaux canadiens de produits quantiques

Malgré la présence d'experts du Canada dans des organismes internationaux de normalisation (Conseil canadien des normes, 2021), l'expérience de l'élaboration de normes internationales en matière d'IA montre que les principaux acteurs du marché (p. ex. la Chine, les États-Unis et l'Union européenne) pourraient introduire leurs réglementations et règles nationales dans les normes internationales afin de créer ou de consolider un avantage au premier arrivé (SRI, 2023). La prédominance de certains pays dans la normalisation pourrait conduire à une fragmentation des normes, ce qui nuirait à l'interopérabilité des technologies, au commerce international et, en fin de compte, à la diffusion et à l'adoption (SRI, 2023).

Alors que certaines normes internationales pourraient être adaptées au contexte canadien, une participation soutenue du Canada aux processus de normalisation des technologies quantiques pourrait lui conférer une position de leadership dans la conception de systèmes internationaux d'évaluation de la conformité et de programmes d'agrément favorables au commerce international (SRI, 2023). De l'avis du comité, étant donné la petite taille du marché national, il est nécessaire d'influencer les normes internationales et de garantir l'accès aux marchés internationaux pour assurer une large adoption des technologies quantiques produites au Canada (chapitre 6).

5.5 Réglementation nationale et étrangère du commerce des technologies et de l'infrastructure à double usage

Les technologies à double usage sont conçues pour une utilisation commerciale ou civile, mais pourraient également être utilisées à des fins militaires (SDC, 2021a). Les contrôles à l'exportation des technologies à double usage sont établis au moyen de listes spéciales que les pays dressent volontairement conformément à l'Arrangement de Wassenaar de 1995 (WAS, 2021). En 2022, 42 États, dont le Canada et ses alliés internationaux (Australie, Nouvelle-Zélande, Royaume-Uni, États-Unis, Union européenne), respectaient cet arrangement (WAS, 2022). Ce dernier inclut plusieurs technologies quantiques, notamment les gravimètres, la QRC et certains dispositifs d'interférence quantique supraconducteurs (SQUID) (WAS, 2021). L'Arrangement mentionne également les prédécesseurs du chiffrement, de la détection et de l'informatique quantiques, afin d'empêcher leur exportation vers certains pays.

5.5.1 Réglementation nationale en matière de contrôle des exportations et des importations

La *Loi sur les licences d'exportation et d'importation* (LLEI) donne au gouverneur en conseil le pouvoir de restreindre l'exportation de certaines marchandises à partir du Canada (GC, 1985a). Depuis 2004, les règles de la LLEI s'étendent au transfert de technologie, qui s'entend notamment « des données techniques, de l'assistance technique et des renseignements nécessaires à la mise au point, à la production ou à l'utilisation d'un article figurant sur la liste des marchandises d'exportation contrôlée ». Les technologies quantiques répertoriées dans l'Arrangement de Wassenaar sont incluses dans la catégorie « Double usage » de la *Liste des marchandises et technologies d'exportation contrôlée*, ce qui signifie que leur exportation nécessite une licence. La LLEI prévoit un pouvoir discrétionnaire administratif dans la procédure d'octroi des licences d'exportation au Canada. Le gouvernement du Canada peut inscrire un article sur la liste s'il estime que celui-ci peut être utilisé pour menacer la sécurité nationale, porter atteinte à la souveraineté du Canada, mettre en danger la sécurité des personnes au Canada, perturber la fourniture de services essentiels ou nuire à un autre pays ou à une autre région du monde (GC, 1985a).

Les obligations commerciales internationales du Canada n'interdisent pas la mise en place de contrôles et de mesures de protection supplémentaires concernant les technologies quantiques. L'article XXI de l'*Accord général sur les tarifs douaniers et le commerce* de 1947 prévoit que les pays peuvent introduire des exceptions aux règles commerciales pour protéger les « intérêts essentiels de sa sécurité » (OMC, 1947). Bien que la signification de l'expression « intérêts essentiels de sa sécurité » soit ambiguë, les risques présentés par les technologies quantiques — en particulier leur potentiel de déstabilisation des infrastructures nationales ou des capacités de renseignement et militaires — peuvent être similaires à ceux posés par d'autres technologies réglementées qui bénéficient d'exceptions commerciales (Forcese et West, 2021; Dekker et Martin-Bariteau, 2022).

Relativement peu d'entreprises canadiennes exportent leurs produits; parmi celles qui le font, la grande majorité exportent uniquement vers les États-Unis. En 2017, seulement 12 % des PME nationales ont exporté et en 2018, le Canada se classait au 32e rang mondial pour les exportations de haute technologie (Asselin et Speer, 2019). Ainsi, des contrôles à l'exportation supplémentaires peuvent représenter une charge pour les entreprises nationales désireuses de participer au commerce international et de vendre des technologies à des fins sécuritaires et légitimes. En réduisant la taille du marché potentiel pour la diffusion des technologies, la réglementation et les restrictions commerciales rendent également les entreprises moins attrayantes pour les investisseurs. À long terme, les contrôles à l'exportation peuvent être inefficaces, car ils stimulent le

développement de réseaux technologiques étrangers autonomes résistants à toute restriction (Hoofnagle et Garfinkel, 2021).

5.5.2 Réglementation du contrôle des exportations et des importations

Le contrôle des exportations de matériaux et de technologies est un instrument important pour les pays qui souhaitent conserver leur avantage en matière d'innovation. Certains d'entre eux, y compris les alliés du Canada, s'orientent vers une approche restrictive des technologies, des matériaux et des équipements quantiques.

La réglementation étrangère sur l'infrastructure et les matériaux peut perturber les chaînes d'approvisionnement et nuire aux producteurs et aux utilisateurs finaux de technologie quantique au Canada

Les entreprises et les centres de recherche canadiens dépendent des ressources étrangères pour mener à bien leurs travaux (section 3.3.1). Cette dépendance à l'égard des chaînes d'approvisionnement internationales présente des risques géopolitiques, car les pays fournisseurs d'infrastructure et de matériaux pourraient adopter des règlements sur le contrôle des exportations qui auraient des répercussions sur les entreprises, les chercheurs et les utilisateurs finaux canadiens (INDU, 2022b) (encadré 5.4).

Encadré 5.4 Contrôles à l'exportation des réfrigérateurs à dilution

L'acquisition de réfrigérateurs à dilution est un domaine dans lequel la réglementation sur le contrôle des exportations peut se concrétiser. Il faut parfois plusieurs mois à une entreprise pour se procurer un réfrigérateur à dilution spécialisé, qui peut coûter entre 500 000 $ et 1 million de dollars et qui n'est fabriqué sur mesure que par une poignée d'entreprises (Giles, 2019). Le circuit de refroidissement des réfrigérateurs à dilution repose sur une combinaison de gaz pour le surrefroidissement. L'un de ces gaz est l'hélium 3, un isotope de l'hélium qui n'existe en quantité que sur la lune (Bilder, 2009). Sur Terre, il s'agit généralement d'un sous-produit de programmes gouvernementaux de recherche et d'armement nucléaires, ce qui limite sa disponibilité (Giles, 2019).

Les principaux partenaires commerciaux du Canada, l'Union européenne et les États-Unis, ont inclus l'hélium 3 et les réfrigérateurs à hélium 3

(Continue)

(a continué)

dans leurs listes d'articles à double usage, ce qui signifie que les autorités peuvent refuser leur exportation à certains acheteurs légitimes des milieux des affaires et de la recherche (CE, 2020; AMC, 2020; Kaartosalmi, 2021). Bien que les contrôles à l'exportation ne s'appliquent pas aux réfrigérateurs à hélium 3 utilisés en informatique quantique, ces mêmes réfrigérateurs sont employés dans les installations et les usines de tritium. Les autorités de contrôle des exportations peuvent imposer des interdictions de manière discrétionnaire, ce qui crée de l'incertitude et un fardeau bureaucratique pour les producteurs et les utilisateurs finaux de réfrigérateurs à dilution (Kaartosalmi, 2021).

En outre, le recours aux réfrigérateurs à dilution cryogénique en informatique quantique a soulevé le débat sur leur inscription sur les listes de contrôle des exportations (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). L'Union européenne et les États-Unis ont envisagé de les qualifier d'équipement à double usage. Par exemple, le Bureau of Industry and Security (BIS) du Département américain du commerce a envisagé de placer les réfrigérateurs à dilution quantique sur la liste des technologies émergentes contrôlées en vertu de la Loi sur la réforme du contrôle des exportations de 2018 (*Export Control Reform Act of 2018*); toutefois, aucune décision finale n'a été prise (Gouv. des É.-U., 2018; Hoofnagle et Garfinkel, 2021; Torres Trade Law, 2022).

Les États-Unis ont envisagé des contrôles supplémentaires sur les exportations de technologies quantiques

Outre l'imposition de contrôles sur les matériaux et l'équipement, certains pays peuvent envisager de limiter l'exportation des technologies quantiques proprement dites. Cela peut créer d'importantes difficultés pour les utilisateurs au Canada, en particulier si ces technologies offrent des avantages sociaux, économiques ou militaires et ne sont pas produites sur le territoire national. En 2018, le BIS a publié un avis préalable de proposition de réglementation pour solliciter des commentaires sur les contrôles à l'exportation pour un certain nombre de technologies en vertu de la Loi sur la réforme du contrôle des exportations de 2018 (BIS, 2018). L'avis désigne nommément les technologies quantiques d'information et de détection comme des « technologies émergentes et fondamentales » pour le contrôle à l'exportation « parce qu'elles pourraient être employées dans les armes conventionnelles, le recueil de renseignements, les armes de destruction massive ou le terrorisme, ou qu'elles pourraient fournir aux États-Unis un avantage qualitatif sur le plan militaire ou en matière de renseignement » (BIS, 2018). En 2019, le BIS a imposé des contrôles sur les algorithmes cryptographiques postquantiques (BIS, 2019), mais n'a

pas émis d'ordonnances sur d'autres technologies quantiques ne figurant pas dans l'Arrangement de Wassenaar (Torres Trade Law, 2022)[13].

Certaines recherches indiquent toutefois que « l'imposition de nouveaux contrôles à l'exportation sur l'informatique et la technologie des communications quantiques ralentirait les progrès scientifiques et, compte tenu du stade précoce de ces technologies, il est encore impossible d'appliquer des contrôles à l'exportation qui ciblent les applications pertinentes pour la défense » (Parker *et al.*, 2022). Cette opinion contredit les évaluations plus optimistes de la maturité et de la commercialisation des technologies quantiques à des fins de défense (p. ex. radar quantique de détection des engins furtifs ou capteurs gravitationnels et magnétiques de mesure et de renseignement électromagnétique) (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Si ce dernier point de vue prévaut, des règlements restrictifs en matière de contrôle des exportations seront adoptés. Dans le même temps, les contrôles américains à l'exportation ne sont pas absolus et peuvent ne pas s'appliquer aux partenaires commerciaux et aux collaborations de recherche des États-Unis approuvés (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). À titre d'exemple, le Canada et les États-Unis intensifient leur coopération sur le marché des semiconducteurs. Les partenariats qui en émergent renforcent le rôle du Canada dans les chaînes d'approvisionnement en semiconducteurs et atténuent les risques de perturbation de la chaîne d'approvisionnement pour les producteurs et les utilisateurs de technologies nationaux (encadré 5.5).

Encadré 5.5 Coopération canado-américaine dans le domaine des semiconducteurs

En août 2022, le Congrès américain a adopté la *Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors (CHIPS) and Science Act*, qui alloue 280 milliards de dollars américains au renforcement de l'industrie des semiconducteurs. Cette décision offre des possibilités aux secteurs public et privé canadiens. En effet, le gouvernement du Canada peut s'appuyer sur ses accords commerciaux avec les États-Unis et coopérer avec le secteur privé pour acquérir des semiconducteurs directement auprès des producteurs américains, réduisant ainsi le risque de perturbation de la chaîne d'approvisionnement (Budning *et al.*, 2023). De plus, comme mentionné à la section 3.1.3, le gouvernement du Canada a signé en 2023 un protocole d'entente avec IBM visant le développement de la R-D nationale et la fabrication de semiconducteurs au Québec grâce à un corridor de fabrication transfrontalier (GC, 2023c).

13 Les États-Unis ont imposé des restrictions supplémentaires à l'exportation à l'encontre de certains pays et entités (Reisinge et Salamatin, 2022).

En 2022, le gouvernement du Canada a publié sa stratégie indo-pacifique, qui vise notamment à « accroître les échanges commerciaux et les investissements et renforcer la résilience des chaînes d'approvisionnement » (GC, 2022e). Bien que la stratégie ne mentionne pas précisément les technologies quantiques, elle comprend plusieurs programmes et domaines de coopération (p. ex. les missions commerciales et d'exportation, la sécurité de l'information, l'interopérabilité et la normalisation des technologies), qui pourraient réduire les risques de perturbation de la chaîne d'approvisionnement et faciliter la commercialisation et l'adoption internationale des technologies quantiques produites au Canada.

L'Union européenne soutient l'accès public aux technologies quantiques

L'approche de l'Union européenne en ce qui concerne les technologies quantiques favorise l'ouverture et se concentre sur les applications centrées sur l'humain et la lutte contre la surveillance. Son initiative d'un milliard d'euros visant à soutenir les technologies quantiques prévoit des « applications inspirées par les utilisateurs finaux dans les réseaux quantiques et […] un chiffrement quantique reposant sur la génération de nombres aléatoires dans des "dispositifs bon marché" » (Hoofnagle et Garfinkel, 2021). Cette posture porte à croire que l'Union européenne a des projets à long terme pour promouvoir un Internet quantique de bout en bout largement accessible. L'orientation antisurveillance et centrée sur l'humain de la stratégie d'adoption quantique de l'Union européenne s'aligne sur plusieurs avis de tribunaux européens qui protègent les résidents contre le recueil de renseignements par les agences américaines (Hoofnagle et Garfinkel, 2021).

La Commission européenne reconnaît qu'une réglementation sur le contrôle des exportations prématurée et motivée par la peur peut étouffer complètement la croissance de certains secteurs quantiques (CE, 2022). C'est pourquoi l'Union européenne prévoit lancer des consultations avec des alliés internationaux — notamment les États-Unis — sur l'élaboration d'approches communes pour l'industrie quantique, dans l'espoir de garantir la croissance de cette industrie en Europe (CE, 2022). Il reste à voir si elle adoptera une approche plus restrictive à l'égard des technologies quantiques, semblable à celle envisagée par les États-Unis. La Déclaration commune du Conseil du commerce et de la technologie Union européenne–États-Unis, publiée en 2022, ne mentionne pas la coordination des politiques quantiques nationales comme un objectif (CCT 2022). Des efforts de coordination sont déployés dans le cadre de l'Arrangement de Wassenaar, au sein des comités de normalisation et à l'intérieur des régimes de sanctions adoptés à l'encontre de certains pays.

5.6 Incertitude réglementaire et risque de capture réglementaire

L'*incertitude réglementaire* est « l'incertitude concernant l'environnement réglementaire global, qui peut être déclenchée par un large éventail d'événements liés à la réglementation, tels que la promulgation d'un nouveau règlement, le respect ou le non-respect de la réglementation par une entreprise, une enquête réglementaire ou une poursuite contestant l'action réglementaire d'un organisme » (Xie, 2022). Certains chercheurs affirment que l'incertitude concernant les externalités, qui incluent la réglementation, reporte les investissements dans l'adoption technologique à un moment où les risques d'investissement sont moindres et où la certitude est plus grande (Yang *et al.*, 2004; Frederiks *et al.*, 2022). Cela est particulièrement vrai lorsque les organisations s'attendent à recevoir des orientations plus claires de la part des organismes de réglementation à court ou moyen terme (Hoffmann *et al.*, 2009).

L'incertitude réglementaire pourrait entraver l'adoption des technologies quantiques par les utilisateurs finaux potentiels

Les effets négatifs de l'incertitude réglementaire sur le développement, la diffusion et l'adoption des technologies par les utilisateurs finaux sont illustrés par quelques exemples. Au Canada, l'incertitude réglementaire concernant l'assemblage en usine et l'attribution des autorisations pour les petits réacteurs modulaires a été citée comme un obstacle à la commercialisation à grande échelle de ces dispositifs (Twyman *et al.*, 2021). Dans l'Union européenne, le flou juridique entourant la classification de l'édition génomique dans les cultures a sapé la confiance dans le procédé (Jones, 2015). Aux États-Unis, l'incertitude réglementaire a ralenti les investissements dans les énergies renouvelables et les procédés de stockage de l'énergie (Outka, 2012; Stein, 2014). En 2021, Google a publié les résultats d'une enquête internationale sur l'adoption de l'informatique en nuage menée auprès de 1 363 cadres supérieurs du secteur financier en Australie, au Canada, en France, en Allemagne, à Hong Kong, en Indonésie, au Japon, à Singapour, au Royaume-Uni et aux États-Unis; 84 % des personnes interrogées estimaient que les examens et les approbations réglementaires prenaient trop de temps et 78 % considéraient que l'incertitude réglementaire concernant l'utilisation de l'informatique en nuage était un obstacle à l'adoption plus répandue de cette technologie (Maufe, 2021).

La réglementation peut créer des conditions favorables à certains acteurs du marché

La *capture réglementaire* se produit lorsque différents groupes d'intérêt influencent l'élaboration des politiques au détriment de l'intérêt public général (Helm, 2006). La participation de certains acteurs industriels dans le processus réglementaire peut affaiblir les normes de santé et de sécurité, étouffer la concurrence et l'innovation et minimiser l'importance d'autres sources de données probantes et de connaissances (Woodhouse, 2005).

L'une des raisons de la capture réglementaire — le manque d'expertise en la matière parmi les décideurs politiques — peut s'appliquer aux technologies quantiques (McCarty, 2013). Selon une étude réalisée pour le gouvernement du Canada en 2020, les décideurs politiques manquent de connaissances et de sensibilisation à propos des possibilités et des risques présentés par ces technologies (Doyletech Corporation, 2020). Cela peut s'expliquer en partie par le fait que les organismes gouvernementaux éprouvent des difficultés à recruter et à conserver des spécialistes des questions quantiques. Par exemple, aux États-Unis, les salaires élevés dans l'industrie, la lenteur du recrutement gouvernemental et les idées fausses sur le travail au gouvernement ont été cités comme les principaux facteurs empêchant les professionnels d'envisager des carrières dans l'administration en science de l'information quantique (NQCO, 2022).

L'union de l'expertise privée et de ressources importantes dans ce secteur peut accroître le déséquilibre de pouvoir entre l'industrie quantique et les décideurs politiques (FEM, 2022b). L'établissement de normes internationales est un champ réglementaire dans lequel les grandes entreprises ont réussi à promouvoir leurs propres intérêts (Büthe et Mattli, 2014). Par exemple, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) a adopté le « XML ouvert » de Microsoft comme norme internationale, améliorant ainsi les chances de l'entreprise d'accéder à de lucratifs contrats gouvernementaux. Cette décision a empêché les concurrents de Microsoft de proposer une autre option pour la compatibilité des documents sur plusieurs plateformes (Büthe et Mattli, 2014).

En outre, l'accumulation de connaissances et de ressources entre les mains de quelques acteurs pourrait avoir des conséquences géopolitiques négatives en aggravant les disparités entre les différents pays et régions du monde (FEM, 2022b). Selon le comité d'experts, le risque de capture réglementaire est plus grand lorsque la politique gouvernementale se concentre sur la stimulation de la production de technologies quantiques au détriment des besoins des utilisateurs finaux.

6

Conditions favorables à l'adoption

Constatations du chapitre

- Les conditions favorisant la *production* de technologies quantiques ne garantissent pas leur *adoption* par les utilisateurs finaux.
- Le gouvernement du Canada a été lent à mettre en œuvre des instruments politiques pour stimuler la demande d'innovation, se concentrant plutôt sur des instruments touchant l'offre. L'adoption des technologies quantiques par les secteurs public et privé nécessite des politiques et des instruments qui encouragent la demande de produits quantiques innovants.
- L'adoption des technologies quantiques repose sur un certain nombre de stratégies de facilitation, notamment la coopération public-privé (p. ex. marchés publics, partenariats ou conseils consultatifs), une surveillance du marché et une intervention réglementaire favorables à la concurrence, des initiatives émanant de l'industrie (p. ex. services professionnels, pôles régionaux ou consortiums industriels) et la constitution d'une main-d'œuvre quantique pour les secteurs qui l'adoptent.
- Des réformes seront probablement nécessaires pour former une main-d'œuvre prête pour le quantique, et pour mettre sur pied des programmes de développement des compétences axés sur le transfert d'expertise de la science de l'information quantique à la conception de technologies quantiques, ainsi que sur la coordination et la collaboration entre l'industrie et l'université et sur la formation concernant l'adoption.

Le Canada abrite un certain nombre de pôles de recherche et de PME qui se consacrent à la création, à la conception et à la production de technologies quantiques. Les politiques publiques stimulant la production technologique nationale sont bénéfiques à plusieurs titres, notamment parce qu'elles sécurisent les chaînes d'approvisionnement nationales, favorisent la formation de la main-d'œuvre quantique et jettent les bases de futurs partenariats pour la diffusion des technologies. Toutefois, la production de technologies quantiques ne se traduit pas automatiquement par leur adoption par les utilisateurs finaux. La création de conditions favorables à l'adoption à l'échelon national nécessite des actions coordonnées et délibérées de la part des différents ordres de gouvernement, ainsi que des universités et du secteur privé. Ce chapitre passe en revue plusieurs leviers susceptibles d'encourager l'adoption, notamment la coopération entre le secteur public et le secteur privé, la surveillance du marché favorisant la concurrence, les interventions réglementaires dans certains secteurs et les services de soutien

professionnel et consortiums émanant de l'industrie. En outre, il analyse le rôle de l'éducation, de la formation et de l'immigration dans la formation d'une main-d'œuvre prête pour le quantique pour les secteurs qui l'adoptent.

6.1 Coopération public-privé

Pour surmonter les difficultés techniques, institutionnelles, sociales, juridiques, réglementaires et économiques qui entravent l'adoption des technologies quantiques, il faudra un effort coordonné et collaboratif. Cet effort pourrait prendre diverses formes, notamment des marchés publics et des programmes gouvernementaux conçus pour soutenir l'innovation dans le secteur quantique, des partenariats public-privé (PPP) triple hélice, des conseils sectoriels et des comités consultatifs gouvernementaux qui servent d'interface entre le gouvernement et l'industrie et des processus collaboratifs d'élaboration de feuilles de route qui rassemblent un large éventail de parties prenantes pour établir des plans stratégiques.

6.1.1 Stimuler l'adoption grâce aux marchés publics et à autres programmes

Comme indiqué au chapitre 4, la politique d'innovation du Canada a toujours donné la priorité à l'offre dans le processus d'innovation (comme les investissements dans la recherche), tout en sous-utilisant les stratégies de diffusion et d'adoption des technologies. Des politiques d'innovation tournées vers la demande peuvent être nécessaires, en partie parce que les technologies quantiques sont en concurrence avec les technologies classiques qui, dans de nombreux cas, suffisent à répondre aux besoins des entreprises et sont moins chères et plus familières que leurs équivalents quantiques. Des politiques qui stimulent la demande de technologies quantiques peuvent être nécessaires pour que les utilisateurs finaux envisagent même d'expérimenter de nouvelles solutions.

Il existe des possibilités d'accroître le rôle des marchés publics pour stimuler l'adoption

Il est possible d'accroître le rôle des marchés publics, en particulier grâce à Solutions innovantes Canada (SIC), dans l'adoption des technologies quantiques dans le secteur public. Cette démarche est conforme aux objectifs de la *Stratégie quantique nationale* (SQN), qui a alloué un petit montant — 35 millions de dollars sur 7 ans — à SIC pour promouvoir la commercialisation des technologies quantiques (ISDE, 2023d). SIC comporte deux volets : Défi et Mise à l'essai

(ISDE, 2019b). En 2022, Innovation, Science et Développement économique (ISDE) a lancé le Plan de la commercialisation concernant les technologies quantiques dans le cadre du volet Mise à l'essai (ISDE, 2022e) (encadré 6.1). Toutefois, le volet Défi, qui se focalise sur la R-D « pour résoudre les problèmes opérationnels internes des ministères ou pour combler une lacune du marché » (ISDE, 2023c), pourrait être mieux adapté que le volet Mise à l'essai à la faible préparation technologique de nombreuses technologies quantiques. De plus, il offre aux PME quantiques la possibilité de mettre au point des solutions en collaboration avec des utilisateurs finaux du secteur public.

Encadré 6.1 Volet Mise à l'essai du Plan de commercialisation

Le Plan de commercialisation, élaboré dans le cadre du volet Mise à l'essai de SIC, offre aux PME admissibles la possibilité de concourir pour des contrats gouvernementaux, sous réserve de la « réussite des mises à l'essai et de la préparation au marché de leur innovation » concernant leurs prototypes (GC, 2021a). Les candidats retenus reçoivent un contrat d'essai initial de SIC, après quoi ils peuvent être inscrits sur la liste du Plan de commercialisation, quand la mise à l'essai a réussi; les acheteurs gouvernementaux ont ensuite la possibilité d'acquérir des innovations figurant sur cette liste, qui peuvent avoir des applications dans des secteurs tels que « défense, énergie, pharmacie, chimie, industries de pointe (automobile, aérospatiale, électronique, supraconducteurs), finance, ou transport et logistique » (Hemmadi, 2022; ISDE, 2022e).

Des stratégies de diffusion technologique, appuyées par le projet de Corporation d'innovation du Canada, pourraient favoriser l'adoption

Le budget 2022 prévoit la création de la Corporation d'innovation du Canada (CIC), qui est accompagnée d'une enveloppe d'environ un milliard de dollars sur cinq ans pour mener à bien son mandat (GC, 2022d) (encadré 6.2).

Encadré 6.2 Mandat et fonctions proposés de la Corporation d'innovation du Canada

Le mandat proposé pour la CIC est de fournir un financement et des services consultatifs pour encourager les entreprises canadiennes à lancer et à développer des activités de R-D, à développer des actifs incorporels (y compris la propriété intellectuelle) et à les conserver au Canada. Elle fournira les services suivants :

1. Soutien financier (offert sous forme de subventions et de contributions) pour encourager les activités de R-D dans divers secteurs économiques et à différents stades d'innovation;
2. Évaluations de l'impact du programme afin de suivre l'évolution des besoins du secteur privé, les tendances de l'écosystème de la recherche au Canada et les développements technologiques nationaux et mondiaux;
3. Services consultatifs (p. ex. informer les entreprises sur les possibilités de financement public) pour aider à formuler des propositions de projets de R-D, mettre les entreprises en contact avec des chercheurs et des services de R-D, établir des liens entre les entreprises de différents secteurs et apporter un soutien « à la création et à la conservation d'actifs incorporels ».

(GC, 2023)

Le mandat proposé pour la CIC s'inspire de celui de Business Finland (anciennement Tekes), en Finlande, et de l'Autorité israélienne pour l'innovation (IIA) (GC, 2022d). Toutefois, la fondation d'une agence d'innovation qui investit ou crée de nouvelles technologies, notamment quantiques, ne favorise pas nécessairement la diffusion et l'adoption technologiques. Par exemple, malgré la capacité de l'IIA à répondre rapidement aux demandes de financement, elle s'est toujours concentrée sur la *production* de nouvelles technologies, plutôt que sur leur *diffusion* (Breznitz *et al.*, 2018). Business Finland a obtenu de meilleurs résultats en matière de diffusion des technologies parce qu'elle a été créée dans ce but; en vertu de son mandat, elle peut rassembler les entreprises pour assurer la diffusion des technologies dans tous les secteurs économiques.

De l'avis du comité, reproduire le modèle finlandais au Canada accélérera la diffusion et l'adoption des technologies seulement si des éléments précis du modèle, tels que les consortiums interentreprises et l'intégration des utilisateurs avancés, sont adaptés à la situation nationale. En Finlande, une longue tradition

de cartels de fixation des prix et de consortiums de commercialisation, entre autres, a facilité la mobilisation collective des entreprises dans des projets d'innovation (Ornston, 2012). Il n'est pas certain que les conditions de réussite de Business Finland puissent être reproduites au Canada en raison de la fragmentation de l'industrie.

Les collectifs de brevets constituent l'un des piliers de la stratégie de propriété intellectuelle du Canada. Leur objectif est « d'aider les PME, qui exercent leurs activités dans un secteur technologique dynamique à prendre de l'expansion en répondant à leurs besoins en matière de brevets et d'autres PI [et de fournir] au gouvernement des renseignements précis sur les problèmes de PI auxquels les PME sont confrontées » (ISDE, 2019a). Le premier collectif de brevets financé par le gouvernement fédéral a été créé pour répondre aux besoins en matière de propriété intellectuelle des PME canadiennes œuvrant dans le secteur des technologies propres (CAI, 2023). Un collectif de brevets similaire pourrait être créé pour les PME quantiques.

Le Programme d'aide à la recherche industrielle pourrait faciliter l'adoption grâce à ses liens étroits avec l'industrie

La SQN cite le Programme d'aide à la recherche industrielle (PARI) du CNRC comme une source de soutien à la commercialisation des technologies quantiques par les PME nationales (ISDE, 2023d) (encadré 6.3).

Encadré 6.3 Programme d'aide à la recherche industrielle

Le PARI offre un soutien financier, des services consultatifs et l'accès à des réseaux d'entreprises aux PME canadiennes qui souhaitent commercialiser leur technologie. Il emploie plus de 260 personnes sur le terrain partout au Canada et propose des services adaptés aux besoins des entreprises. Vingt-neuf pour cent des clients du PARI proviennent du secteur des TIC ou de l'économie numérique, ce qui représente la plus grande concentration sectorielle.

Le PARI entre principalement en contact avec les PME par le biais de ses services consultatifs. Ses conseillers en technologie industrielle fournissent des conseils commerciaux et techniques et aiguillent les entreprises participantes vers des experts scientifiques et commerciaux. Les entreprises admissibles participent à trois principaux flux de

(Continue)

(a continué)

financement : le financement ordinaire (qui soutient les clients avec des subventions de 50 000 $ à 1 million), le processus d'évaluation accéléré (pour les petits projets de moins de 50 000 $) et les contributions de grande envergure (c.-à-d. de 1 à 10 millions de dollars). Le budget 2021 prévoyait 500 millions de dollars sur cinq ans pour accroître le financement du PARI; ce montant s'ajoute aux 700 millions prévus dans le budget 2018. Entre 2018 et 2022, le PARI a versé plus de 1,3 milliard aux entreprises admissibles.

(CNRC, 2022c)

En 2023, le gouvernement du Canada a annoncé que le PARI se joindrait à la CIC pour servir de base à l'exécution de son mandat en matière d'adoption technologique (GC, 2023a). Le PARI a été décrit comme un programme de « facilitation de la productivité », ce qui signifie qu'il « introduit progressivement des innovations de produits et de processus à petite échelle dans un large éventail d'industries établies » (Breznitz *et al.*, 2018). Il entretient des liens étroits avec le secteur privé, ce qui lui permet de faciliter la conception de solutions technologiques qui répondent aux problèmes immédiats des entreprises (Breznitz *et al.*, 2018). Le PARI offre également à ses clients des conseils en matière de propriété intellectuelle pour leurs stratégies de commercialisation des technologies (CNRC, 2023). Selon le comité, il est bien placé pour faciliter l'adoption quantique par les utilisateurs finaux en raison de ses liens étroits avec l'industrie. Toutefois, il n'est pas certain que son personnel ait une connaissance suffisante du secteur quantique canadien et des utilisateurs finaux potentiels.

Il existe des possibilités d'améliorer les services de soutien à la commercialisation des technologies du PARI

Selon l'évaluation du PARI réalisée par le CNRC, les clients et le personnel estiment que le programme soutient les entreprises dans les premières phases de la R-D (CNRC, 2022c). Certains clients ont toutefois indiqué que le programme pourrait améliorer les services (notamment offrir un meilleur accès aux réseaux d'entreprises) aux PME qui souhaitent accélérer la commercialisation de leurs prototypes. Les participants à l'évaluation ont relevé que le PARI pourrait encourager ses conseillers en technologie industrielle à nouer des liens avec les services commerciaux afin d'améliorer le développement à long terme des PME. Certains organismes étrangers de mandat similaire à celui du PARI offrent de tels services. Par exemple, Business Finland participe aux services consultatifs de

Team Finland[14] pour offrir à ses clients des conseils sur les stratégies de pénétration du marché. L'organisme appuie également la commercialisation des technologies par le biais de ses programmes TUTL et Innovation Scout (Valtakari *et al.*, 2018). La société suédoise Vinnova procure une aide financière et des informations à ses clients, puis les met en relation avec Business Sweden, un conseil d'exportation et d'investissement qui aide les entreprises nationales en phase de commercialisation à accroître leurs ventes mondiales (CNRC, 2022c; Business Sweden, s.d.-a, s.d.-b).

6.1.2 Partenariats public-privé et accords triple-hélice

Plusieurs pays étrangers ont mis en place des PPP afin d'accélérer l'adoption des technologies quantiques. Il est toutefois important de noter qu'il ne s'agit pas de PPP tels qu'on les imagine habituellement au Canada, lesquels incluent une relation contractuelle entre une entité gouvernementale et le secteur privé pour construire des infrastructures ou fournir des services (SPAC, 2022; CCPPP, s.d.), et qui ont fait l'objet de critiques (Siemiatycki, 2015). Il s'agit plutôt d'ententes qui fondent généralement des organisations hybrides composées d'entités des secteurs public et privé, notamment des gouvernements, des entreprises, des universités et d'autres organismes de recherche.

Pour mieux comprendre ce type d'organisation, on peut parler de modèle d'innovation *triple hélice*. Selon ce modèle, les collaborations intersectorielles entre l'industrie, le gouvernement et les universités — les trois « brins » de la triple hélice — peuvent faciliter la diffusion et l'adoption des technologies grâce à la création d'organisations hybrides à l'intersection de ces secteurs (Etzkowitz, 2008). Dans ce type d'accords, les frontières entre les secteurs sont floues, chacun d'entre eux assumant certains des rôles traditionnels des deux autres. Par exemple, les universités s'engagent dans le transfert de technologie et deviennent des incubateurs pour les nouvelles entreprises, tandis que les concepteurs de technologie de l'industrie assument un rôle de formation et d'éducation qui relève traditionnellement des universités. En outre, les PPP triple hélice contribuent non seulement à favoriser l'adoption des technologies, mais aussi à synchroniser les « normes, standards, principes et valeurs » entre les parties prenantes en sensibilisant à leurs aspects éthiques, juridiques et sociaux (Kop, 2020) (chapitres 4 et 5).

Plusieurs organisations hybrides fondées sur des PPP et facilitant l'adoption des technologies quantiques ont vu le jour à l'étranger, comme l'initiative allemande QuaST et les pôles d'innovation de Quantum Delta NL aux Pays-Bas (encadré 6.4). De son côté, le Canada a constitué des pôles de recherche en biofabrication et en

14 Team Finland est un réseau d'entités de développement commercial finlandais (Team Finland, s.d.).

sciences de la vie (GC, 2023b), qui sont quelque peu similaires aux pôles quantiques mis sur pied aux Pays-Bas; ils pourraient servir de modèles à la démarche canadienne relative aux technologies quantiques.

Encadré 6.4 Pôles d'innovation QuaST et Quantum Delta NL

En 2022, l'Allemagne a lancé un nouveau projet appelé QuaST (Quantum-Enabling Services and Tools for Industrial Applications), qui vise à faciliter l'accès à l'informatique quantique aux entreprises qui ont une connaissance minimale du sujet et ne disposent pas des ressources et de l'expertise nécessaires pour l'explorer par elles-mêmes (Mathas, 2022; Fraunhofer IKS, 2023). QuaST fournit aux utilisateurs des bibliothèques générales et des outils de développement pour résoudre des problèmes d'optimisation dans leur entreprise à l'aide d'algorithmes hybrides classiques et quantiques. Ces éléments feront ensuite l'objet de licences ou seront intégrés dans des outils logiciels en source ouverte (Mathas, 2022; Fraunhofer IKS, 2023). La démarche de QuaST s'inspire d'approches similaires suivies pour l'IA, et a été intégrée avec succès dans de nombreuses entreprises, en partie grâce à la disponibilité généralisée de bibliothèques de logiciels et d'outils de développement (Fraunhofer IKS, 2023). En outre, QuaST propose des formations et des séminaires qui aident les utilisateurs à tester et à adopter l'informatique quantique.

L'initiative est financée par le ministère fédéral allemand de l'Économie et de l'Action climatique et est supervisée par l'Institut Fraunhofer pour les systèmes cognitifs IKS. Parmi les autres partenaires du projet figurent d'autres instituts Fraunhofer, le Leibniz Supercomputing Centre, l'Université technique de Munich et plusieurs entreprises privées (Mathas, 2022; Fraunhofer IKS, 2023). Les premières mises en application comprennent la production de semiconducteurs et la logistique, ainsi que l'optimisation des processus commerciaux, des réseaux et des chaînes d'approvisionnement, et il est aussi prévu d'étudier des cas d'utilisation dans les secteurs pharmaceutique et automobile et dans d'autres industries où la sécurité est essentielle (Mathas, 2022; Fraunhofer IKS, 2023).

Quantum Delta NL est un PPP néerlandais composé d'entreprises technologiques, d'organismes gouvernementaux, d'universités et d'organismes de recherche quantique. Il s'efforce d'accélérer le

(Continue)

(a continué)

développement de l'écosystème quantique des Pays-Bas. Un élément crucial de sa stratégie a été la création de cinq pôles d'innovation partout au pays, qui sont spécialisés dans des domaines particuliers des technologies quantiques. Chaque pôle est lui-même un PPP regroupant plusieurs instituts de recherche, universités, entreprises établies et entreprises en démarrage (QDNL, 2019) :

Delft : informatique quantique, Internet quantique, réseaux.

Amsterdam : logiciels quantiques, détection quantique, simulation quantique.

Leiden : algorithmes quantiques appliqués, quantique et société.

Eindhoven : simulation quantique, informatique quantique hybride, QRC, protocoles quantiques, nanophotonique quantique, matériaux quantiques.

Twente : nanotechnologie quantique, électronique quantique, photonique quantique.

L'approche allemande pourrait s'avérer plus efficace que l'approche canadienne pour favoriser l'adoption

Le projet allemand QuaST est entièrement axé sur l'*adoption* des technologies quantiques par les entreprises non quantiques. En comparaison, l'approche canadienne est largement focalisée sur la *conception* et la *production* de technologies quantiques. Si une telle stratégie d'innovation peut aider le Canada à devenir un leader dans la production de technologies quantiques, elle ne garantit pas que les entreprises canadiennes investiront dans l'adoption de ces technologies. Le programme canadien analogue le plus proche du programme allemand QuaST est peut-être le pôle quantique d'IBM à l'Université de Sherbrooke, qui facilite la collaboration entre les chercheurs universitaires, les entreprises privées et les gouvernements (sections 3.1.3 et 6.3.2). Toutefois, il n'est pas spécifiquement conçu pour favoriser l'adoption des technologies quantiques.

Les PPP peuvent contribuer à accélérer l'adoption en cernant les applications dans les secteurs concernés

Comme indiqué au chapitre 2, la cadence et les perspectives d'adoption commerciale des technologies quantiques dépendent de la détermination d'applications pratiques à court terme et de cas d'utilisation dans des industries ou des secteurs donnés. En 2022, le Quantum Economic Development Consortium (QED-C) a entrepris une étude des PPP des domaines d'application technologique

autres que les technologies quantiques, afin de relever les leçons et les pratiques exemplaires concernant « la manière d'accélérer l'application des technologies par des partenariats public-privé » (QED-C, 2022c). À la suite de cet examen, la recommendation suivante fut formulé :

> *La façon la plus efficace de cerner un ensemble d'applications potentielles de l'informatique quantique à court terme présentant une valeur pour le gouvernement est de mettre en place un processus de découverte qui demande une coopération entre toutes les parties prenantes, des scientifiques quantiques aux experts en la matière, en passant par les utilisateurs finaux et les organismes de réglementation.*
>
> QED-C (2022b)

En outre, QED-C a constaté qu'il était important que ce processus de découverte se concentre sur un domaine ou un secteur précis dans lequel il existe déjà un intérêt notable pour l'intégration des technologies quantiques et où des progrès ont déjà été réalisés à cet égard. Si plusieurs domaines ou secteurs doivent être étudiés, des processus de découverte distincts seront nécessaires. L'objectif de ces processus devrait être de réaliser des évaluations approfondies des applications potentielles dans le domaine ou le secteur concerné, afin de déterminer des stratégies pour accélérer la conception et l'adoption des technologies quantiques dans ce domaine ou ce secteur (QED-C, 2022b). Le processus est similaire, tant dans sa conception que dans ses objectifs, à l'élaboration de feuilles de route sectorielles pour l'adoption des technologies quantiques (section 6.1.4).

6.1.3 Comités consultatifs sectoriels et gouvernementaux

Une autre démarche de collaboration public-privé visant à encourager l'adoption des technologies quantiques pourrait s'appuyer sur un conseil ou une table ronde qui faciliterait la coopération et les discussions entre les concepteurs et les utilisateurs, ainsi que les gouvernements, les universités et d'autres experts et parties prenantes. Parmi les différentes approches possibles, cette section en examine deux : (i) des comités consultatifs gouvernementaux représentant les parties prenantes d'un écosystème quantique et (ii) des comités sectoriels représentant les adopteurs des technologies quantiques. Le premier est un modèle couramment utilisé, des instances ayant été créées au Canada et aux États-Unis, et il tend à se concentrer davantage sur le développement des technologies quantiques. Le second modèle est, lui, moins courant et se concentre davantage sur l'adoption.

Les comités consultatifs nationaux peuvent jouer un rôle important en conseillant les gouvernements en matière d'adoption

Un modèle couramment employé pour la collaboration public-privé sur les technologies nouvelles et perturbatrices consiste à mettre sur pied un comité consultatif gouvernemental. Dans l'idéal, un comité consultatif sur les technologies quantiques serait composé de représentants et de parties prenantes de l'ensemble du secteur quantique d'un pays et chargé de conseiller les gouvernements sur l'élaboration et la mise en œuvre d'une stratégie quantique nationale. Selon le comité d'experts, il est important d'inclure un éventail diversifié d'expertise quantique au-delà des chercheurs et des concepteurs, par exemple, en intégrant des utilisateurs potentiels et des secteurs d'adoption. L'expertise du comité consultatif en matière de propriété intellectuelle sera notamment essentielle pour le Canada pour garantir que les innovations dans le secteur quantique ne sont pas perdues au profit d'autres pays, et que les entreprises canadiennes protègent et maintiennent leur liberté d'exploitation.

Le gouvernement du Canada a mis sur pied un tel organe consultatif, comme cela a été annoncé dans la SQN. Le Conseil consultatif sur la quantique fournira des conseils indépendants au gouvernement à propos de la mise en œuvre de la stratégie et de la croissance du secteur quantique au Canada. La composition complète du Conseil a été annoncée en juillet 2023 et comprend des représentants de l'industrie et du milieu universitaire, ainsi que d'un incubateur d'entreprises (ISDE, 2023b).

Le Conseil consultatif sur la quantique ressemble au National Quantum Initiative Advisory Committee (NQIAC) des États-Unis, qui a été fondé en 2019 par décret présidentiel (The White House, 2019), conformément à la Loi sur l'initiative quantique nationale (*National Quantum Initiative Act*) (U.S. Congress, 2018). En mai 2022, le NQIAC a été élevé, toujours par décret présidentiel (The White House, 2022a), au rang de comité consultatif présidentiel, « ce qui souligne que l'initiative quantique nationale est un effort pangouvernemental qui va au-delà des agences fédérales » (NQIAC, s.d.)[15]. L'objectif du NQIAC est le suivant :

> *Fournir constamment des conseils et des orientations au président, au Secrétaire à l'énergie et au Sous-comité du Conseil national des sciences et de la technologie sur la science de l'information quantique (QIS), sur le programme de l'Initiative nationale quantique (NQI) et sur les tendances et les évolutions de la science et de la technologie de l'information quantique.*
>
> Butler (2022)

15 Alors que dans sa première version, le NQIAC ne conseillait que le Secrétaire à l'énergie et le Sous-comité sur la science de l'information quantique du Conseil national de la science et de la technologie (NSTC) (The White House, 2019), il conseille désormais aussi directement le président et le Sous-comité du NSTC sur les répercussions économiques et sécuritaires de la science quantique (The White House, 2022a).

Le NQIAC est composé de personnes « représentant l'industrie, les universités, les laboratoires fédéraux ou d'autres agences fédérales » et comprend le directeur de l'Office of Science and Technology Policy, qui assure la coprésidence du comité (Beitler, 2020).

Des comités sectoriels financés par le gouvernement pourraient accélérer l'adoption dans divers secteurs

Comme il est noté à la section 6.1.2, les méthodes les plus efficaces pour cerner les applications potentielles à court terme des technologies quantiques et faciliter leur adoption sont les processus de découverte collaboratifs propres à un secteur ou à un domaine. Ces processus pourraient s'inspirer des conseils sectoriels de l'Ontario des années 1990. La stratégie industrielle sectorielle de l'Ontario durant cette décennie était liée au Fonds de partenariat sectoriel (Gouv. de l'Ont., 1992), une initiative visant à « fournir une aide financière aux projets coopératifs à partir d'une stratégie approuvée par les acteurs clés du secteur » (Wolfe, 2002). Pour pouvoir bénéficier d'un financement, un secteur devait élaborer une stratégie qui lui soit propre, dans le cadre d'un processus de collaboration réunissant un large éventail de parties prenantes clés, et aborder les défis et les occasions internes et externes de ce secteur, ses perspectives et ses buts et objectifs communs, et rédiger un plan stratégique pour les atteindre. Des fonds ont été mis à disposition d'initiatives sectorielles particulières décrites dans le plan, notamment pour le développement de capacités technologiques et d'infrastructure technologique spécialisée.
La responsabilité de l'élaboration de ces stratégies a été largement dévolue aux secteurs eux-mêmes, qui ont dû créer des forums ou des conseils à cette fin, rompant ainsi avec l'approche hiérarchique descendante de la politique industrielle de la province (Bradford, 1998; Wolfe, 2002). Si les résultats ont varié d'un secteur à l'autre, le processus lui-même a été largement considéré comme une réussite. Il a permis de définir les forces et les faiblesses propres à chaque secteur, ainsi que les occasions et les défis correspondants. Il a également facilité l'établissement de nouvelles relations et le renforcement des relations existantes entre les parties prenantes du secteur, ainsi que le discernement d'intérêts et d'objectifs communs et de stratégies pour les poursuivre en collaboration (Wolfe, 2002).

Une démarche similaire pourrait être suivie pour accélérer l'adoption des technologies quantiques dans différents secteurs : les gouvernements pourraient financer des secteurs pour qu'ils élaborent en collaboration des stratégies d'adoption de ces technologies dans leurs activités et financer des initiatives sectorielles particulières pour mettre en œuvre ces stratégies. Sa mise à exécution pourrait exiger la réalisation d'une feuille de route pour les technologies quantiques dans chaque secteur, qui contiendrait des propositions de financement pour certaines initiatives.

6.1.4 Feuilles de route technologiques

À mesure que les technologies quantiques s'éloignent de la science théorique pour devenir des produits commerciaux, l'utilisation de feuilles de route peut contribuer à accélérer leur déploiement et leur adoption. Les feuilles de route sont des outils couramment utilisés pour faciliter le développement et la diffusion de nouvelles technologies, souvent pour une technologie, une industrie ou un secteur, ou encore un pays, particulier. Elles peuvent aider à définir (i) les priorités et objectifs précis en matière de technologies quantiques d'une entreprise, d'un secteur ou d'un pays, (ii) les étapes pratiques nécessaires pour atteindre ces objectifs et (iii) les rôles et responsabilités des différents acteurs dans l'exécution de ces étapes.

En outre, l'élaboration de ces feuilles de route peut contribuer à mettre en évidence et à concevoir des solutions aux barrières qui entravent l'adoption, notamment les problèmes institutionnels liés à la politique d'innovation et au manque de main-d'œuvre prête pour le quantique; les problèmes juridiques et réglementaires touchant la propriété intellectuelle, la concurrence, les normes et le commerce et les problèmes sociaux et éthiques de sécurité, de protection de la vie privée et d'accès à la technologie. Le processus peut également permettre d'atténuer le battage médiatique autour des technologies quantiques en dissipant les affirmations exagérées concernant leurs capacités, leur utilité ou leur potentiel de transformation pour certaines applications ou certains secteurs.

Des feuilles de route pour des technologies quantiques spécifiques ont été publiées par des concepteurs, des agences gouvernementales et des chercheurs universitaires

Presque tous les principaux concepteurs d'ordinateurs quantiques ont publié des feuilles de route qui définissent les jalons qu'ils prévoient atteindre dans les prochaines années (Langione *et al.*, 2019b). Plusieurs gouvernements ont eux aussi produit des feuilles de route sur des technologies quantiques ou des questions connexes particulières. Par exemple :

- le Royaume-Uni a élaboré une feuille de route technique sur l'informatique quantique (Fruchtman et Choi, 2016);
- le Département américain de l'énergie a élaboré des feuilles de route sur les interconnexions quantiques[16] (ANL, 2022) et l'Internet quantique (van Dam, 2020);
- le Département américain de la sécurité intérieure s'est associé au NIST pour concevoir une feuille de route destinée à aider les organisations à se préparer à

16 Il s'agit de technologies qui « relient et distribuent des informations quantiques cohérentes entre les systèmes et à différentes échelles de distance pour permettre la détection, les communications et l'informatique quantiques » (ANL, 2022).

une cybersécurité résistante aux méthodes quantiques et à la mettre en œuvre (U.S. DHS, 2022);

- le Comité européen de normalisation (une association regroupant les organismes nationaux de normalisation de 34 pays européens) a élaboré une feuille de route de normalisation des technologies quantiques (CEN-CENELEC, 2023, s.d.).

En outre, une multitude de feuilles de route concernant certaines technologies quantiques ont été rédigées ces dernières années par des chercheurs et publiées dans des revues universitaires. En général, elles décrivent l'état actuel de la technologie, les écueils à surmonter pour son développement, les solutions possibles à ces écueils et le délai estimé pour atteindre la maturité technologique.

Les feuilles de route sectorielles sur les technologies quantiques peuvent contribuer à accélérer l'adoption

L'élaboration d'une feuille de route relative à l'adoption des technologies quantiques dans un secteur donné permet aux parties prenantes de s'engager dans un processus collaboratif visant à déterminer les possibilités et les difficultés les plus pertinentes pour les technologies quantiques dans leur domaine, à connaître les avantages potentiels et les risques, à partager les renseignements et les meilleures pratiques, à établir des chaînes de valeur et des réseaux intrasectoriels et, enfin, à créer une vision commune des buts et des objectifs au sujet des technologies quantiques dans ce secteur. Plusieurs secteurs qui devraient être des utilisateurs précoces ou à forte valeur ajoutée de ces technologies ont conçu leur propre feuille de route relative à l'adoption :

- Dans le domaine de la défense, le ministère canadien de la Défense nationale (MDN et FAC, 2021, 2023) et l'Armée australienne (Commonwealth d'Australie, 2021) ont rédigé de telles feuilles de route;
- Des organismes de recherche scientifique, notamment l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) (Bilton *et al.*, 2021), ont eux aussi réalisé des feuilles de route concernant l'adoption des technologies quantiques. De plus, des représentants des communautés européennes de l'astrophysique, de la cosmologie, de la physique fondamentale, de la géodésie et de l'observation de la Terre ont élaboré une feuille de route consacrée à l'envoi dans l'espace de capteurs quantiques à atomes froids, afin d'éclairer le programme scientifique de l'Agence spatiale européenne (Alonso *et al.*, 2022);
- Au Canada, le CNRC a consulté des parties prenantes de l'industrie minière et de l'industrie quantique, qui ont souligné la nécessité de concevoir une feuille de route afin de favoriser l'adoption des technologies quantiques dans leur industrie (CNRC, 2017a).

Les feuilles de route peuvent aider les pays ou les États à améliorer l'adoption

L'élaboration de feuilles de route nationales relatives aux technologies quantiques dans des pays peut aider leur gouvernement à cerner et à prioriser les industries ou les secteurs pour l'adoption des technologies quantiques. En effet, l'adoption au Canada sera probablement beaucoup plus facile pour les technologies quantiques qui correspondent aux besoins uniques du pays, qui peuvent être recensés durant la conception de la feuille de route (ainsi que par des organismes consultatifs sectoriels et gouvernementaux, voir la section 6.1.3). Par exemple, en raison de l'étendue du territoire canadien et du manque d'infrastructure dans les régions éloignées, les communications quantiques par satellite peuvent être particulièrement utiles. Parmi les autres caractéristiques importantes, on peut citer la taille et la démographie de la population canadienne, la taille et la composition des entreprises quantiques et non quantiques (c.-à-d. les grandes entreprises par rapport aux PME), les défis du Canada en matière d'innovation et la nécessité de protéger la propriété intellectuelle nationale.

Les feuilles de route nationales sur les technologies quantiques fournissent généralement des conseils et des orientations, détaillent les pratiques exemplaires et répertorient les initiatives lancées et prévues susceptibles de bénéficier d'un soutien financier de la part d'un ou de plusieurs ordres de gouvernement. La réalisation de feuilles de route offre une précieuse occasion d'inclure de multiples parties prenantes dans l'élaboration de stratégies nationales en matière quantique. Les meilleurs exemples font généralement appel à tous les ordres de gouvernement et cernent les possibilités de collaboration intersectorielle entre les parties prenantes du secteur privé et du milieu universitaire. Ce processus donne également à ces parties prenantes l'occasion de collaborer aux stratégies et aux politiques, et de partager connaissances, renseignements et pratiques exemplaires.

Plusieurs pays ont élaboré des feuilles de route nationales concernant les technologies quantiques, notamment l'Australie (CSIRO, 2020), l'Union européenne (UE, 2016), l'Allemagne (Filipp et Leibinger, 2021), les Pays-Bas (QDNL, 2019) et le Royaume-Uni (UKNQTP, 2015). Ces feuilles de route ont souvent été créées dans le cadre de consultations réunissant des membres de l'ensemble de l'écosystème quantique, notamment des concepteurs et des utilisateurs, des universités et d'autres organismes de recherche, des organismes gouvernementaux et des organes de réglementation. Par exemple, le processus d'élaboration de la feuille de route du Royaume-Uni s'est appuyé sur deux ateliers, qui ont réuni des représentants des secteurs universitaire, industriel et réglementaire afin de prioriser les objectifs nationaux et les possibilités de

commercialisation, de cerner les tendances et les moteurs de l'adoption des technologies quantiques, de déterminer les domaines de collaboration et de coordination, de définir les obstacles et les catalyseurs politiques et réglementaires et d'intégrer le point de vue des parties prenantes sur ces questions (IfM *et al.*, 2014; UKNQTP, 2015).

En outre, les associations industrielles quantiques de certains pays ont élaboré leurs propres feuilles de route. Par exemple, le Consortium européen de l'industrie quantique (QuIC), une association industrielle du secteur quantique européen, est en train de réaliser une feuille de route stratégique pour guider la politique gouvernementale et le soutien au secteur quantique européen, et pour améliorer la chaîne de valeur quantique en Europe (QuIC, s.d.-b).

Dans la SQN, le gouvernement fédéral a fait part de son intention de lancer un exercice d'élaboration de feuilles de route en collaboration avec des experts universitaires et industriels, qui « comprendront des objectifs, des jalons et des mesures détaillés que devront prendre le gouvernement, le milieu universitaire et l'industrie pour atteindre les objectifs de la mission » (ISDE, 2023d). L'exercice sera mené par trois groupes de travail, chacun se concentrant sur l'une des trois technologies de la stratégie : (i) l'informatique quantique, (ii) le chiffrement et les communications quantiques et (iii) la détection quantique. De l'avis du comité d'experts, le processus proposé est l'un des aspects les plus prometteurs de la SQN en ce qui concerne l'*adoption* de la technologie quantique, car il offre aux utilisateurs potentiels les possibilités les plus importantes de surmonter les obstacles et de saisir les occasions d'adoption.

Les feuilles de route peuvent contribuer à déterminer et à atténuer les lacunes et les obstacles dans les chaînes d'approvisionnement des technologies quantiques

Comme indiqué à la section 3.2, les technologies quantiques dépendent de chaînes d'approvisionnement complexes qui fournissent, notamment, les matières premières essentielles, les composants et les équipements manufacturés, ainsi que des installations de fabrication et de production spécialisées, dont beaucoup ne sont offerts que par un petit nombre d'entreprises ou de pays. Une connaissance détaillée de ces chaînes d'approvisionnement peut être utile pour cerner les obstacles, les occasions et les goulots d'étranglement que comporte la voie vers la commercialisation, ainsi que pour faciliter la collaboration dans le secteur quantique. Aux États-Unis, le NIST a chargé SRI International — un institut de recherche sans but lucratif qui gère le QED-C — d'élaborer une feuille de route sur la fabrication de technologies quantiques (O'Shea, 2022; SRII, 2022). Un exercice similaire pourrait aider le Canada à mieux se positionner dans les

grandes chaînes d'approvisionnement mondiales des technologies quantiques (en tant qu'importateur et exportateur de matériaux et de composants) et à établir des partenariats transfrontaliers contribuant à garantir la stabilité et la sécurité de ces chaînes d'approvisionnement.

6.2 Concurrence, normes et réglementation

Au Canada, l'activité économique est réglementée par les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux. Le gouvernement du Canada peut adopter des lois, des règlements et des politiques pour régir de nombreuses institutions financières (p. ex. les banques et les compagnies d'assurance) et les fournisseurs de télécommunications (p. ex. les fournisseurs de services Internet et les câblodistributeurs) (CRTC, 2018; BSIF, 2022b). L'intervention réglementaire (p. ex. les normes de sécurité de l'information et les règles de confidentialité des données) peut encourager l'adoption des technologies quantiques par les secteurs économiques concernés, même en l'absence de règles visant propres à la technologie. Cependant, selon le comité, la réglementation n'est pas un substitut à la concurrence pour favoriser l'adoption, mais plutôt une démarche complémentaire. Par exemple, des réformes politiques favorables à la concurrence pourraient avoir un effet d'entraînement sur l'adoption des technologies quantiques dans des secteurs caractérisés par une forte intégration verticale, comme le secteur des télécommunications canadien.

6.2.1 Concurrence

Une surveillance réglementaire favorable à la concurrence peut stimuler l'adoption par le secteur des télécommunications

Les entreprises quantiques canadiennes peuvent se heurter à des obstacles à la diffusion de leurs technologies parce que l'un de leurs principaux utilisateurs finaux potentiels, le secteur des télécommunications, n'est pas suffisamment motivé à tirer parti des innovations pour obtenir un avantage concurrentiel (OCDE, 2021a) (chapitre 4). L'étude sur le Canada réalisée en 2021 par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) souligne que renforcer la concurrence dans le secteur des télécommunications est une priorité politique (OCDE, 2021a). Sur les marchés qui ne sont pas suffisamment concurrentiels ou qui sont intrinsèquement enclins à la concentration, la réglementation peut contribuer à atteindre les objectifs d'un marché concurrentiel (GECLMRT, 2020). Bien que la *Loi sur les télécommunications* mentionne l'accroissement de la compétitivité comme un objectif politique, elle manque « d'orientations politiques précises concernant le recours à la concurrence » et sous-estime l'importance des forces du marché dans le secteur des

communications et leur rôle dans l'orientation et la limitation des pouvoirs réglementaires de l'État administratif. En outre, il n'est pas explicitement exigé que le Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes (CRTC) « surveille et évalue la concurrence dans les marchés des communications électroniques » (GECLMRT, 2020). À la lumière des problèmes législatifs décelés, le Groupe d'étude du cadre législatif en matière de radiodiffusion et de télécommunications (GECLMRT), créé par le gouvernement du Canada, a recommandé de modifier les objectifs politiques de la *Loi sur les télécommunications*. Réformer le pouvoir discrétionnaire du CRTC de s'abstenir de réglementer les fournisseurs de services pourrait souligner l'importance de la concurrence comme principe directeur de la réglementation. Cette réforme, combinée aux obligations de surveillance mentionnées ci-dessus, permettrait au CRTC de rester au fait de l'état de la concurrence et d'appliquer les outils appropriés quand une intervention est nécessaire (GECLMRT, 2020).

6.2.2 Réglementation

Le secteur financier a tendance à adopter une démarche prudente face aux innovations technologiques. Cela pourrait ralentir l'adoption de plusieurs technologies quantiques, comme la cryptographie résistante aux méthodes quantiques (QRC) et, éventuellement, l'échange quantique de clés (QKD). Une réglementation qui imposerait au secteur financier l'obligation de respecter certaines normes de sécurité et de protection de la vie privée pourrait encourager l'adoption de technologies quantiques garantissant la conformité réglementaire.

Le Bureau du surintendant des institutions financières peut s'appuyer sur des instruments non contraignants et neutres sur le plan technologique pour encourager l'adoption

Au Canada, l'organisme fédéral de réglementation, le Bureau du surintendant des institutions financières (BSIF), est chargé, en vertu de la *Loi sur le Bureau du surintendant des institutions financières*, de « superviser les institutions financières pour s'assurer qu'elles sont en bonne santé financière et qu'elles se conforment aux lois qui les régissent et à ses exigences découlant de l'application de ces lois » (GC, 1985c). Le BSIF dispose de différents outils pour mener à bien son mandat, tels que « des directives de conformité, l'interdiction d'exercer ou la révocation d'administrateurs ou de cadres supérieurs » (Anand et Green, 2012). En outre, il est habilité à imposer des sanctions en vertu de la *Loi sur le Bureau du surintendant des institutions financières* (GC, 1985c).

Malgré la diversité des instruments dont il dispose, le BSIF préfère les lignes directrices non contraignantes aux règlements dans des domaines clés de son mandat légal, notamment celui de veiller à la préparation technologique et à la

cybersécurité des institutions financières fédérales canadiennes (Anand et Green, 2012). Sa ligne directrice *Gestion du risque lié aux technologies et du cyberrisque*, publiée en 2022, prévoit notamment qu'une institution financière fédérale « doit assidûment surveiller le caractère actuel des actifs logiciels et matériels utilisés dans l'environnement technologique à l'appui des processus opérationnels » et « mettre en œuvre de façon anticipée des plans d'atténuation et de gestion du risque découlant d'actifs non corrigés, périmés ou non soutenus, et remplacer ou mettre à niveau les actifs avant que les activités de maintenance ne cessent » (BSIF, 2022c).

Bien que les lignes directrices du BSIF soient neutres sur le plan technologique, le cadre réglementaire actuel ne l'empêche pas d'encourager les institutions financières à adopter toute technologie quantique susceptible de contribuer au respect des lignes directrices en matière de gestion des risques technologiques. En effet, dans sa *Feuille de route à court et à moyen terme proposée par le BSIF pour un paysage numérique en évolution*, il fait état de son intention de communiquer des précisions ou consulter sur les questions de gestion et de gouvernance des risques pour les technologies quantiques (BSIF, 2022d). Dans le même temps, il prévoit éviter « d'avoir à créer un nouveau système réglementaire pour ces technologies » et continuera à utiliser des lignes directrices souples comme principal instrument de surveillance, « compte tenu des risques et des vulnérabilités uniques qui varieront selon la taille de [l'institution financière fédérale], la portée et la complexité de ses activités et son profil de risque » (BSIF, 2022a).

Le CRTC ne fixe pas de normes de sécurité, ce qui limite sa capacité à imposer l'établissement de réseaux de communication résistants aux méthodes quantiques

En vertu de la *Loi sur les télécommunications*, le CRTC veille à ce que les fournisseurs de services de télécommunications (y compris les fournisseurs de services Internet et sans fil) offrent « l'accès aux Canadiens dans toutes les régions — rurales ou urbaines — du Canada à des services de télécommunication sûrs [...] et de qualité » (GC, 1993). Bien que le CRTC vérifie que les fournisseurs agissent dans l'intérêt public, la *Loi sur les télécommunications* ne mentionne pas la sécurité comme un objectif politique, et le CRTC n'est pas chargé « d'établir des normes de base de sécurité des réseaux » à l'intention des fournisseurs (GECLMRT, 2020) (encadré 6.5). Cela pourrait nuire à sa capacité à imposer l'implantation de réseaux de communications résistants aux méthodes quantiques.

Encadré 6.5 Politique sur les pratiques exemplaires de sécurité pour les fournisseurs canadiens de services de télécommunications

En l'absence de règles et de normes obligatoires, le Comité consultatif canadien pour la sécurité des télécommunications (CCCST) a élaboré la Politique sur les pratiques exemplaires de sécurité pour les fournisseurs canadiens de services de télécommunications (FCST ou FST) (CCCST, 2020). Créé en 2010, le CCCST compte parmi ses membres des hauts fonctionnaires du Service canadien du renseignement de sécurité, d'ISDE, de Sécurité publique Canada, de la GRC, du Centre canadien pour la cybersécurité et des représentants de l'industrie des télécommunications, notamment de Bell, Cogeco, Rogers, Shaw et TELUS (ISDE, 2020). La politique s'appuie sur diverses sources nationales et internationales (p. ex. le Centre de la sécurité des télécommunications, l'Organisation internationale de normalisation et le NIST), qui s'occupent de sujets particuliers (CCCST, 2020). Ces pratiques ne sont toutefois pas juridiquement contraignantes et il n'existe pas de régime uniforme applicable à la sécurité des réseaux dans l'environnement interconnecté des télécommunications canadiennes (GECLMRT, 2020). Elles sont neutres sur le plan technologique et « se veulent des conseils de haut niveau pouvant orienter la mise en œuvre des contrôles particuliers à chaque FCST » (CCCST, 2020).

En 2020, le GECLMRT a recommandé de modifier les objectifs politiques de la *Loi sur les télécommunications* « pour y inclure la sécurité et la fiabilité des réseaux de télécommunication et des services de communication électronique » (GECLMRT, 2020). Cela pourrait permettre au CRTC d'intervenir en « recueillant de l'information et en établissant des normes [de sécurité] pour les participants au marché des télécommunications sur cet enjeu » (GECLMRT, 2020). En outre, la codification de pratiques de sécurité obligatoires pourrait permettre au CRTC d'imposer une coopération plus étendue entre les FST et le Centre canadien pour la cybersécurité, qui travaille à des normes concernant la nouvelle génération de QRC (GECLMRT, 2020; Cybercentre, 2021).

Le projet de loi C-26 pourrait favoriser l'adoption de la QCR par les secteurs sous réglementation fédérale, mais il confère de larges pouvoirs discrétionnaires au gouvernement du Canada

En 2022, le gouvernement du Canada a déposé le projet de loi C-26 (*Loi concernant la cybersécurité, modifiant la Loi sur les télécommunications et apportant des modifications corrélatives à d'autres lois*) (Chambre des communes, 2022b). Le projet de loi propose un cadre juridique pour la protection de la cybersécurité des infrastructures clés du Canada, y compris dans les secteurs de la finance, de l'énergie, des transports et des télécommunications sous réglementation fédérale. C'est l'élément clé de la Stratégie nationale de cybersécurité fédérale, qui prévoit, entre autres, la mise au point d'algorithmes de QRC et la garantie que les systèmes vitaux sont résistants à la technologie quantique (SP, 2022). S'il est adopté, C-26 peut octroyer au gouvernement fédéral des pouvoirs supplémentaires afin d'ordonner aux industries réglementées d'implanter la QRC. En septembre 2023, il avait été renvoyé devant le Comité permanent de la sécurité publique et nationale de la Chambre des communes (Parlement du Canada, s.d.).

Les modifications à la *Loi sur les télécommunications* proposées dans C-26 ajoutent la promotion de la sécurité comme nouvel objectif de la politique de télécommunications (Chambre des communes, 2022b). Afin d'atteindre cet objectif, elles permettent au gouverneur en conseil et au ministre de l'Innovation, des Sciences et de l'Industrie d'ordonner à un FST de prendre toutes les mesures nécessaires pour sécuriser son réseau de télécommunications (Grant, 2022; Chambre des communes, 2022b). Le ministre pourrait, par exemple, exiger des FST qu'ils « introduisent des dispositions de sécurité facultatives dans les normes de télécommunications, qu'ils établissent une authentification multifactorielle efficace dans les interfaces internes et dans celles destinées aux clients ou qu'ils fassent tout ce qui a été normalisé à un endroit ou à un autre » (Parsons, 2022). Toutefois, en l'absence de définition claire d'une norme, il est difficile de déterminer si le gouvernement envisage des normes internationales ou nationales, ou s'il exigera des FST qu'ils adoptent des normes lui permettant d'accéder à leur trafic de données à des fins de sécurité nationale et d'application de la loi (Parsons, 2022).

Bien que le projet de loi C-26 puisse en fin de compte stimuler l'adoption de la QRC dans les secteurs sous réglementation fédérale, il a été critiqué pour ses lacunes en matière de secret et de responsabilité et pour son incapacité à restreindre les nouveaux pouvoirs de supervision du gouvernement (Parsons, 2022). C-26 ne reconnaît pas que le droit à la vie privée ou d'autres droits protégés par la Charte puissent supplanter les exigences de sécurité proposées (Parsons, 2022). Certains commentateurs lui reprochent également de ne pas s'attaquer aux problèmes persistants concernant le mandat du CRTC et d'attribuer plutôt à ISDE des

responsabilités réglementaires supplémentaires. Cette situation accroît le relatif manque de structure du rôle du CRTC au sein du gouvernement fédéral et dilue sa responsabilité en cas d'éventuelles lacunes réglementaires (Abramson et Bester, 2022). En outre, ISDE n'est pas tenu de publier les ordonnances ou règlements pris en vertu de la loi modifiée et pourrait interdire à leurs destinataires de les divulguer. Dans certains cas, le gouvernement fédéral pourrait adopter un règlement ou une ordonnance qui contredirait une décision du CRTC ou en annulerait certains aspects. Enfin, les coûts de mise en conformité avec la réglementation peuvent menacer la viabilité des petits fournisseurs (Parsons, 2022).

En plus de modifier la *Loi sur les télécommunications*, le projet de loi C-26 propose un nouveau texte législatif appelé *Loi sur la protection des cybersystèmes essentiels* (LPCE) (Chambre des communes, 2022b). Ce texte législatif crée de nouvelles obligations pour les exploitants de systèmes et de services essentiels (Chambre des communes, 2022b). Ces obligations comprennent l'établissement d'un programme réglementé de cybersécurité, l'atténuation des risques pour la chaîne d'approvisionnement détectés par le programme de cybersécurité et le respect des directives de cybersécurité du gouverneur en conseil. La LPCE permettrait également à certains organismes de réglementation (p. ex. la Banque du Canada, la Régie de l'énergie du Canada, la Commission canadienne de sûreté nucléaire, le BSIF, le ministre de l'Innovation, des Sciences et de l'Industrie, le ministre des Transports) de prendre des ordonnances et des sanctions en cas de non-respect des règles. Les défenseurs des droits de la personne et les experts en cybersécurité ont critiqué la LPCE en grande partie pour les mêmes raisons que pour les modifications à la *Loi sur les télécommunications*; elle est dépourvue de mécanismes obligatoires limitant l'abus des nouveaux pouvoirs de décision et de surveillance du gouvernement, y compris la capacité d'imposer des amendes importantes ou des peines d'emprisonnement en cas de non-respect et d'accéder à des données personnelles sensibles (ACLC, 2022).

6.2.3 Commerce international et normes

L'accès aux marchés internationaux par le biais d'accords commerciaux peut aider les entreprises quantiques canadiennes à accroître la taille de leur marché et à stimuler la diffusion des technologies quantiques. Bien que les accords commerciaux internationaux dont est partie le Canada, tels que l'Accord économique et commercial global (AECG) entre le Canada et l'Union européenne et l'Accord Canada-États-Unis-Mexique (ACEUM), ne contiennent pas de dispositions spécifiques sur les technologies quantiques, ils établissent un cadre général en ce qui concerne le commerce des biens, des services et des marchés publics qui permet aux entreprises quantiques nationales d'accéder aux marchés internationaux (INDU, 2022a).

Il est possible que le Service des délégués commerciaux n'ait pas une connaissance approfondie de la situation propre à l'industrie

Le Service des délégués commerciaux (SDC), qui relève d'Affaires mondiales Canada, fournit des services et un soutien aux entreprises canadiennes qui souhaitent exporter leurs produits (SDC, 2023). EKOS (2019) a effectué une recherche quantitative et qualitative auprès de ses clients pour évaluer s'ils étaient satisfaits de son travail; elle a notamment demandé aux participants ce qui les avait poussés à communiquer avec le SDC. La plupart ont répondu qu'ils souhaitaient obtenir des renseignements de base sur la façon de faire des affaires dans un marché donné (61 %) ou de l'aide en matière de ventes et de marketing internationaux (48 %). Parmi les autres raisons, citons l'obtention de renseignements sur les canaux de distribution (34 %) et sur la façon d'exporter des marchandises vers un marché (32 %) (EKOS, 2019).

Si la majorité des répondants considéraient le SDC comme une ressource importante à propos des questions de commerce international (en particulier avec les États-Unis), leur satisfaction variait considérablement selon le degré de spécialisation (EKOS, 2019). Les entreprises hautement spécialisées étaient moins susceptibles de trouver l'aide du SDC utile, ce qui porte à croire que son personnel n'est pas bien informé des situations industrielles particulières. Étant donné que le marché émergeant des technologies quantiques repose sur un nombre limité d'acheteurs spécialisés, le SDC n'est peut-être pas bien outillé pour soutenir les entreprises quantiques canadiennes qui souhaitent exporter leur technologie. Certains répondants ont également suggéré que le SDC « devrait fournir une aide plus poussée et avoir une meilleure expertise des activités des gouvernements sur leurs marchés, notamment en ce qui concerne les contrats et l'approvisionnement » (EKOS, 2019).

La normalisation peut favoriser l'adoption internationale des technologies quantiques canadiennes

Les normes établies dans le cadre d'un processus transparent, responsable et inclusif peuvent accélérer l'adoption des technologies quantiques par le marché et avoir une incidence sur un éventail d'applications commerciales. L'un des principaux avantages des normes est qu'elles réduisent les barrières commerciales, ce qui permet aux entreprises nationales de vendre plus facilement leur technologie à l'échelon international. Plusieurs accords internationaux, dont l'AECG et l'ACEUM, ont d'ailleurs pour objectif de réduire le délai de mise sur le marché des technologies en exigeant des signataires, ou en les encourageant à le faire, d'incorporer des normes internationales dans leur réglementation technique et à reconnaître les évaluations de conformité des autres signataires (EA, 2017) (encadré 6.6).

Encadré 6.6 Dispositions concernant les normes dans l'AECG et l'ACEUM

L'AECG comporte un chapitre sur les barrières techniques au commerce, qui encourage la coopération en matière de réglementation et de normes techniques afin d'éliminer les obstacles inutiles (EA, 2017). L'article 4.2 exige que les parties basent leur réglementation technique sur les normes internationales et l'article 4.4 prévoit une coopération pour assurer la compatibilité des réglementations techniques de chacun (GC, 2017). L'AECG comprend également un Protocole de reconnaissance mutuelle des résultats de l'évaluation de la conformité, qui établit la reconnaissance mutuelle des organismes nationaux d'agrément et d'évaluation de la conformité. Cela signifie qu'un organisme d'évaluation de la conformité de l'Union européenne peut tester les produits nationaux destinés à l'exportation vers le Canada conformément aux règles canadiennes, et inversement. Ces dispositions visent à faciliter les échanges et à bénéficier aux petites entreprises, pour lesquelles le paiement des frais d'essais dans les deux pays peut être prohibitif (EA, 2017).

L'ACEUM s'appuie sur les engagements pris par le Canada, le Mexique et les États-Unis dans le cadre de l'Accord sur les obstacles techniques au commerce de l'Organisation mondiale du commerce. Il encourage l'utilisation de normes internationales, prévoit un traitement national pour les procédures visant à reconnaître les entités d'évaluation de la conformité (p. ex. les organes de certification et d'inspection ou les laboratoires) et permet aux représentants des États de prendre part à la création de normes, de règlements et d'évaluations de la conformité par leurs homologues étrangers (AMC, 2018).

La participation à l'élaboration des normes peut contribuer à promouvoir les intérêts canadiens sur le plan mondial

L'établissement de normes peut servir de pratique anticoncurrentielle pour favoriser certaines entreprises et en exclure d'autres (section 5.4). Bien qu'un processus international d'élaboration de normes devrait atténuer ce problème, il est souvent dirigé par des organismes nationaux bien coordonnés, qui peuvent recueillir rapidement des renseignements pertinents (Büthe et Mattli, 2014). L'Organisation internationale de normalisation (ISO) et la Commission électrotechnique internationale, qui regroupent environ 85 % des normes internationales sur les produits, sont soumises à cette influence coordonnée (Büthe et Mattli, 2014). La SQN reconnaît ce problème et stipule que « le Canada

doit être représenté à diverses tables pour s'assurer que les normes internationales tiennent compte des principes canadiens et que les cadres mondiaux tiennent compte des intérêts des industries canadiennes » (ISDE, 2023d).

Les efforts des différents ministères et organismes, ainsi que la coopération interorganisationnelle et interministérielle, ont permis au Canada de jouer un rôle de premier plan dans les processus d'établissement de normes internationales pour divers secteurs, tels que l'agriculture et les produits alimentaires, les produits dangereux, les médicaments à usage humain et vétérinaire, les télécommunications et les ressources naturelles (TC, 2021). Par exemple, l'Institut des normes de gouvernance numérique, une division indépendante du Conseil de gouvernance numérique, est agréé par le Conseil canadien des normes pour élaborer des « normes de gouvernance des technologies numériques adaptées à une utilisation mondiale » (CGN, s.d.; INGN, s.d.). L'adoption d'une démarche similaire et coordonnée d'établissement de normes dans le domaine des technologies quantiques pourrait remédier au déséquilibre des pouvoirs dans le processus de normalisation internationale, aider les producteurs et les utilisateurs finaux canadiens de technologies quantiques à mieux se préparer à des normes nouvelles ou changeantes et, en fin de compte, faire en sorte que les entreprises canadiennes soient en mesure de diffuser leur technologie à l'échelle internationale. La coordination des activités de normalisation est particulièrement importante à la lumière de la stratégie nationale de normalisation 2022 du Canada, qui cite l'informatique quantique comme une tendance mondiale clé intéressante pour le système de normalisation du Canada (CCN, 2022).

6.3 Démarches d'adoption émanant de l'industrie

Outre les interventions réalisées par le gouvernement pour favoriser l'adoption des technologies quantiques, il existe également plusieurs approches que l'industrie quantique pourrait étudier pour encourager l'adoption, notamment les partenariats interentreprises et la fourniture de services de soutien professionnel. En effet, l'un des moyens les plus courants et les plus efficaces pour les entreprises et autres organisations d'étudier l'adoption des technologies quantiques consiste à établir une forme de partenariat avec des fournisseurs de technologies (IBM, 2018; Langione *et al.*, 2019b; Capgemini, 2022). Cette méthode a été adoptée par une multitude d'industries.

> *Les partenariats sont déjà le modèle de choix pour la plupart des activités commerciales dans le domaine à ce jour. Parmi les collaborations établies jusqu'ici, mentionnons la conception conjointe par JPMorgan Chase et IBM de solutions d'évaluation des risques et d'optimisation de portefeuille, la collaboration entre Volkswagen et Google pour concevoir des batteries destinées aux véhicules électriques et l'alliance entre la Dubai Electricity and Water Authority et Microsoft pour mettre au point des solutions d'optimisation énergétique.*
>
> Langione *et al.* (2019b)

Comme mentionné à la section 2.1.1, il est bien plus intéressant pour les utilisateurs potentiels d'aborder les technologies quantiques par le biais d'un partenariat ou d'une démarche reposant sur les services que de mettre sur pied leur capacité quantique à l'interne : (i) les technologies quantiques sont trop complexes et évoluent trop rapidement pour que les organisations seules puissent suivre le rythme; (ii) on assiste à une pénurie de spécialistes quantiques hautement qualifiés et la concurrence est rude et (iii) investir dans l'ensemble de l'infrastructure quantique (c.-à-d. le matériel et les logiciels) est trop coûteux et nécessite trop d'expertise (IBM, 2018; Capgemini, 2022). Ainsi, ces arrangements constituent une stratégie relativement peu coûteuse et peu risquée pour les organisations qui cherchent à connaître les applications et les avantages possibles des technologies quantiques, tout en offrant des avantages aux concepteurs sous forme d'expertise et de compétences propres à l'industrie qui peuvent les aider à bâtir des cas d'utilisation pour des secteurs donnés (Langione *et al.*, 2019b).

6.3.1 Services professionnels

Une méthode populaire dans le secteur privé pour encourager l'adoption des technologies quantiques consiste à attirer les utilisateurs potentiels en leur offrant un accès à l'informatique quantique en tant que service (QCaaS). Cette méthode dépasse souvent la simple fourniture d'un accès infonuagique à des ordinateurs quantiques; l'élément clé est plutôt la fourniture de services de soutien professionnel et d'occasions de formation aux entreprises, qui les aident à déterminer et à codévelopper des applications quantiques. Cette méthode peut aider les utilisateurs potentiels à comprendre les applications et les avantages possibles des technologies quantiques pour leur entreprise, même si l'avantage quantique des ordinateurs NISQ n'a pas été démontré dans les faits.

En général, ce modèle commercial demande de travailler directement avec les clients pour cerner les cas d'utilisation pratiques de l'informatique quantique dans leur entreprise ou déterminer comment l'informatique quantique peut être appliquée à leurs problèmes. Les fournisseurs s'efforcent de reformuler le

problème pour qu'il puisse être intégré dans du matériel ou un logiciel d'informatique quantique donné. Ils s'attellent ensuite à la mise en œuvre de l'application, qui requiert généralement des essais et un projet pilote d'une certaine ampleur. Enfin, le produit final bénéficie souvent de l'assistance ou de la maintenance du fournisseur. Celui-ci peut également proposer un certain niveau de formation ou d'information à ses clients pour les aider à constituer leur capacité interne en informatique quantique. D-Wave, IBM, 1QBit et Xanadu, notamment, sont des exemples d'entreprises canadiennes qui ont adopté ce type d'approche fondée sur les services professionnels. La figure 6.1 illustre le processus par lequel une entreprise peut en venir à utiliser l'informatique quantique en nuage.

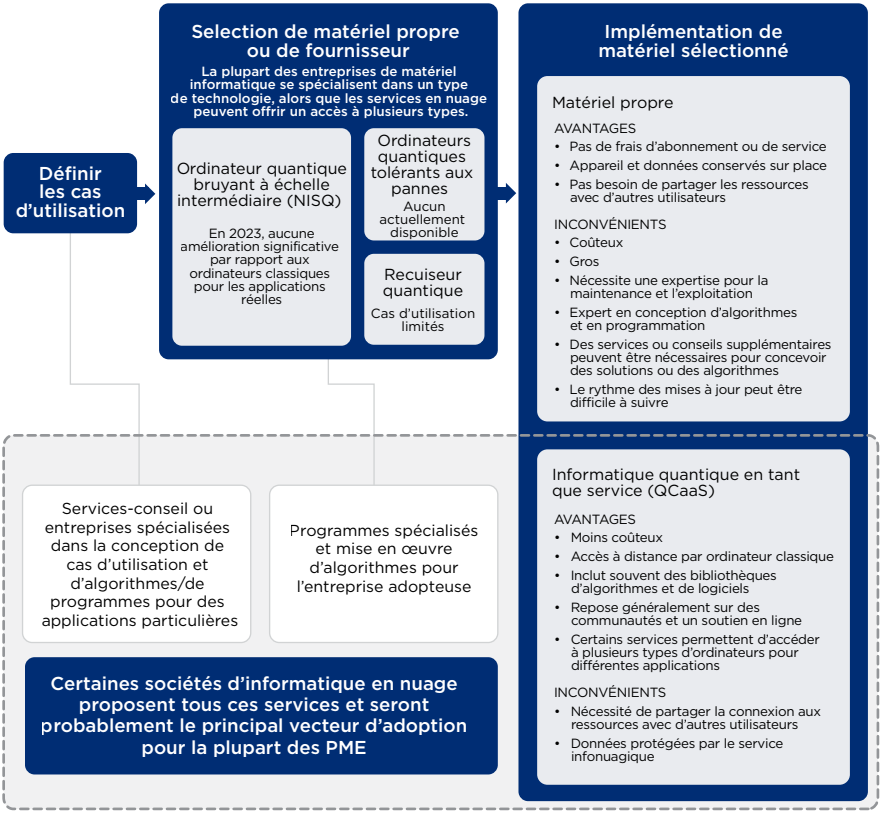


Figure 6.1 Comment une entreprise pourrait s'associer à un fournisseur d'informatique quantique

6.3.2 Pôles quantiques régionaux

Une autre approche industrielle pour accélérer l'adoption des technologies quantiques consiste à créer des *pôles quantiques* — des centres régionaux de R-D et d'innovation quantiques dans lesquels les entreprises quantiques établissent des partenariats avec des universités, d'autres entreprises, des organismes gouvernementaux et d'autres organisations pour donner accès à leur technologie ainsi qu'à des programmes d'expertise, de conseil et de formation. Cela peut aider les organisations partenaires à cerner des cas d'utilisation et des applications commerciales pour les technologies quantiques, facilitant ainsi une adoption plus large. De tels pôles ont été créés dans plusieurs pays, comme les Pays-Bas et le Canada.

Par exemple, comme indiqué à la section 3.1.3, IBM a fondé un pôle quantique au Canada, à l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke, en 2020. Ce pôle, l'Espace IBM Q, regroupe plusieurs partenaires — tels que CMC Microsystèmes (CMC Microsystèmes, 2020) et Lockheed Martin (Mallah, 2021b) — et réalise des projets de collaboration avec la Banque du Canada, Statistique Canada et Thales (Mallah, 2021a). À l'annonce de l'accélérateur de découvertes Québec-IBM et l'installation d'un ordinateur quantique IBM à Bromont, au Québec, le modèle de gouvernance du pôle quantique d'IBM a été transféré à la Plateforme d'Innovation Numérique et Quantique (PINQ^2), un organisme sans but lucratif fondé par le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie du Québec et l'Université de Sherbrooke en 2020.

Les investissements gouvernementaux dans des pôles régionaux similaires pour l'innovation quantique peuvent constituer une occasion d'encourager l'adoption future. En effet, dans certains cas, les pôles quantiques d'IBM sont partiellement subventionnés par les gouvernements. Par exemple, le gouvernement du Québec a investi 131 millions de dollars dans la mise sur pied de l'Espace IBM Q (Gouv. du Qc, 2022), dans le but d'encourager les partenariats (nationaux et internationaux), d'attirer les chercheurs et de former les étudiants.

Les pôles régionaux reposent sur un paradigme d'innovation ouverte

Les pôles régionaux d'informatique quantique — et l'approche d'IBM en particulier — ont été décrits comme une tentative de « bâtir la communauté [de l'informatique quantique] au moyen d'une R-D collaborative et d'une innovation ouverte aux utilisateurs » (MacQuarrie *et al.*, 2020). Le terme *innovation ouverte* désigne « l'utilisation des flux entrants et sortants de connaissances pour accélérer l'innovation interne et étendre les marchés à des fins d'utilisation externe de l'innovation, respectivement » (Chesbrough *et al.*, 2006). Elle comprend à la fois des flux de connaissances *entrants* (c.-à-d. l'ouverture du processus d'innovation interne d'une entreprise à des apports de connaissances externes

afin de stimuler l'innovation) et des flux de connaissances *sortants* (c.-à-d. permettre à des connaissances exclusives de circuler à l'extérieur d'une entreprise afin de stimuler l'adoption de ses innovations par le marché) (Chesbrough, 2017). Grâce au flux de connaissances sortant, les entreprises peuvent créer de la valeur en permettant à des tiers d'utiliser la technologie qu'elles mettent au point (Wang *et al.*, 2012). En outre, l'innovation ouverte *locale* entre des entreprises géographiquement proches peut contribuer à renforcer les systèmes d'innovation régionaux (Leckel *et al.*, 2020).

Depuis l'introduction du concept d'innovation ouverte en 2003, des études réalisées ces deux dernières décennies ont révélé que son utilisation « a une influence positive sur les performances des entreprises [et peut produire des collaborations bénéfiques qui] favorisent l'échange de connaissances et réduisent l'inefficacité technologique » (Bigliardi *et al.*, 2020). En outre, l'Académie nationale des sciences des États-Unis a fait valoir qu'une telle approche (c.-à-d. un « écosystème » ouvert qui permet la pollinisation croisée des idées et des « groupes ») est nécessaire pour accélérer le développement et l'adoption des technologies quantiques (NASEM, 2019).

6.3.3 Consortiums industriels

De nombreux pays et États actuellement à la pointe de l'espace quantique ont fondé des associations ou des consortiums industriels pour faire progresser le développement et l'adoption des technologies quantiques. Ces consortiums comprennent Quantum Industry Canada (QIC, 2020), le Quantum Economic Development Consortium (QED-C, 2020a) aux États-Unis, le Consortium européen de l'industrie quantique (QuIC, s.d.-a) et la Quantum Strategic Industry Alliance for Revolution (Q-STAR, s.d.-a) du Japon. En janvier 2023, ces quatre organisations ont signé un protocole d'entente établissant l'International Council of Quantum Industry Associations, un conseil qui vise à « renforcer la communication et la collaboration entre les consortiums participants sur les objectifs et les approches du développement des technologies quantiques » (QED-C, 2023b).

Les consortiums de l'industrie quantique mènent diverses activités, notamment :

- Faciliter la collaboration et la coordination, et établir des partenariats stratégiques avec les parties prenantes de l'écosystème quantique d'un pays, notamment les gouvernements, les universités, les organismes de recherche et les investisseurs;
- Cerner les cas d'utilisation et les applications en collaboration avec les utilisateurs potentiels;
- Élaborer des normes et des critères de référence;
- Soutenir l'éducation, la formation et le développement de la main-d'œuvre;

- Sensibiliser la population et communiquer avec elle;
- Assister au développement des chaînes d'approvisionnement nationales et internationales (ainsi que des technologies habilitantes);
- Aider les entreprises à protéger et à partager leur propriété intellectuelle;
- Promouvoir l'éthique et la confiance du public dans l'utilisation des technologies quantiques;
- Effectuer des recherches sur la commercialisation, l'adoption et l'impact économique des technologies quantiques (QED-C, 2020b, 2020c; QIC, 2020; Q-STAR, s.d.-b; QuIC, s.d.-c).

6.4 Bâtir une main-d'œuvre prête pour le quantique

Les technologies quantiques requièrent une immense expertise pour leur construction, leur installation, leur exploitation et leur entretien. Du personnel hautement qualifié (PHQ) doté d'une expertise variée sera nécessaire tout au long de la chaîne de valeur, mais les organisations aussi bien à l'intérieur qu'autour du secteur quantique sont confrontées à une pénurie importante de PHQ spécialisé en sciences et en technologies quantiques (Metz, 2018; Kaur et Venegas-Gomez, 2022; NSTC-SCQIS, 2022). Non seulement la demande de compétences quantiques va continuer à augmenter à mesure que ces technologies se développeront et que de nouvelles applications et de nouveaux cas d'utilisation seront définis (Kaur et Venegas-Gomez, 2022), mais il y a également une intense concurrence mondiale pour attirer et retenir les talents dans le domaine (Mahboubi, 2022).

Pour créer les conditions favorables à l'adoption des technologies quantiques, le Canada devra bâtir une main-d'œuvre adéquate au moyen de stratégies visant à former, à attirer et à retenir le PHQ. Cela peut se faire de deux façons complémentaires : par la formation et l'éducation et par l'immigration. En outre, la formation d'une main-d'œuvre prête pour le quantique nécessitera une coordination entre une grande variété d'acteurs, comme les gouvernements, les établissements universitaires, l'industrie, les sociétés professionnelles, les organismes sans but lucratif et des partenaires internationaux (NSTC-SCQIS, 2022). L'état de l'enseignement et de la formation quantiques offerts dans certains pays étrangers est décrit ci-dessous.

6.4.1 Formation et éducation

Le Canada aura besoin de plus de PHQ pour suivre le rythme des technologies quantiques, mais on manque de données sur les besoins à venir

Diverses sources avancent qu'il y a une pénurie de PHQ possédant des compétences dans le domaine quantique (USGAO, 2021; FEM, 2022a; ISDE, 2023d).

On dispose de plusieurs instruments pour remédier au manque de personnes cherchant une formation dans ce domaine et aux types de formation auxquels elles peuvent accéder. En 2023, la formation quantique au Canada est presque exclusivement offerte aux études supérieures, alors que des programmes proposés au premier cycle et au collégial seront nécessaires pour répondre à la future demande d'expertise technique (USGAO, 2021; Kaur et Venegas-Gomez, 2022; FEM, 2022a). Il convient toutefois de noter l'absence de données permettant de prévoir l'ampleur du déficit de PHQ au pays.

Encadré 6.7 Le secteur de la cybersécurité a un besoin pressant de formation spécialisée en matière de quantum

La cybersécurité est un secteur en pleine expansion qui devra implanter de nouvelles formes de QRC et de protocoles de sécurité quand les ordinateurs quantiques seront pleinement réalisés et plus largement adoptés. Une étude réalisée en 2021 a révélé que, avant même cette adoption, le nombre de professionnels de la cybersécurité au Canada est passé de 84 000 en 2019 à 123 696 en 2021. Malgré cette croissance, on estime que le Canada continue de faire face à un déficit de main-d'œuvre de l'ordre de 25 000 personnes. Devant cette demande croissante, de nombreux gouvernements s'efforcent d'élaborer des stratégies de sécurité résistante aux méthodes quantiques, notamment en haussant le financement de la recherche, du développement, de l'infrastructure, des protocoles de normalisation et de la formation.

Au Canada, les professionnels de la cybersécurité possèdent toutes sortes de niveaux d'études, la majorité d'entre eux (38 %) étant titulaires d'un baccalauréat. Les détenteurs d'une maîtrise sont les deuxièmes plus représentés (28 %), suivis par les diplômés de l'enseignement secondaire (12 %), les titulaires d'un diplôme collégial en deux ans (11 %) et les titulaires d'un doctorat (10 %). Actuellement, plusieurs établissements postsecondaires proposent des formations en cybersécurité, mais il existe relativement peu de possibilités de formation spécifiques au domaine quantique.

(GACG, 2021b)

Le développement de la main-d'œuvre quantique au Canada dépend du recrutement d'experts parmi les groupes sous-représentés

Comme indiqué au chapitre 4, les disciplines de la science, de la technologie, du génie et des mathématiques (STGM) restent fortement dominées par les hommes au Canada. En effet, les disciplines les plus présentes dans l'industrie quantique sont parmi celles dans lesquelles les femmes sont le plus faiblement représentées, comme l'informatique, le génie, les mathématiques et les sciences physiques (Aiello *et al.*, 2021). En outre, il est nécessaire d'accroître la diversité raciale et ethnique dans le domaine quantique (Aiello *et al.*, 2021; Lee et Serles, 2021). C'est pourquoi les experts ont recommandé d'élargir les stratégies de recrutement en STGM à l'école primaire et secondaire, en mettant davantage l'accent sur les filles et les femmes (CNRC, 2017b). De même, on pourrait concevoir des cours de science quantique au niveau postsecondaire qui soulignent mieux la contribution des groupes sous-représentés dans ce domaine (Kaur et Venegas-Gomez, 2022).

Une réforme de l'éducation sera nécessaire pour former la main-d'œuvre quantique

En 2017, le CNRC a consulté les parties prenantes de l'industrie sur les réformes éducatives visant à encourager le développement d'une main-d'œuvre quantique. Parmi les suggestions formulées, citons :

- adopter des stratégies supplémentaires de recrutement en STGM dans les écoles primaires et secondaires;
- créer des programmes mixtes de physique et de génie dans le domaine de la science et des technologies quantiques;
- former les étudiants à l'entrepreneuriat dans le domaine des technologies quantiques;
- créer des programmes éducatifs spécifiquement axés sur le transfert d'expertise de la science de l'information quantique vers le développement des technologies quantiques;
- créer des mécanismes permettant aux étudiants d'accéder plus facilement aux installations et aux programmes de recherche quantique dans différentes régions du Canada, y compris aux laboratoires nationaux (CNRC, 2017b).

La formation de la main-d'œuvre quantique nécessite la coordination et la collaboration entre l'industrie et le milieu universitaire

La constitution d'une main-d'œuvre prête pour le quantique nécessitera probablement une combinaison de programmes d'enseignement universitaire traditionnel et de formation industrielle pratique dans le cadre de projets réels (Dunlop, 2019; Kaur et Venegas-Gomez, 2022). Les parties prenantes de l'industrie quantique s'accordent à dire que les diplômés sont des candidats plus valables sur le marché de l'emploi lorsqu'ils acquièrent une formation industrielle par le biais de stages ou d'autres programmes (Kaur et Venegas-Gomez, 2022). Une formation pratique et concrète peut aider les étudiants à renforcer et à perfectionner leurs connaissances des concepts abstraits complexes de la théorie quantique, à acquérir les compétences et l'expérience recherchées par les employeurs et à leur donner un aperçu des types d'emplois auxquels ils peuvent s'attendre dans une carrière quantique (Aiello *et al.*, 2021). En outre, la nécessité d'une formation reposant sur l'industrie découle en partie de la rapidité de l'innovation dans les technologies quantiques, qui pose des difficultés lorsqu'il s'agit de concevoir des programmes normalisés et actualisés en classe et en laboratoire (Aiello *et al.*, 2021). En tant que telles, les carrières dans les technologies quantiques exigeront probablement un apprentissage continu, peut-être plus que les carrières dans d'autres domaines des STGM.

Pour résoudre ce problème, les universités devront mettre sur pied davantage de cours axés sur l'industrie et sur l'emploi dans le domaine des sciences et des technologies quantiques, et établir davantage de partenariats avec l'industrie pour bâtir des parcours professionnels quantiques plus clairs (CNRC, 2017b; Aiello *et al.*, 2021; Kaur et Venegas-Gomez, 2022). Il pourrait être utile que l'industrie quantique exprime plus clairement ses besoins à long terme en personnel afin d'aider les universités et les gouvernements à fixer des priorités en matière de formation et d'investissements stratégiques (CNRC, 2017b). Par exemple, les renseignements sur les besoins en compétences dans le secteur quantique pourraient contribuer à la création de programmes de maîtrise orientés vers l'industrie (Kaur et Venegas-Gomez, 2022).

Au Canada, parmi les programmes facilitant la collaboration entre les universités et l'industrie dans le domaine quantique, on peut citer Mitacs et le volet informatique quantique du Programme de formation orientée vers la nouveauté, la collaboration et l'expérience en recherche (FONCER) du CRSNG. Dunlop (2019) recommande que la stratégie quantique du Canada s'appuie sur le succès de tels programmes en fournissant un financement dédié pour permettre à Mitacs de mettre sur pied un programme quantique ciblé, et en doublant la taille du volet FONCER et en le modifiant pour permettre le renouvellement du financement des

initiatives fructueuses. La SQN qualifie Mitacs d'élément important du pilier en matière du talent et prévoit 40 millions de dollars pour soutenir sa programmation (ISDE, 2023d). En outre, plusieurs établissements au Canada poursuivent des partenariats avec l'industrie afin d'améliorer l'éducation et la formation quantiques des diplômés, notamment le Quantum Algorithms Institute en Colombie-Britannique, Quantum Alberta, l'Institut d'informatique quantique à l'université de Waterloo et l'Institut quantique à l'université de Sherbrooke. On pourrait analyser les premiers succès de ces initiatives de collaboration pour éclairer l'élaboration de programmes similaires partout au Canada. De même, le programme de maîtrise professionnelle de l'Université de Calgary est conçu dès le départ par des experts de l'industrie afin de fournir aux étudiants les compétences pratiques dont celle-ci a besoin.

La main-d'œuvre prête pour le quantique nécessitera des qualifications autres qu'un doctorat

Diverses voies peuvent mener à une carrière qui croise les technologies quantiques (Kaur et Venegas-Gomez, 2022 S'il est rare qu'un titulaire au baccalauréat accède directement à un poste dans le domaine des technologies quantiques, les possibilités de se spécialiser après l'obtention du diplôme sont de plus en plus nombreuses. Les diplômes en génie physique (tels que celui proposé par Polytechnique Montréal offrent aux étudiants un large éventail de possibilités de se concentrer sur les technologies quantiques (Universités Canada, 2022 Les cours de chimie informatique de l'Université du Manitoba sont un autre exemple de formation quantique axée sur la pratique, et le programme de sciences de l'information quantique de l'Université de Sherbrooke allie formation quantique spécialisée et formation aux technologies de la communication. Le comité note également qu'en raison de l'adoption généralisée prévue des technologies quantiques, la formation à différents niveaux — sur le plan du développement et de l'adoption, ainsi que la formation moins technique en gestion et en prise de décision politique — devra être davantage développée et plus largement offerte.

Une enquête réalisée en 2019 sur l'industrie quantique a révélé que les titulaires d'un doctorat étaient les candidats les plus recherchés (Fox *et al.*, 2020 Toutefois, si certaines fonctions requièrent des connaissances et des compétences quantiques très pointues, qui ne peuvent être acquises qu'au moyen d'un doctorat, de nombreux autres experts — notamment des ingénieurs, des développeurs informatiques et des techniciens — contribuent à la conception, au marketing, aux ventes et au soutien des technologies quantiques. Ces rôles nécessitent souvent une formation moins formelle qu'un doctorat et méritent d'être pris en compte lors de la conception des programmes d'études et de formation de la main-d'œuvre quantique (Aiello *et al.*, 2021)De l'avis du comité, l'importance de

ces rôles s'accroîtra à mesure que l'adoption augmentera et que les entreprises utiliseront de plus en plus les technologies quantiques. Pour résoudre ce problème, les universités pourraient créer des cours pluridisciplinaires sur les technologies quantiques dans le cadre des programmes d'informatique, de génie, de commerce et de finance, et encourager les diplômés de ces secteurs à envisager des carrières dans l'industrie quantique (Kaur et Venegas-Gomez, 2022). Les parcours professionnels quantiques non universitaires peuvent également contribuer à combler les lacunes en matière d'éducation et de formation.

Au-delà du milieu universitaire, il existe une variété d'options pour encourager l'amélioration des compétences et la reconversion dans le secteur des technologies quantiques, et pour combler les lacunes en matière d'éducation et de formation. Il s'agit notamment de cours en ligne, de programmes éducatifs industriels, de réseaux communautaires et même de l'apprentissage par le jeu (Kaur et Venegas-Gomez, 2022). Plusieurs grandes entreprises d'informatique quantique proposent du matériel d'information et de formation conçu pour les étudiants et les non-étudiants ayant déjà une expérience en informatique. Par exemple, IBM propose un manuel en source ouverte sur Qiskit, sa trousse de développement de logiciels libres, ainsi que des cours en ligne (IBM, s.d.-b); le service d'informatique en nuage Azure Quantum de Microsoft comprend des programmes éducatifs et d'autres ressources à l'intention des éducateurs (Microsoft, 2022) et Google Quantum AI propose des tutoriels et des laboratoires en ligne, ainsi que des ateliers à l'intention des éducateurs (Google, s.d.). D-Wave propose également un programme de formation pour permettre aux adopteurs d'utiliser son système Leap (D-Wave, s.d.).

Les pays étrangers préparent une main-d'œuvre prête pour le quantique

D'autres pays ont commencé à élaborer des plans stratégiques pour former leur main-d'œuvre quantique. Si le Canada veut rester dans la course, il devra en faire autant. Par exemple, de nombreux pays (comme l'Australie, la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni, ainsi que le Canada) ont publié des stratégies quantiques nationales qui incluent la formation des talents. Toutefois, en dehors des États-Unis, peu de pays disposent de programmes de QRC qui incluent la formation de talents (GACG, 2021b).

Aux États-Unis, le Conseil national de science et technologie a publié en 2022 un plan stratégique national pour la formation de la main-d'œuvre quantique. Ce plan présente quatre approches clés pour bâtir la main-d'œuvre quantique : (i) définir et comprendre les besoins en main-d'œuvre du secteur quantique, à la fois à court et à long terme; (ii) présenter à un public plus large la science et la technologie de l'information quantique; (iii) combler les lacunes propres au

secteur quantique dans l'éducation et la formation professionnelles et (iv) rendre les carrières dans le domaine quantique plus accessibles et équitables (NSTC-SCQIS, 2022).

Le programme Quantum Flagship de l'Union européenne comprend le projet Quantum Technology Education Coordination and Support Action (QTEdu CSA), qui vise à « aider le programme Quantum Flagship à créer l'écosystème d'apprentissage nécessaire pour informer et éduquer la société sur les technologies quantiques » (QTEdu, s.d.-b). Il donne accès à des ressources telles que des programmes éducatifs, des cours, des formations et des outils d'évaluation, et gère également des projets pilotes dans toute l'Europe visant l'éducation, la collaboration avec l'industrie, la sensibilisation et l'information (QTEdu, s.d.-c). De plus, QTEdu CSA a élaboré un ensemble de « profils de qualification » pour les personnes travaillant dans le domaine des technologies quantiques, qui décrivent les compétences acquises grâce à la formation et à l'éducation, et préparent les individus à des rôles particuliers dans le secteur quantique. Il est destiné à « faciliter la planification et la conception de projets d'éducation et de formation » dans le domaine des technologies quantiques (QTEdu, 2022).

Au Royaume-Uni, l'un des objectifs du National Quantum Technologies Programme est de former, d'attirer et de retenir les talents grâce à des programmes d'études, des bourses et des formations professionnelles orientées vers l'industrie (UKRI, 2020a, 2021).

6.4.2 Immigration

Outre la formation des talents au niveau national, le Canada pourrait avoir besoin de recourir à l'immigration pour constituer sa main-d'œuvre quantique. Là comme aux États-Unis, les entreprises et les universités se sont inquiétées du fait que, sans réforme des politiques et des priorités en matière d'immigration, elles ne seront pas en mesure de bâtir et d'adopter les technologies quantiques (Metz, 2018; Simmons, 2022). De l'avis du comité, il s'agit d'une inquiétude fondée; il est probable que le système d'immigration du Canada en ce qui concerne les travailleurs qualifiés et les chercheurs devra être réformé afin d'attirer et de retenir le PHQ international nécessaire à l'établissement d'une main-d'œuvre prête pour le quantique.

Il a été avancé que, pour mettre sur pied cette main-d'œuvre, « le Canada a besoin du genre de programmes d'immigration accélérée qui ont alimenté le boom des télécommunications dans les années 1990 » (Simmons, 2022). Au cours de cette période, le secteur des TIC est devenu un élément notable de l'économie canadienne, passant de 3,7 % du PIB réel en 1995 à 5,6 % en 2000, avec un taux de

croissance annuel de 4,3 %, contre 1,3 % pour les autres secteurs d'activité (CTIC, 2012). Mais cette croissance n'aurait pas été possible sans l'immigration, qui a contribué à répondre à la demande de compétences techniques sur le marché du travail des TIC — en 2001, 32 % des travailleurs de ce marché étaient des immigrés (CTIC, 2012); en 2016, ils étaient 40 % (Cameron et Faisal, 2016).

Le volet « talents mondiaux » du programme des travailleurs étrangers temporaires (TET) du Canada pourrait contribuer à attirer du PHQ — il est conçu pour aider les entreprises à accéder à des talents étrangers hautement qualifiés grâce à des délais de traitement des demandes spéciaux et plus courts (EDSC, 2022b). Pour être admissibles au Volet des talents mondiaux, les candidats doivent soit être orientés vers le programme par l'un des partenaires désignés ou soit être candidats à un poste figurant sur la liste des professions exigeant des talents mondiaux, qui est basée sur les codes de la Classification nationale des professions (CNP) (EDSC, 2022a).

Si le programme des TET peut contribuer à attirer rapidement le PHQ étranger nécessaire à une main-d'œuvre quantique, d'autres programmes d'immigration peuvent aider à retenir ces travailleurs au Canada. Par exemple, il est prouvé que les programmes d'immigration qui comprennent une sélection en deux étapes ont permis d'améliorer le taux de réussite des immigrés et de retenir les talents au pays (Hou *et al.*, 2020). Les travailleurs qualifiés admis dans le cadre du programme des TET peuvent par la suite obtenir la résidence permanente par le biais de la catégorie de l'expérience canadienne ou du Programme des candidats des provinces. En effet, si de nombreux immigrés travaillant dans le secteur des TIC ont été admis dans le cadre du programme des TET, en 2016, seulement environ 4 % étaient des travailleurs temporaires, tandis que 96 % étaient des résidents permanents ou des citoyens par naturalisation (Cameron et Faisal, 2016).

Enfin, le Canada peut également attirer du PHQ quantique en suscitant l'intérêt des entrepreneurs étrangers qui créent des entreprises en démarrage. Le Programme de visa pour démarrage d'entreprise cible les entrepreneurs immigrés qui ont le potentiel de créer des entreprises et des emplois au Canada (GC, 2022b); il comprend des voies d'accès pour les jeunes entreprises quantiques par le biais du volet quantique du Creative Destruction Lab (Dunlop, 2019).

Étudiants et chercheurs étrangers sont confrontés à des défis de l'immigration

En plus de cibler les chercheurs et les travailleurs étrangers qualifiés de l'industrie quantique, le Canada devra également attirer des étudiants étrangers pour constituer une main-d'œuvre prête pour le quantique. Toutefois, sa capacité à y parvenir pourrait être entravée par des frais de scolarité et un coût de la vie

élevés, ainsi que par des problèmes d'immigration (CNRC, 2017b; Ferreira et Klütsch, 2018; Grewal, 2022). Il serait possible de remédier ces problèmes en accélérant les processus d'immigration pour les étudiants étrangers et en offrant des bourses d'études spéciales. En outre, la collaboration avec des réseaux internationaux peut contribuer à faciliter l'échange d'étudiants au-delà des frontières (CNRC, 2017b).

Le Canada se heurte également à des difficultés pour retenir les étudiants étrangers. Par exemple, le système d'entrée express, lancé en 2015, a créé des obstacles systémiques pour les étudiants étrangers qui cherchent à obtenir la résidence permanente au Canada et à entrer sur le marché du travail canadien (Grewal, 2022). On a avancé que le Canada pourrait éliminer ces obstacles en réformant le système pour tenir compte de l'expérience professionnelle informelle et étudiante, telle que l'assistanat d'enseignement et de recherche, qui ne donne actuellement pas accès au programme, et en offrant davantage de possibilités d'expérience de travail aux étudiants (Grewal, 2022).

De même, le coût élevé des visas et des permis de travail pour les chercheurs peut inciter les talents quantiques à s'installer dans des pays où ces frais sont abordables ou ont été abolis. Les contrats de courte durée (et les changements de contrat) qui nécessitent des renouvellements fréquents de visa peuvent également décourager les chercheurs de rester au Canada. Le renouvellement d'un visa peut être une procédure onéreuse et prendre plusieurs mois, au cours desquels la personne peut être contrainte de quitter le pays, ce qui lui crée des charges financières supplémentaires. En outre, certains immigrés peuvent être confrontés à des difficultés sociales ou culturelles, ainsi qu'à des barrières linguistiques (Malik *et al.*, 2022).

En bref, les gouvernements peuvent aider les organisations canadiennes à attirer et à retenir les chercheurs quantiques étrangers en réformant les politiques et les pratiques en matière de visas, par exemple en créant des catégories de visas pour les chercheurs quantiques (et leur famille) exigeant peu ou pas de frais, y compris des visas de courte durée pour les conférences et les stages; en réduisant le temps de traitement des visas pour les chercheurs quantiques; en permettant aux chercheurs et à leur famille de rester au pays pendant le renouvellement de leur visa; en leur permettant de changer d'emploi, afin que leur visa ne soit pas lié à un employeur ou à un organisme particulier et en permettant aux chercheurs et à leur famille d'accéder aux avantages sociaux (Malik *et al.*, 2022).

7

Un cadre pour l'adoption responsable des technologies quantiques

Devant les problèmes éthiques, sociaux et juridiques que posent les technologies quantiques, le comité d'experts présente dans ce chapitre un certain nombre d'interventions politiques susceptibles de prévenir ou d'atténuer ces problèmes et de maximiser les avantages de ces technologies. Une approche responsable de l'adoption des technologies quantiques repose sur des mesures sanctionnées par l'État et d'autoréglementation, notamment des évaluations de l'impact quantique, la protection et la gouvernance des données, l'accès contrôlé à des technologies quantiques particulières, des mécanismes de droit souple et une recherche et une innovation responsables. Dans la dernière section du chapitre, le comité réfléchit à ses constatations et à la voie à suivre pour l'adoption des technologies quantiques au Canada.

7.1 Une approche responsable de l'innovation

Du point de vue de la gouvernance, l'adoption des technologies quantiques par différents secteurs économiques exige une approche responsable de l'innovation[17], qui anticipe les multiples résultats plausibles du changement technologique, également connue sous le nom de *cadre de gouvernance anticipative* (de Jong, 2022; Perrier, 2022). Selon Guston (2008), la gouvernance anticipative est la capacité d'une société à « gérer les technologies émergentes fondées sur le savoir pendant que cette gestion est encore possible ». Le premier pilier du cadre de gouvernance anticipative consiste à tirer parti des réponses politiques connues aux technologies ayant des répercussions considérables sur la société (p. ex. l'électricité, les voitures, l'IA ou les nanotechnologies) (de Jong, 2022). L'analyse historique montre que les instruments de gouvernance devraient être conçus de manière à prendre en considération les aspects essentiels de l'adoption des technologies quantiques, tels que la perception et la participation du public, les cadres réglementaires et la coopération internationale (de Jong, 2022). Le deuxième pilier tient compte des besoins des différentes parties prenantes (p. ex. les États, le secteur privé ou les groupes de la société civile), car chacune peut élaborer ses propres méthodes de gouvernance face aux avantages et aux risques présentés par les technologies quantiques (Perrier, 2022). En tant que tel, le cadre de gouvernance anticipative peut imposer des contraintes aux stratégies d'adoption axées sur le marché examinées au chapitre 6.

17 Certains membres du comité d'experts font remarquer qu'en raison des différentes conceptions de la responsabilité, l'*adoption responsable des technologies quantiques* peut être comprise au sens large comme un processus qui tient compte de diverses questions éthiques et sociales.

7.1.1 Évaluations de l'impact quantique

Au sein du cadre de la gouvernance anticipative, des chercheurs ont proposé des évaluations de l'impact quantique (EIQ) afin de traiter et corriger les inconvénients potentiels des technologies quantiques (Kop, 2021c; Dekker et Martin-Bariteau, 2022). Il existe plusieurs règles fondamentales pour les EIQ applicables aux différentes technologies quantiques :

1. *Veiller à l'intégrité des systèmes quantiques, des renseignements stockés et de leur transfert, et vérifier le traitement de l'information par les systèmes quantiques*;
2. *Assurer la traçabilité, la testabilité et la prévisibilité des actions du système quantique*;
3. *Respecter, et non enfreindre, les droits de propriété intellectuelle des tiers*;
4. *Respecter la vie privée, la confidentialité des renseignements, les lignes directrices éthiques fondamentales et les lois et règlements spécifiques au secteur de l'application quantique*;
5. *Clarifier et délimiter les responsabilités dans la chaîne développement-composants-application-fournisseur de services.*

Kop (2021c)

Pour élaborer une EIQ nationale, les décideurs au Canada pourraient s'inspirer des instruments qui encouragent l'utilisation responsable de l'IA par le gouvernement fédéral, tels que la Directive sur la prise de décisions automatisée du Conseil du Trésor du Canada, accompagnés d'un outil d'évaluation de l'incidence algorithmique (EIA) (GC, 2023d) (encadré 7.1). La Directive vise à réduire les risques que l'IA pose à la population canadienne en imposant des conditions à l'achat et à l'utilisation de systèmes de prise de décision automatisés par certains ministères. Elle exige que ces derniers réalisent et publient des EAI, qui seront répétées en cas de modification des fonctionnalités d'un système (GC, 2023d).

Encadré 7.1 Évaluation de l'incidence algorithmique dans la Directive sur la prise de décisions automatisée

Conformément à la Directive sur la prise de décisions automatisée, les ministères fédéraux qui prévoient utiliser des systèmes décisionnels automatisés doivent évaluer si les décisions du système peuvent avoir une incidence sur les droits individuels ou collectifs, la santé et le bien-être, les intérêts économiques et la durabilité de l'écosystème. À l'issue de l'évaluation, le système se voit attribuer l'un des quatre niveaux d'incidence suivants :

Niveau I : incidence faible, réversible ou nulle;

Niveau II : incidence modérée, à court terme et réversible;

Niveau III : incidence élevée, continue et difficilement réversible;

Niveau IV : incidence très élevée, irréversible et permanente.

Le niveau d'incidence détermine les mesures d'atténuation des risques applicables, qui vont de l'examen par les pairs à la nécessité d'une autorisation spéciale et d'une supervision humaine pour les systèmes classés « à haut risque », en passant par la notification de l'utilisation du système.

(GC, 2023d)

Dans sa proposition de législation sur l'intelligence artificielle (IA), l'Union européenne envisage une approche similaire de la gestion des risques (mais soutenue par des mesures d'application plus strictes) (CE, 2021). Le projet de cadre classifie les systèmes selon leur potentiel d'impact négatif sur les droits fondamentaux (p. ex. la dignité humaine, la vie privée, la non-discrimination ou les libertés d'expression, d'information et d'association), la santé et la sécurité et les droits des consommateurs et des travailleurs. La législation fixe des responsabilités et des mesures de protection en fonction du niveau de risque, notamment en interdisant l'utilisation de certains systèmes qui sont en contradiction avec les valeurs publiques ou qui présentent des risques importants pour la population.

Les réformes nationales dans le domaine de la gouvernance de l'IA auront probablement des répercussions sur les procédures régissant l'EQI, en particulier l'apprentissage machine quantique. À cet égard, la *Loi sur l'intelligence artificielle et les données* (qui fait partie du projet de loi C-27) propose un cadre fondé sur l'incidence pour réglementer l'utilisation des systèmes d'IA dans le secteur privé (Chambre des communes, 2022a). Toutefois, elle a été critiquée parce qu'elle

n'abordait pas directement certains aspects importants de la gouvernance de l'IA (c.-à-d. la définition des *systèmes à forte incidence*, la détermination des systèmes soumis à des exigences strictes, les sanctions et les critères pour les imposer) et qu'elle les laissait plutôt à des règlements (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). En septembre 2023, le projet de loi n'avait pas été adopté.

7.1.2 Protection et gouvernance des données

Comme il est indiqué au chapitre 4, plusieurs technologies quantiques présentent des risques importants pour la vie privée. Dans certains cas, les règles actuelles en matière de protection et de gouvernance des données peuvent aider à atténuer ces risques. Toutefois, il est probable que de nouvelles politiques régissant l'utilisation par le secteur public de technologies hautement invasives, notamment les capteurs quantiques, soient nécessaires. En outre, les lois sur la protection des données sont en retard sur les avancées technologiques. Les propositions législatives, telles que le projet de loi C-27, ne tiennent pas compte des risques découlant de l'utilisation des technologies quantiques, en particulier pour la dépersonnalisation des données (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). Bien que les chercheurs aient démontré que les progrès de la science des données et de l'IA nécessitent une anonymisation complexe pour protéger la vie privée, l'approche du gouvernement du Canada en matière de gestion des risques de réidentification n'était pas claire avant même l'avènement des technologies quantiques. Malgré la capacité de ces technologies d'accroître la vulnérabilité des renseignements sensibles à longue durée de vie (p. ex. les données de santé ou les numéros d'assurance sociale), ces risques ne sont pas pris en compte par le cadre juridique fédéral actuel (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). Toutefois, en raison du système politique fédéral du Canada, la protection de la vie privée dépendra des réformes entreprises par les gouvernements provinciaux et territoriaux, en plus de celles du gouvernement fédéral.

7.1.3 Accès contrôlé aux technologies quantiques

À cause de leur potentiel de nuisance, les technologies quantiques sont parfois comparées aux technologies nucléaires. Cette analogie est utile pour déterminer qui devrait avoir accès aux technologies quantiques et dans quelles circonstances (Dekker et Martin-Bariteau, 2022). Par exemple, la *Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires* contient des mécanismes qui limitent les risques liés « à la production, la possession et l'utilisation des substances nucléaires [...] tant pour la préservation de la santé et de la sécurité des personnes et la protection de l'environnement que pour le maintien de la sécurité nationale » (GC, 1997). La Loi a créé la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN), dont le mandat est de réglementer la production, l'utilisation et la possession de substances nucléaires, d'effectuer des inspections et d'imposer des exigences aux personnes

et aux organisations qui participent à des activités liées aux substances nucléaires. La CCSN mène également des campagnes d'information du public sur les risques posés par l'énergie nucléaire (GC, 1997; CCSN, 2023).

De même, la *Loi sur les brevets* contient des dispositions de sécurité supplémentaires qui pourraient limiter les droits de brevet touchant la production, l'application ou l'utilisation de l'énergie nucléaire (c.-à-d. l'exception de sécurité) (OMC, 1947; OMPI, 2012). Cette loi exige que la CCSN soit avertie avant l'examen ou la divulgation publique de ces brevets (GC, 1985d), tandis que la *Loi sur l'énergie nucléaire* confère au ministre de l'Énergie et des Ressources naturelles un droit de préemption pour acquérir ces droits de brevet dans l'intérêt de la sécurité nationale (GC, 1985f).

Le Canada a adopté la *Loi de mise en œuvre de la Convention sur les armes chimiques*, qui prévoit un cadre juridique similaire pour les agents chimiques toxiques susceptibles de servir à la création d'armes chimiques (GC, 1995). La *Loi sur les agents pathogènes humains et les toxines* exige une autorisation pour la possession, la manipulation, la production, l'entreposage, le transfert, l'importation, l'exportation, le rejet et l'utilisation d'agents pathogènes et de toxines; elle classe les agents pathogènes selon leur degré de virulence et impose des exigences strictes en matière de sécurité (GC, 2009). Ces restrictions concernant les substances nucléaires, les matières chimiques, les toxines et les agents pathogènes s'ajoutent aux restrictions imposées en vertu de la *Loi sur les licences d'exportation et d'importation* (chapitre 5).

Ces cadres juridiques pourraient guider la réglementation des technologies quantiques dans les cas où il serait nécessaire d'empêcher des acteurs malveillants d'y accéder. Les pratiques prometteuses d'atténuation des risques comprennent un processus d'approbation des utilisateurs potentiels, l'octroi de licences technologiques et des politiques de conservation des dossiers. En plus, une surveillance réglementaire — par la création d'un organisme fédéral spécialisé ou par délégation du mandat à un organisme existant — pourrait faciliter le contrôle de l'accès et de l'utilisation (Dekker et Martin-Bariteau, 2022).

7.1.4 Mécanismes de droit souple

Étant donné que les lois et les règlements posent souvent des problèmes, des approches de gouvernance souples peuvent offrir une plus grande flexibilité, même si cela peut se faire au détriment de l'applicabilité, de la responsabilité et de la transparence. Johnson (2019), par exemple, affirme que les avantages et les inconvénients des mécanismes de droit souple introduits dans le secteur des nanotechnologies peuvent éclairer les possibles stratégies de gouvernance des technologies quantiques au moyen de tels mécanismes. Tout d'abord, il est

possible de recourir à des codes de conduite volontaires pour établir des principes et des pratiques clés pour la gouvernance quantique, que l'on peut compléter et adapter au contexte à long terme. Deuxièmement, les normes tierces parties peuvent faire en sorte d'instaurer une terminologie et des indicateurs de performance communs pour les technologies quantiques et encourager l'innovation socialement responsable; toutefois, la transparence et la reddition de comptes sont souvent déficientes dans ces normes. Enfin, les programmes réglementaires volontaires peuvent améliorer les pratiques de recueil de renseignements et la coopération public-privé, mais ils nécessitent également des encouragements pour inciter l'industrie à y adhérer et peuvent être fragmentés en raison de préoccupations de sécurité nationale. Bien que les instruments de droit souple n'aient pas force de loi, ils peuvent être appliqués par le biais d'autres mesures (p. ex. dans des polices d'assurance ou par l'entremise d'obligations contractuelles). Parmi les mécanismes de droit souple recensés, les normes tierces sont parfois adoptées dans des règlements nationaux et deviennent alors juridiquement contraignantes (Johnson, 2019).

7.1.5 Recherche et innovation responsables

L'acceptation sociale de la technologie est un élément important des stratégies d'adoption (de Jong, 2022). La participation du public est cruciale pour toute approche de recherche et d'innovation responsables (RIR) visant l'adoption répandue des technologies émergentes (parfois appelée *innovation responsable*)[18] (Ten Holter *et al.*, 2022). Von Schomberg (2012) propose la définition suivante de la RIR :

> *Processus transparent et interactif par lequel les acteurs sociétaux et les innovateurs se répondent mutuellement pour obtenir l'acceptabilité (éthique), la durabilité et la désirabilité sociétale du processus d'innovation et de ses produits commercialisables (afin de permettre une intégration adéquate des avancées scientifiques et technologiques dans notre société).*

La RIR cherche à intégrer des facteurs éthiques, juridiques et sociaux dans la recherche et développement (R-D), tout en orientant l'innovation vers des résultats socialement bénéfiques (KPMG Australia et Sydney Quantum Academy, 2021). Il s'agit d'une approche anticipative de la gouvernance technologique, car elle se concentre sur la participation de divers acteurs dès le début de la R-D, plutôt que sur la résolution des problèmes après la mise en œuvre (KPMG Australia et Sydney Quantum Academy, 2021; de Jong, 2022). Elle ne part pas du principe que le public a besoin d'être informé à propos des technologies émergentes, mais encourage plutôt le dialogue entre les différentes parties prenantes (Ten Holter

18 Alors que l'innovation responsable désigne les principes universitaires communs visant à améliorer les répercussions sociales de la technologie, la RIR se focalise sur la mise en œuvre de ces principes par les décideurs politiques (Owen et Pansera, 2019).

et al., 2022). Ses éléments clés sont la consultation et la coopération avec les parties prenantes afin de prévoir les résultats de l'adoption et de réagir face aux conclusions de cette consultation et des réflexions (Stilgoe *et al.*, 2013). En fin de compte, la RIR peut faciliter l'adoption d'une technologie par la société, améliorer la technologie elle-même et atténuer ses effets négatifs (Ten Holter *et al.*, 2022). Elle a été appliquée aux nanotechnologies (Kjølberg et Strand, 2011), à l'IA (Brundage, 2016) et à la biologie synthétique (Macnaghten *et al.*, 2016). Plusieurs programmes de recherche étrangers sur les technologies quantiques l'incluent en tant qu'approche transversale (encadré 7.2).

Encadré 7.2 Approches de la RIR sur les technologies quantiques

Australie : La Responsible Innovation Future Science Platform et le Australian Research Council's Centre of Excellence for Engineered Quantum Systems ont financé une bourse postdoctorale qui examine le rôle de l'innovation responsable dans la conception et l'utilisation des technologies (KPMG Australia et Sydney Quantum Academy, 2021).

Union européenne : Une démarche de RIR conçue dans l'Union européenne est axée sur la participation du public, le libre accès, l'égalité des genres, l'éthique, l'éducation scientifique et la gouvernance (RRI Tools, s.d.). De plus, le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 a financé QuantERA, un réseau européen d'organismes publics de financement de la recherche, qui a élaboré des lignes directrices en matière de RIR sur les technologies quantiques (*Guidelines in RRI in QT*) (QuantERA, s.d.).

Pays-Bas : Le Conseil néerlandais de la recherche a lancé un programme de recherche sur les répercussions sociales des technologies quantiques et a mis à disposition près de 2,9 millions d'euros pour des projets d'une durée de quatre à cinq ans (NWA, 2021).

Royaume-Uni : Le Conseil de recherche en génie et sciences physiques (Engineering and Physical Sciences Research Council) a implanté le cadre AREA (Anticiper, Réfléchir, S'engager, Agir) et encourage les chercheurs à le suivre dans leur cheminement vers la RIR (UKRI, 2022). En 2019, UK Research and Innovation a financé un projet qui conçoit « une méthodologie combinant la conception participative et les approches de recherche et d'innovation responsables dans les technologies quantiques » (UKRI, s.d.).

Des chercheurs du Royaume-Uni ont déjà mené des activités de RIR dans le domaine des technologies quantiques. En 2017, 77 personnes de différents milieux socioéconomiques et éducatifs ont été réunies à l'occasion d'une discussion publique sur les technologies quantiques (EPSRC, s.d.). Elles ont manifesté un intérêt particulier pour les technologies quantiques susceptibles de sauver des vies ou de prolonger la vie (p. ex. les technologies de la santé, les applications humanitaires), d'améliorer l'efficacité des soins de santé et d'améliorer la sécurité nationale et individuelle. Elles ont toutefois exprimé des inquiétudes quant aux conséquences des technologies quantiques sur la fracture numérique, les pertes d'emplois dans les postes analytiques et logistiques, le changement climatique et la course internationale à l'armement. Le piratage informatique, la cyberguerre et la dissimulation d'activités criminelles ont également été considérés comme des menaces. Bien que les participants aient soulevé des problèmes, dont ceux-ci, ils se sont montrés globalement optimistes au sujet de la conception et de l'utilisation des technologies quantiques, et ont été rassurés par le fait qu'il était possible d'atténuer les risques mentionnés par des cadres juridiques et réglementaires. Ils ont également exprimé l'espoir que ces technologies soient utilisées pour le bien public, plutôt que pour accroître le profit privé (EPSRC, s.d.).

Les chercheurs ont établi un ensemble de principes visant à guider la RIR sur les technologies quantiques

En 2023, un groupe interdisciplinaire de chercheurs a élaboré le concept de technologie quantique responsable et un ensemble de principes pour faire progresser l'innovation quantique responsable (encadré 7.3). Ces principes intègrent la prise en compte des conséquences éthiques, juridiques, sociales et politiques (ELSPI quantiques; voir les chapitres 4 et 5) dans la R-D quantique tout en répondant aux critères essentiels de la RIR (Kop *et al.*, 2023). Le cadre qui en résulte vise à protéger contre les risques présentés par les technologies quantiques, à garantir une large participation des différentes parties prenantes au processus d'innovation et à faire progresser l'innovation. La technologie quantique responsable peut servir de fondement à toute une série de politiques allant de l'engagement volontaire aux lois et règlements contraignants, en passant par des mesures d'autoréglementation (Kop *et al.*, 2023).

Encadré 7.3 Principes proposés pour la technologie quantique responsable

1. Considérer la sécurité de l'information comme une partie intégrante des technologies quantiques, en s'attaquant aux menaces pour la sécurité;
2. Anticiper l'utilisation malveillante des applications quantiques et tenir compte des risques de double usage;
3. Rechercher une collaboration internationale fondée sur des valeurs partagées et s'attaquer à la dynamique du « gagnant rafle tout »;
4. Considérer notre planète comme l'environnement sociotechnique dans lequel les technologies quantiques devraient fonctionner, et mobiliser les États;
5. Être aussi ouvert que possible, et aussi fermé que nécessaire, et mobiliser les institutions;
6. Viser des communautés de R-D quantique diversifiées sur le plan des disciplines et des personnes, et faire participer la population;
7. Lier explicitement la R-D quantique à des objectifs sociaux souhaitables, afin de faire progresser la société;
8. Stimuler activement l'innovation durable et interdisciplinaire, et faire progresser la technologie;
9. Créer un écosystème permettant d'en savoir plus sur les usages et les conséquences possibles des applications des technologies quantiques afin d'accroître notre connaissance de la technologie quantique responsable;
10. Faciliter le dialogue avec les parties prenantes pour mieux envisager les futurs quantiques possibles, faire progresser notre réflexion collective et notre éducation sur les technologies quantiques et leurs conséquences.

(Kop *et al.*, 2023)

Les programmes d'information et de sensibilisation de la population peuvent aider à contrer la mésinformation et à stimuler l'adoption

Comme il est indiqué au chapitre 4, le battage médiatique et la désinformation peuvent étouffer l'adoption des technologies quantiques par les utilisateurs finaux. Étant donné la controverse publique concernant les organismes génétiquement

modifiés (OGM) et d'autres avancées technologiques, la communauté scientifique devrait être franche sur les lacunes en matière de connaissances quantiques et élaborer des stratégies de mobilisation des connaissances guidées par les données capables d'atténuer ce battage et prévenir une éventuelle « phobie quantique » (Inglesant *et al.*, 2016; Ezratty, 2022). Plusieurs stratégies utilisées pour éviter le battage médiatique autour de la recherche scientifique pourraient également s'avérer utiles pour la recherche quantique. Les interventions efficaces reposent sur le principe que la communication de l'incertitude scientifique réduit l'absorption de renseignements erronés. Par conséquent, les stratégies visant à instaurer la confiance et à accroître la crédibilité comprennent la documentation et la signalisation de l'incertitude scientifique, l'explication de sa valeur scientifique et la description de son incidence possible sur les résultats (Jensen *et al.*, 2011; Ratcliff *et al.*, 2018; Flemming *et al.*, 2020).

Pour atténuer les effets négatifs du battage à propos des technologies quantiques, Ezratty (2022) plaide en faveur d'une plus grande transparence dans la recherche et l'innovation quantiques grâce à des mécanismes tels que (i) la publication par les organismes gouvernementaux et les organismes de recherche d'examens des progrès réalisés, en collaboration avec des organes experts indépendants; (ii) une description claire des difficultés scientifiques et techniques qui doivent être résolues avant que les technologies quantiques puissent être commercialisées; (iii) un suivi et des rapports plus précis sur la maturité des différentes technologies quantiques et (iv) l'adoption à grande échelle de critères de référence tiers largement acceptés, qui permettraient de comparer les performances des différents types d'ordinateurs quantiques.

Les programmes d'information et de sensibilisation du public peuvent contribuer à démystifier la mécanique quantique et à répondre aux préoccupations légitimes de la population concernant les incidences des technologies quantiques. Ces initiatives s'adressent à des personnes d'âges et de milieux socioéconomiques divers et peuvent être parrainées par des entreprises privées, des universités, des ministères et des organismes gouvernementaux (Seskir *et al.*, 2023). Par exemple, le programme Quantum Flagship de l'Union européenne conçoit des outils destinés aux études secondaires et supérieures et à la formation continue, ainsi qu'à la sensibilisation du public (QTEdu, s.d.-a). Aux États-Unis, le National Q-12 Education Partnership — mené par la Fondation nationale des sciences et du Bureau des politiques scientifiques et technologiques de la Maison blanche — s'appuie sur un réseau regroupant l'industrie, les sociétés professionnelles et les éducateurs pour promouvoir un contact précoce des élèves des écoles secondaires avec les sciences et technologies quantiques (Q-12 Partnership, s.d.).

Au Canada, certains chercheurs organisent des campagnes de sensibilisation de la population à la physique et aux technologies quantiques. Par exemple, l'Institut d'informatique quantique de l'université de Waterloo propose plusieurs programmes sur les sciences et la technologie de l'information quantiques à l'intention des élèves du secondaire et des étudiants du premier cycle universitaire, ainsi que des enseignants du secondaire (IQC, s.d.-a). De même, l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke travaille à démystifier la physique quantique auprès des élèves du secondaire et du collégial (IQ, s.d.). Parmi les autres démarches de sensibilisation, citons des manuels interactifs sur du matériel accessible au public et des logiciels libres (Wootton *et al.*, 2020) et des ateliers communautaires (dont certains portent sur les mathématiques de l'informatique quantique, tout en évitant les concepts de physique) (Salehi *et al.*, 2022). Toutes ces approches partent du principe que l'utilisation des technologies quantiques ne nécessite pas de connaissances approfondies en physique (Seskir *et al.*, 2023).

Il existe des possibilités de mise en pratique de la RIR au Canada

Au Canada, la RIR est un concept qui demeure le domaine de collectifs de recherche fragmentés et de chercheurs intéressés par cette question (Matthews *et al.*, 2021). Néanmoins, mettre l'accent sur l'utilisation responsable et éthique des technologies quantiques pour le bien public pourrait distinguer l'approche du Canada de celle d'autres pays et l'aider à attirer des talents étrangers. La RIR sur les technologies quantiques pourrait s'inspirer des leçons tirées de l'IA et, en particulier, de la Directive sur la prise de décisions automatisée du Conseil du Trésor du Canada, qui a intégré les incidences sociétales de l'IA dans son processus d'évaluation des risques (GC, 2023d). La mise en pratique de la RIR au Canada implique la création de programmes de formation sur les questions sociales liées au domaine quantique à l'intention des étudiants en physique, en génie et en sciences naturelles et sciences sociales. Tout comme les organismes de financement de la recherche du monde entier, le Conseil de recherches en sciences humaines (CRSH) est bien placé pour financer des programmes de recherche et de formation dans le domaine des ELSPI quantiques (ISDE, 2022d). En fin de compte, intégrer la RIR dans le processus de recherche et de formation pourrait amener à une diversification de la main-d'œuvre et promouvoir l'acceptation sociale des technologies quantiques.

7.2 Réflexions du comité d'experts

Les technologies quantiques comprennent un large éventail de dispositifs et de techniques, dont la plupart ne seront pas commercialisés avant plusieurs années. Cependant, il est largement admis que celles qui sont offertes dans le commerce ont le potentiel de révolutionner de nombreuses industries; à partir de 2023, une poignée d'utilisateurs commenceront à adopter des dispositifs hybrides quantiques-classiques. Durant les discussions du comité d'experts, il est apparu clairement qu'il est difficile de quantifier la mesure dans laquelle les différentes industries seront touchées, comme le montre la vaste diversité de projections de la valeur commerciale. En outre, comme il est noté à la section 2.3, toutes les estimations accessibles des avantages économiques de l'adoption des technologies quantiques portent sur l'informatique quantique, sans aucune estimation de la valeur créée par l'adoption de capteurs ou de communications quantiques.

Les dispositifs de détection sont peut-être les plus près de l'adoption, mais certains d'entre eux posent des risques pour la vie privée. C'est l'informatique qui bénéficie actuellement de la plus grande attention, mais elle est loin d'être prête à arriver sur le marché. Cependant, les ordinateurs quantiques tolérant aux pannes constituent une grave menace planétaire, car il est probable qu'un tel système puisse miner la plupart des systèmes de chiffrement modernes. La sécurité nationale et la sécurité des entreprises privées dépendent de la mise au point et de l'adoption de la QRC, dont la mise en œuvre, notamment, ne nécessite pas de technologie quantique. Le comité d'experts souligne que l'incapacité des gouvernements et des entreprises à adopter cette technique pourrait avoir des effets dévastateurs. D'autant plus, qu'il serait possible de recueillir des données aujourd'hui et de les stocker afin d'y accéder plus tard à l'aide de techniques de décryptage quantique.

Les technologies quantiques sont reconnues à l'échelle mondiale comme un investissement essentiel, ce qui incite de nombreux pays à consacrer des millions de dollars, voire des milliards, à leur développement. Le comité d'experts constate que des investissements de cet ampleur sont nécessaires, car la recherche sur les technologies quantiques peut être lente et coûteuse, une grande partie des équipements et des matières premières devant être importés (dans certains cas d'un fournisseur unique). Le Canada n'est pas en mesure d'extraire, de fabriquer ou de créer de quelque manière que ce soit tous les intrants de la chaîne d'approvisionnement d'un produit quantique donné. Il est donc crucial qu'elle entretienne des collaborations internationales solides et fiables pour compléter les éléments de la chaîne de valeur quantique que les entreprises canadiennes ne peuvent pas assurer, tout en fournissant des marchés d'exportation supplémentaires et plus vastes aux entreprises quantiques nationales.

Le comité estime qu'il est peu probable que le Canada puisse exceller dans tous les domaines de la R-D et de la commercialisation quantiques, mais il pourrait définir comment se spécialiser au mieux pour se démarquer des autres pays. Toutefois, que le Canada devienne ou non un chef de file dans la conception et la production de technologies quantiques, les industries nationales devront adopter ces technologies si elles veulent rester concurrentielles à l'échelle mondiale — tout comme les gouvernements, qui espèrent garantir la sécurité nationale et économique, la sécurité publique et l'intégrité de l'infrastructure qui fournit des services publics essentiels.

En 2023, le Canada a publié sa *Stratégie quantique nationale* (SQN). Bien qu'il s'agisse d'un bon point de départ pour la mise sur pied d'un écosystème quantique national, le comité d'experts estime que les initiatives prometteuses demeurent sous-financées, en particulier par rapport aux pays qui ont engagé des fonds considérables. Pour ne pas se laisser distancer, le Canada pourrait investir davantage dans les technologies quantiques. Jusqu'ici, la majeure partie du financement gouvernemental s'est focalisé sur la conception et la production; les programmes de financements ont tendance à soutenir la recherche fondamentale et la création de PME et d'entreprises en démarrage, dont beaucoup n'ont pas commercialisé leurs produits ou ont quitté le Canada. La SQN se concentre principalement sur les initiatives relatives à l'offre, et cherche moins à stimuler la diffusion et l'adoption. Bien que les projecteurs soient quelque peu braqués sur les utilisateurs et les secteurs qui adoptent les technologies — par exemple, dans la réalisation de proposition de feuilles de route — les pays qui jouent un rôle de premier plan dans l'espace quantique (p. ex. la Chine et les États-Unis) suivent des stratégies globales d'adoption de la technologie, tant dans le secteur public que dans le secteur privé.

Selon le comité, la SQN n'accorde pas suffisamment d'attention à l'ELSPI relative à l'adoption des technologies quantiques. Comme il est mentionné plus haut, certains capteurs quantiques pourraient exacerber les problèmes de surveillance et les ordinateurs quantiques pourraient menacer le chiffrement numérique et aggraver la discrimination individuelle et collective. Ces capacités compliquent la mise en œuvre, l'interprétation et l'application des lois canadiennes sur la protection de la vie privée et des données. En outre, se pose aussi la difficulté de garantir un accès équitable et répandu aux technologies quantiques dans tout le Canada à mesure qu'elles deviendront disponibles. Cette vulnérabilité est aggravée par le fait que les grandes entreprises technologiques peuvent exploiter leur position dominante pour dicter les conditions d'accès; en outre, la mise en œuvre et l'application des lois canadiennes sur la propriété intellectuelle et la concurrence peuvent favoriser les gros acteurs du marché. Enfin, comme la

science quantique est un défi conceptuel, les technologies quantiques sont également difficiles à comprendre et peuvent être entourées de mystère ou faire l'objet d'un battage excessif.

De nombreuses stratégies pourraient aider à résoudre ces difficultés et à stimuler l'adoption des technologies quantiques. Il s'agit notamment de la coopération public-privé (p. ex. marchés publics et autres programmes spécialisés ou partenariats public-privé), de la réglementation, de la surveillance et des politiques favorables à la concurrence, des initiatives lancées par l'industrie et de la formation d'une main-d'œuvre quantique diversifiée. Ces stratégies permettraient aux différents ordres de gouvernement d'orienter l'innovation quantique et d'utiliser leur politique d'innovation pour traiter les questions d'ELSPI et les problèmes géopolitiques soulevés par les technologies quantiques. Le comité d'experts souligne également la valeur des différents genres de formation, y compris celle menant à des qualifications techniques et portant sur le développement, la formation axée sur l'application et orientée vers la demande et la formation générale destinée aux hauts dirigeants, afin qu'ils puissent mieux évaluer comment et quand leur organisation devrait adopter les technologies quantiques. Afin d'accroître la confiance de la société et la transparence, et de lutter contre la mésinformation et le sensationnalisme, des initiatives de sensibilisation pourraient faire comprendre au public ce que les technologies quantiques peuvent et ne peuvent pas faire — de telles initiatives pourraient renforcer la confiance de la population, une condition préalable à l'adoption à grande échelle des technologies quantiques.

Le comité d'experts constate également un manque de données empiriques reproductibles sur divers sujets, ce qui rend difficiles une planification et une prise de décision ciblées. Il s'agit par exemple des données portant sur :

- les caractéristiques démographiques du PHQ au Canada;
- la demande de PHQ dans l'industrie, notamment en ce qui concerne les domaines d'expertise et le niveau de formation souhaité;
- les stratégies de transfert de technologie et l'importance de certains éléments, comme les brevets.

En outre, il existe une incertitude générale quant aux capacités, au coût, à la maturité technologique et aux délais de disponibilité exacts des technologies quantiques, ce qui cause d'importantes lacunes de connaissances. Combler ces lacunes permettra au gouvernement de prendre des décisions éclairées sur les types de programmes à proposer à l'avenir, et aidera les décideurs politiques à mieux comprendre comment le Canada peut se spécialiser et se différencier sur le marché quantique mondial.

Il est essentiel que le Canada se prépare à l'émergence et à la généralisation des technologies quantiques. À long terme, ces technologies sont appelées à avoir une multitude d'impacts sociaux et économiques, dont beaucoup ne sont peut-être pas prévisibles (de la même manière qu'il était difficile de prévoir l'effet des transistors et des ordinateurs classiques sur tous les aspects de la société). Il est toutefois important de noter que cette préparation ne se limite pas à garantir que le Canada dispose des conditions favorables à un large accès aux technologies quantiques, et que le marché y est prêt; la préparation est également essentielle pour garantir la viabilité à long terme d'une industrie quantique nationale et d'une base manufacturière capable de favoriser et d'entretenir l'adoption par les organisations au Canada et dans le monde entier. Cela nécessitera une stratégie d'innovation donnant la priorité à la création et à la conservation de la propriété intellectuelle et des talents quantiques au Canada.

Termes clés

Tout dispositif technologique qui utilise les principes de la science quantique, y compris les ordinateurs quantiques, les appareils médicaux, les capteurs, les appareils de communications sécurisées et les horloges atomiques, peut être considéré comme une *technologie quantique*. On estime en général que les technologies quantiques de *première génération* sont celles qui exploitent des comportements quantiques (p. ex. les semiconducteurs, les lasers ou l'IRM). Les technologies de *deuxième génération* sont celles qui manipulent et contrôlent la dynamique quantique. Par exemple, l'*informatique quantique* est considérée comme étant de deuxième génération parce qu'elle nécessite d'organiser et de contrôler le flux d'informations quantiques. L'examen des technologies quantiques requiert une certaine compréhension de la science quantique; par conséquent, la majorité des discussions sur ces technologies sont tenues par des experts du domaine, dans un langage qui peut être difficile à suivre pour les non-experts. La liste de termes clés qui suit fournit la description non technique et non rigoureuse de certains concepts propres au domaine quantique que l'on trouve dans le rapport. Pour un glossaire technique, nous vous invitons à consulter Ezratty (2021) et Hoofnagle et Garfinkel (2021).

L'**intrication** est un phénomène quantique par lequel les états de plusieurs objets quantiques sont superposés. La mesure de l'état quantique de deux objets dans des bases complémentaires révèle des valeurs corrélées (mais aléatoires). L'intrication de qubits au moyen de portes quantiques est une nouvelle ressource dont ne disposent pas les ordinateurs classiques d'aujourd'hui. L'intrication est également utilisée en cryptographie quantique et dans les systèmes de télécommunications qui reposent sur l'échange quantique de clés (QKD).

Les **dispositifs quantiques bruyants à échelle intermédiaire (NISQ)** sont des ordinateurs quantiques à portes dont la décohérence — parfois appelée *bruit* — n'est pas atténuée ou corrigée. Les dispositifs NISQ peuvent atteindre des centaines de qubits.

L'**avantage quantique** décrit le stade auquel les ordinateurs quantiques peuvent résoudre certains problèmes à un coût moindre, plus rapidement et avec plus de précision que les ordinateurs classiques, ou résoudre des problèmes inaccessibles aux ordinateurs classiques. Toutefois, les détails des critères de référence particuliers nécessaires pour démontrer l'avantage quantique font l'objet d'un vif débat.

Un **algorithme quantique** est un algorithme comprenant une entrée, une sortie et une procédure, la procédure étant exprimée sous la forme d'une séquence d'instructions propres à un ordinateur quantique et exécutées par des « circuits quantiques ».

Un **recuiseur quantique** est un type de processeur quantique qui exécute une heuristique connue sous le nom de recuit quantique pour trouver des solutions à des problèmes d'optimisation complexes. La dynamique quantique conduit le système vers ses états d'énergie les plus bas correspondant aux solutions optimales d'une fonction objective souhaitée. Les recuiseurs quantiques sont destinés à mieux résoudre certains problèmes d'optimisation qu'avec les méthodes classiques, par l'étude simultanée de nombreux résultats possibles grâce à des effets quantiques tels que la superposition et l'intrication.

Un **circuit quantique** est une séquence d'entrées, de portes logiques, de mesures et de qubits servant à exécuter des algorithmes quantiques.

L'**informatique quantique** est un paradigme informatique qui repose sur le stockage et la manipulation d'informations quantiques.

L'**informatique quantique en tant que service (QCaaS)** met à disposition des ordinateurs quantiques hors site, réels ou simulés, à distance (c.-à-d. en nuage).

La **correction d'erreur quantique** est une technique de codage, de traitement et de décodage de l'information quantique qui permet de se protéger contre les erreurs survenant pendant le calcul, y compris la décohérence. La décohérence est le processus de perte de la cohérence quantique, soit la caractéristique de la superposition de différents états du système. Elle est souvent due aux interactions entre les objets quantiques et leur environnement. Le temps de cohérence est le temps pendant lequel les objets quantiques restent dans des superpositions d'états, après quoi on dit qu'il y a décohérence.

Une **porte quantique** est un analogue quantique des portes logiques classiques (qui constituent la base des algorithmes informatiques modernes).

Internet quantique est un terme utilisé pour décrire un réseau qui intègre le partage d'informations quantiques entre des dispositifs quantiques tels que des ordinateurs et des capteurs.

L'**échange quantique de clés (QKD)** est une suite de protocoles sécurisés, qui exploitent la capacité à transmettre des informations quantiques pour établir des clés de chiffrement symétriques. Elle est exécutée par transmission photonique, généralement dans l'espace libre, par le biais de satellites ou de câbles à fibre optique. Le caractère aléatoire de ces clés est rendu possible par le caractère aléatoire inhérent aux mesures quantiques; la sécurité contre les écoutes provient du fait que l'interception est détectable.

L'**apprentissage machine quantique (AMQ)** fait référence à l'intégration de l'informatique quantique et de l'apprentissage machine. Il peut englober une variété de méthodes et de techniques différentes, et inclut généralement un calcul hybride classique-quantique.

La **préparation quantique** est la capacité d'une entreprise à adopter des processus quantiques afin d'obtenir un avantage concurrentiel une fois que des technologies quantiques matures seront disponibles.

La **cryptographie résistante aux méthodes quantiques (QRC)** correspond aux algorithmes considérés comme protégés contre les attaques d'ordinateurs quantiques. Elle est également connue sous le nom de cryptographie postquantique. Il en existe deux types principaux : l'un reposant sur des codes classiques résistants aux ordinateurs quantiques et l'autre sur l'utilisation d'informations quantiques pour se protéger contre les attaques.

Simulateur quantique est une appellation donnée à un ordinateur quantique analogique capable de simuler de manière fiable un système quantique lorsqu'appliqué à des matériaux quantiques. Le terme peut également être utilisé pour la simulation numérique classique de l'informatique quantique.

L'**état quantique** est la description mathématique du système quantique qui peut être utilisée pour prévoir les propriétés statistiques des mesures.

Les **qubits** sont l'équivalent quantique des *bits* informatiques classiques, qui codent l'information dans son état quantique. Alors qu'un bit classique peut prendre soit la valeur 0 soit la valeur 1, un qubit peut se trouver dans une superposition d'états. C'est l'élément de base de la plupart des ordinateurs quantiques et des communications quantiques. Différents types de qubits sont réalisés pour différents matériaux et technologies.

Le **chiffrement RSA** est un système de chiffrement asymétrique très répandu (son nom vient de Ron Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman), qui repose sur la difficulté de factoriser une clé publique formée par la multiplication de deux grands nombres premiers. Cette factorisation est difficile à réaliser classiquement, mais peut être résolue efficacement à l'aide de l'algorithme de Shor. Le décryptage du chiffrement RSA et d'autres systèmes de chiffrement similaires pourraient avoir des effets dévastateurs sur la sécurité nationale, sur la sécurité des entreprises et sur la confidentialité des données individuelles.

L'**algorithme de Shor** est un algorithme quantique de factorisation des nombres entiers, dont pourrait se servir un ordinateur quantique pour casser presque tous les protocoles de chiffrement à clé symétrique utilisés aujourd'hui, y compris le chiffrement RSA.

La **superposition** est la propriété quantique qui suppose que l'état quantique d'un objet peut se trouver dans une combinaison cohérente d'états en même temps.

L'**ordinateur quantique universel** est un ordinateur quantique capable de simuler efficacement n'importe quel ordinateur quantique conçu avec un but particulier.

Annexe A Codes SCIAN correspondant aux figures du chapitre 2

Tableau A.1 Codes SCIAN correspondant à la figure 2.2

Secteur	Code SCIAN	Description
Agriculture	11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse
Fabrication automobile et aérospatiale	336	Fabrication de matériel de transport
Chimie et science des matériaux	3251–3253, 3255, 3256, 3259	Autres activités de fabrication de produits chimiques
Finance	52	Finance et assurances à l'exclusion des autorités monétaires
Exploitation minière, pétrolière et gazière	21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz
Produits pharmaceutiques	3254	Fabrication de produits pharmaceutiques et de médicaments
Télécommunications	517	Télécommunications
Transport	48, 49	Transport et entreposage

Tableau A.2 Codes SCIAN correspondant à la figure 2.3

Secteur	Code SCIAN	Description
Agriculture	111, 1121–1124, 1129, 1151, 1152	Agriculture (à l'exception de l'aquaculture) et activités de soutien à la production végétale et animale
Fabrication automobile et aérospatiale	3361–3363, 3364	Fabrication de véhicules automobiles, fabrication de carrosseries et de remorques de véhicules automobiles, fabrication de produits automobiles, aérospatiaux et de pièces
Chimie et science des matériaux	3251–3253, 3255, 3256, 3259	Autres activités de fabrication de produits chimiques
Énergie	2211	Production, transport et distribution d'électricité
Finance	52	Finance et assurance
Soins de santé	62	Soins de santé et assistance sociale
Exploitation minière, pétrolière et gazière	21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz
Produits pharmaceutiques	3254	Fabrication de produits pharmaceutiques et de médicaments
Télécommunications	517, 518	Télécommunications et traitement de données, hébergement et services connexes
Transport	48, 49	Transport et entreposage

Annexe B Applications des technologies quantiques dans les secteurs d'adoption

Agriculture

Informatique

Dans le secteur agricole, la simulation quantique offre la possibilité d'une nouvelle méthode de fixation de l'azote — le processus par lequel l'azote atmosphérique est transformé en composés organiques (p. ex. en ammoniac) servant à créer des engrais essentiels à l'agriculture moderne (Crane *et al.*, 2017; Denver, 2020). Actuellement, les procédés industriels utilisés pour la fixation de l'azote (p. ex. le procédé Haber-Bosch) nécessitent une grande quantité d'énergie, jusqu'à 5 % de la consommation mondiale totale de gaz naturel (Crane *et al.*, 2017). Ils produisent également d'importantes quantités de gaz à effet de serre en tant que sous-produits — jusqu'à 2 à 3 % des émissions mondiales de CO_2 (Quantum Flagship, s.d.).

La simulation quantique permettrait de découvrir des méthodes de production plus écoénergétiques en modélisant le processus par lequel les bactéries fixent l'azote (Crane *et al.*, 2017). Plus précisément, la détermination des catalyseurs pourrait réduire la quantité d'énergie nécessaire (en réduisant la quantité de chaleur et de pression requise) et le coût de production de l'ammoniac (Denver, 2020). Si les ordinateurs quantiques ne peuvent pas encore simuler les processus de fixation de l'azote de manière suffisamment détaillée pour la production d'engrais (Crane *et al.*, 2017; Reiher *et al.*, 2017), certaines sources avancent qu'ils pourraient y arriver avant 2030 (IBM, s.d.-a). En outre, des chercheurs ont décrit en détail la façon de mettre en œuvre de tels procédés au moyen d'une architecture hybride quantique-classique lorsque le matériel informatique quantique sera suffisamment avancé (Reiher *et al.*, 2017). Toutefois, il existe actuellement peu de preuves d'un avantage quantique dans ce domaine (Lee *et al.*, 2023).

L'informatique quantique pourrait également trouver des applications en agriculture prédictive. Le Conseil supérieur de la recherche scientifique espagnol a entrepris un projet en collaboration avec des partenaires industriels afin d'utiliser l'apprentissage machine quantique (AMQ) pour prédire avec plus de précision le rendement des cultures grâce à l'analyse d'images satellitaires, combinées à des données météorologiques, de risque et d'imagerie multispectrale et autres (CSIC, 2022).

Détection

Il a été avancé que les gravimètres quantiques reposant sur l'interférométrie atomique pourraient contribuer à l'agriculture de précision en détectant les conditions du sol, telles que le degré de compaction, et en distinguant les sols secs et des sols saturés (Stray *et al.*, 2022).

Chimie et science des matériaux

Informatique

L'informatique quantique a diverses applications en chimie et en science des matériaux, notamment la simulation des propriétés des molécules et des matériaux qui, dans de nombreux cas, s'expliquent mieux par la mécanique quantique (Bauer *et al.*, 2019). En fait, la simulation de systèmes quantiques est l'application la plus prometteuse dans le domaine de la chimie et pourrait être utilisée pour aider les chercheurs à mieux comprendre les mécanismes des réactions chimiques et à concevoir de meilleurs catalyseurs (Budde et Volz, 2019). En 2019, un atelier qui s'est penché sur l'utilisation de l'informatique quantique en chimie et en science des matériaux a relevé plusieurs difficultés de simulation dans « la chimie quantique, la spectroscopie moléculaire quantique et la dynamique quantique chimique, la structure électronique corrélée dans les matériaux et les effets quantiques dynamiques dans les matériaux » (Bauer *et al.*, 2019; Gunashekar *et al.*, 2022). Les ordinateurs quantiques pourraient offrir aux problèmes dans ces domaines des solutions plus précises que les méthodes reposant sur les ordinateurs classiques (Ho *et al.*, 2018). Toutefois, il est peu probable que ces cas d'utilisation se généralisent à court terme (Biondi *et al.*, 2021). Les ordinateurs quantiques peuvent aussi être employés pour les problèmes d'optimisation dans le secteur chimique, comme l'optimisation des processus de production et des chaînes d'approvisionnement (Budde et Volz, 2019).

Dans le domaine de la science des matériaux, les ordinateurs quantiques pourraient être utilisés pour automatiser la découverte des matériaux et permettre l'exploration de l'espace de conception des matériaux d'une façon inaccessible aux ordinateurs classiques, permettant ainsi la conception de nouveaux matériaux utilisables à de nombreuses fins (Kitai *et al.*, 2020). Ils ont également été employés pour simuler des matériaux dans le but de mieux comprendre les structures et les propriétés magnétiques (Rosenthal, 2021). Une fois de plus, cependant, l'emploi d'ordinateurs quantiques pour ces genres de problèmes de simulation ne sera probablement pas commercialement viable à court ou moyen terme (Biondi *et al.*, 2021).

Détection

Les capteurs quantiques ont des applications en chimie et en science des matériaux. Par exemple, des capteurs à diamant à centre azote-lacune (NV) ont été utilisés pour la spectroscopie à résonance magnétique nucléaire (RMN) (Allert *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022), un important outil d'analyse chimique et structurelle (Liu *et al.*, 2022). Les techniques précédentes de spectroscopie RMN se limitaient à des échelles grandes et macroscopiques, alors que les centres NV permettent la spectroscopie RMN à l'échelle de la molécule et de l'atome (Allert *et al.*, 2022).

Défense et renseignement

Informatique

Il existe une variété d'applications pour l'informatique quantique dans le secteur de la défense, y compris pour résoudre les problèmes d'optimisation, pour l'AMQ et pour la simulation. Les problèmes d'optimisation susceptibles d'être résolus par les ordinateurs quantiques comprennent « la logistique des opérations et des déploiements à l'étranger, la planification des missions, les jeux de guerre, la validation et la vérification des systèmes, la conception de véhicules et leurs attributs comme la furtivité ou l'agilité » (Krelina, 2021). L'AMQ peut être utilisé pour aider la prise de décision militaire, la planification des missions, les cyberopérations et le ciblage (Sayler, 2021; Krelina, 2021). Les ordinateurs quantiques sont susceptibles de jouer un rôle dans le traitement et l'analyse des données de renseignement, de surveillance et de reconnaissance, tandis que la simulation quantique peut également servir à concevoir des armes et des dispositifs de défense chimiques et biologiques, ou avoir des applications en science des matériaux, par exemple pour la conception de matériaux de camouflage, de furtivité, de blindage ou résistants aux hautes températures. Il est prévu qu'à court ou moyen terme, on aura recours aux ordinateurs quantiques pour résoudre les problèmes d'optimisation, pour l'AMQ et pour la simulation quantique (Krelina, 2021).

Détection

La détection quantique suscite un grand intérêt dans le domaine militaire; en effet, le ministère de la Défense nationale a fait des capteurs quantiques le premier pilier de son plan stratégique (MDN et FAC, 2021). Les capteurs quantiques peuvent servir à la conception de systèmes de navigation inertielle qui fournissent un positionnement plus précis et permettent de naviguer lorsque le GPS est brouillé ou hors service (p. ex. sous la surface de la mer ou sous terre), ainsi que des systèmes de navigation inertielle destinés aux missiles guidés (Neumann

et al., 2021; Parker, 2021). Les sous-marins pourraient être parmi les premiers systèmes à adopter la navigation inertielle quantique (Krelina, 2021).

Les capteurs quantiques sont également importants pour le renseignement, la surveillance, l'acquisition d'objectifs et la reconnaissance (ISTAR); ils peuvent être montés sur des véhicules terrestres, maritimes et aériens (y compris sur des drones), ainsi que sur des satellites en orbite terrestre basse (Krelina, 2021). Par exemple, les magnétomètres et gravimètres quantiques peuvent servir à détecter des véhicules, des aéronefs ou des sous-marins camouflés, à rechercher des flottes de navires à partir de satellites dans l'espace et à détecter des structures souterraines (p. ex. des bunkers) et des objets enfouis (p. ex. des mines terrestres ou sous-marines) (Krelina, 2021).

Enfin, le radar (et le lidar, soit le système d'identification, détection et télémétrie par laser) quantique « pourrait être un dispositif technologique puissamment perturbateur susceptible de changer les règles de la guerre moderne » (Krelina, 2021) en permettant d'améliorer la détection et l'identification des cibles, tout en résistant au brouillage et en étant difficile à détecter. En outre, les radars classiques peuvent être améliorés par des horloges atomiques ou quantiques. Cependant, selon certaines sources, en raison de la foule d'obstacles techniques auxquels le radar quantique se heurte, il est peu probable qu'il sera disponible dans un avenir prévisible (Krelina, 2021), bien que le ministère de la Défense nationale ait donné la priorité à la construction et à l'expérimentation sur le terrain de radars et de lidars quantiques d'ici à 2030 (MDN et FAC, 2023).

Communications

Les réseaux de communications quantiques ont d'importantes applications dans le domaine de la défense, notamment en permettant des communications sécurisées entre des moyens terrestres, aériens, maritimes et spatiaux (Krelina, 2021). On pourrait aussi concevoir des systèmes permettant le chiffrement quantique selon la position, qui n'autorisent la consultation de renseignements qu'à partir d'un emplacement géographique donné, comme une base militaire (Neumann *et al.*, 2021). De plus, les antennes quantiques pourraient être utilisées en guerre électronique, car elles permettraient d'intercepter de signaux avec une antenne de très petite taille, même à des grandes longueurs d'onde (MDN et FAC, 2021; Krelina, 2021).

L'U.S. Air Force a rejeté l'échange quantique de clés (QKD), sous prétexte qu'il n'y a pas de besoin avéré pour cette technologie qui complexifie les systèmes tout en offrant « peu d'avantages par rapport aux meilleures solutions classiques » (USAF, s.d.). Toutefois, la mise en œuvre de la cryptographie résistante aux méthodes quantiques (QRC) est essentielle pour la défense. En effet, les organismes

de renseignement nationaux et étrangers peuvent intercepter des données chiffrées pour les décrypter par la suite, lorsque les ordinateurs quantiques seront disponibles (Krelina, 2021). Le MDN s'est fixé comme priorité de faire la « démonstration d'un algorithme quantique qui résout un problème de défense et/ou de sécurité » d'ici à 2030 (MDN et FAC, 2023).

Énergie

Informatique

Il existe une multitude d'applications de l'informatique quantique dans le secteur de l'énergie. Les ordinateurs quantiques peuvent être utilisés pour résoudre les problèmes d'optimisation des systèmes énergétiques, comme la répartition de l'infrastructure énergétique, tout en minimisant les coûts d'exploitation et de transport de l'énergie, face aux contraintes telles que la disponibilité des ressources, la charge du réseau électrique et la demande d'énergie (Ajagekar et You, 2019). En outre, l'informatique quantique peut aider à relever les défis de l'énergie durable en simulant des matériaux et des systèmes à l'échelle atomique, ce qui pourrait mener à la conception d'une variété de dispositifs technologiques, par exemple dans le domaine des biocarburants améliorés, de la conversion de l'énergie solaire, des parois des réacteurs à fusion nucléaire et des matériaux améliorant le captage et le stockage du carbone (Dieterich et Carter, 2017; Total Energies, 2020).

Détection

Il existe de nombreuses applications possibles des capteurs quantiques dans le secteur de l'énergie, au-delà de l'extraction pétrolière et gazière. Les capteurs à diamant à centre NV peuvent être utilisés pour surveiller l'intégrité de l'infrastructure énergétique, par exemple pour détecter les fuites dans les pipelines, la température et les contraintes et les efforts sur les lignes, les tours et les transformateurs durant le transport d'électricité (Crawford *et al.*, 2021). Les capteurs quantiques peuvent également intervenir dans la surveillance du captage et du stockage du carbone, comme le lidar quantique qui servirait à détecter les émissions et les fuites de CO_2. Enfin, des capteurs tels que les dispositifs d'interférence quantique supraconducteurs (SQUID) et les interféromètres atomiques peuvent être employés dans la surveillance des centrales nucléaires (Crawford *et al.*, 2021).

Finance

Informatique

Le secteur financier a manifesté un grand intérêt pour l'informatique quantique. Cela peut être dû au chevauchement intéressant entre les processus quantiques et la finance. En effet, « certains problèmes financiers bien connus peuvent être directement exprimés sous une forme quantique [...] Même l'ensemble du marché financier peut être modélisé sous forme de processus quantique, dans lequel des quantités importantes pour la finance, telles que la matrice de covariance, émergent naturellement » (Orus *et al.*, 2019).

Bon nombre des problèmes financiers qui pourraient bénéficier des ordinateurs quantiques sont des problèmes d'optimisation extrêmement difficiles, voire impossibles, à résoudre à l'aide d'un ordinateur classique (Orus *et al.*, 2019; Egger *et al.*, 2020). Ils concernent généralement la maximisation du rendement d'un portefeuille par la détermination des trajectoires d'échange optimales et les occasions d'arbitrage (Rosenberg *et al.*, 2016; Rebentrost et Lloyd, 2018; Orus *et al.*, 2019). Toutefois, les avantages que l'optimisation quantique procure au secteur financier à court terme sont spéculatifs (Biondi *et al.*, 2021).

L'AMQ peut être utile dans le secteur financier pour faciliter la détermination de modèles dans les données financières. Il permettrait de définir le choix de caractéristiques optimal dans les évaluations du risque de crédit (c.-à-d. l'utilisation des données historiques pour évaluer les caractéristiques pouvant le mieux prédire la solvabilité), de détecter la fraude et de gérer l'incertitude entourant l'évolution future des prix des actifs et du risque (Orus *et al.*, 2019; Egger *et al.*, 2020). Les ordinateurs quantiques peuvent également accélérer considérablement les simulations dans les applications financières, comme celles utilisant les méthodes de calcul de Monte-Carlo, qui analysent de gros systèmes complexes en simulant les sources d'incertitude. Ces méthodes peuvent servir à l'évaluation des produits dérivés et à l'estimation des risques (Orus *et al.*, 2019; Egger *et al.*, 2020). En outre, il a été avancé qu'un ordinateur quantique topologique pourrait simuler le comportement du marché et aider à prédire les trajectoires futures de celui-ci (Racorean, 2014). Toutefois, il est peu probable que nombre de ces applications soient accessibles à court ou moyen terme, bien que l'utilisation d'ordinateurs quantiques pour des problèmes d'optimisation puisse survenir un peu plus tôt (Biondi *et al.*, 2021).

Communications

Les communications et le chiffrement quantiques présentent un grand intérêt pour le secteur financier. En plus de la protection des transactions financières par

la QRC (IDQ, 2018), ce secteur pourrait être l'un des premiers à adopter le QKD (QDNL, 2020). La façon dont la cryptographie quantique pourrait toucher les cryptomonnaies fondées sur la chaîne de blocs est également attrayante. Kearney et Perez-Delgado (2021) ont analysé diverses technologies de ce type et ont constaté qu'elles étaient toutes au moins partiellement vulnérables aux attaques quantiques. Cependant, il existe plusieurs raisons pour lesquelles de telles attaques seraient difficiles à lancer et limitées dans leurs résultats (Huang, 2020). De plus, des initiatives sont en cours pour rendre ces technologies résistantes aux attaques quantiques.

Soins de santé

Informatique

Dans le domaine de la santé, l'informatique quantique peut être utilisée pour soutenir la prise de décision clinique en proposant des prévisions et des recommandations à partir des données des patients (Sahner et Williams, 2021). L'une des applications les plus prometteuses de l'informatique quantique dans ce secteur est l'AMQ, en raison des volumes importants (et en forte croissance) de données de santé (IBM, 2020). L'AMQ peut être employé pour l'aide au diagnostic; par exemple, pour l'analyse des résultats des scanneurs médicaux, comme les images de tomographie par ordinateur, d'IRM et de rayons X (Acar et Yilmaz, 2020; IBM, 2020). Il peut également contribuer à améliorer la médecine de précision en augmentant la précision des prévisions de risque pour les patients et des prévisions de l'efficacité des médicaments au niveau cellulaire, et en permettant des diagnostics et des traitements plus précis et personnalisés. En outre, il peut contribuer à améliorer les méthodes de diagnostic par cellule unique et mener à la découverte et à la détermination de biomarqueurs grâce à l'analyse d'ensembles de données complexes (IBM, 2020).

Toutefois, il est peu probable que l'AMQ soit largement adopté en médecine personnalisée à court ou moyen terme (Biondi *et al.*, 2021). À court terme, il est plus probable que l'informatique quantique soit utilisée pour l'optimisation de la radiothérapie, au moyen d'ordinateurs quantiques (Nazareth et Spaans, 2015) ou d'algorithmes inspirés d'inspiration quantique exécutés sur des ordinateurs classiques (Pakela *et al.*, 2020); l'AMQ pourrait être utilisable dans ce but à moyen à long terme (Cavinato *et al.*, 2020; Niraula *et al.*, 2021).

Détection

Les capteurs quantiques connus sous le nom de *magnétomètres à pompage optique* (OPM) ont permis aux chercheurs de créer les premiers systèmes de magnétoencéphalographie (MEG) portables; ils amélioreront la précision, la

flexibilité, l'adaptabilité et la portabilité des dispositifs de MEG et en réduiront les coûts (Aslam *et al.*, 2023; UKQTHST, s.d.-a). L'OPM-MEG offre une meilleure résolution spatiale et temporelle que la MEG actuelle à SQUID qui, contrairement à l'OPM-MEG, nécessite des pièces blindées magnétiquement et des conditions de fonctionnement cryogéniques (Coussens *et al.*, 2021; Gialopsou *et al.*, 2021). Actuellement, des OPM-MEG sont installés à l'Hôpital pour enfants malades de Toronto (SickKids), pour la recherche sur l'autisme (UKQTHST, 2021a) et au Royaume-Uni pour la détection des maladies cérébrales (UKQTHST, 2021b). En outre, les OPM peuvent également servir dans d'autres applications de détection touchant la santé; en cardiologie, par exemple (Jensen *et al.*, 2018; Aslam *et al.*, 2023). Ils seront probablement plus largement accessibles à court terme (c.-à-d. avant 2030).

Les capteurs quantiques à centres NV peuvent également être employés en soins de santé. Par exemple, ils ont été utilisés dans la détection des nanoparticules magnétiques dans des applications diagnostiques, pour distinguer les cellules saines des cellules cancéreuses (Glenn *et al.*, 2015). Cette méthode pourrait présenter des avantages par rapport aux méthodes recourant aux marqueurs fluorescents (Aslam *et al.*, 2023). En outre, on a utilisé la microscopie magnétique à l'aide de centres NV pour étudier les biomarqueurs de la malaria (Fescenko *et al.*, 2019) et déceler des protéines particulières chez les patients hospitalisés pour la COVID-19 (Atallah *et al.*, 2022). Les centres NV ont également servi à mesurer l'activité de neurones uniques, une application qui pourrait compléter et améliorer la MEG (Barry *et al.*, 2016). Ils peuvent aussi avoir des applications en spectroscopie RMN, où ils pourraient repousser les limites actuelles de la résolution spatiale de l'échelle millimétrique aux échelles nanométrique, tout en augmentant la résolution spectrale (Aslam *et al.*, 2023). Cela faciliterait l'analyse d'échantillons coûteux ou difficiles à synthétiser et permettrait « des études détaillées de la structure et de la fonction cellulaires, et pourrait servir pour la métabolomique et le diagnostic des maladies ». Les centres NV dans les nanodiamants peuvent également être utilisés en thermométrie, pour l'étude des « phénomènes biologiques liés à la température dans les cellules et les petits organismes » et assurer une détection à plus petite échelle et avec une plus grande stabilité que les sondes de température conventionnelles (Aslam *et al.*, 2023).

Communications

La QRC est importante pour le secteur de la santé en raison des risques qui pèsent sur les données des patients (IDQ, 2022). Elle pourrait être utilisée pour garantir le transfert sécurisé d'images médicales (Alowolodu *et al.*, 2018), pour la communication sécurisée avec des capteurs corporels sans fil (Devi et Kalaivani, 2021) et à d'autres fins sanitaires reposant sur l'Internet des objets. Toutefois, si

elle est susceptible d'être plus répandue à court terme, son adoption dans le secteur de la santé au Canada pourrait prendre un certain temps parce qu'une grande partie des données sur les patients y sont encore transmises par télécopieur (CIPVP, 2022; CBC News, 2023).

Fabrication

Les technologies quantiques auront probablement un impact sur l'industrie manufacturière dans un large éventail d'industries et de secteurs, dont beaucoup sont décrits à l'annexe B. Comme l'affirme Doyletech (2020) :

> *Bien qu'un domaine manufacturier ne puisse à lui seul justifier ou être en mesure de permettre une adoption importante des technologies quantiques, le secteur manufacturier, dans son ensemble, a la possibilité de considérablement influer sur l'économie canadienne grâce à ces technologies.*

Informatique

Dans l'industrie manufacturière, l'informatique quantique sera probablement employée dans des applications telles que la simulation quantique pour la conception de produits, la conception et la découverte de matériaux, ainsi que pour l'optimisation des chaînes d'approvisionnement, du routage et de la logistique, des processus de production et de la planification de la production (IBM, 2019; Doyletech Corporation, 2020; QUTAC *et al.*, 2021; Capgemini, 2022). Cela se produira probablement dans une multitude de secteurs, notamment en automobile et en aérospatiale, en chimie et en science des matériaux, en infrastructure durable (p. ex. pour les panneaux solaires) et en pharmacie (QUTAC *et al.*, 2021; Capgemini, 2022). En outre, les chercheurs étudient actuellement des applications générales de l'informatique quantique en fabrication industrielle; ils cherchent, par exemple, à démontrer comment le recuit quantique peut optimiser la planification de l'agencement des usines (Klar *et al.*, 2022) et comment l'informatique quantique peut être intégrée à la conception assistée par ordinateur classique (Wille *et al.*, 2018).

L'informatique quantique a un autre effet important sur l'industrie manufacturière : la nécessité de fabriquer le matériel et les composants des technologies quantiques. Dans de nombreux cas, cette technologie requiert des techniques et des installations spécialisées de nanofabrication et de microfabrication (Laucht *et al.*, 2021) (section 3.3). L'élaboration de procédés évolutifs de fabrication des qubits est un domaine de recherche et de développement constant (Gonzalez-Zalba *et al.*, 2019; Zwerver *et al.*, 2022).

De plus, l'AMQ pourrait un jour être utilisé pour améliorer la conception et le contrôle des ordinateurs quantiques eux-mêmes, rendant ainsi possible un « un cycle vertueux d'innovation similaire à celui en action dans l'informatique classique, dans lequel chaque génération de processeurs est ensuite utilisée pour concevoir les processeurs de la génération suivante » (Biamonte *et al.*, 2017).

Exploitation minière, pétrolière et gazière

Informatique

L'informatique quantique peut être appliquée dans le secteur minier pour optimiser les opérations et les processus, tels que l'utilisation et la distribution de l'énergie et de l'eau, et pour simuler des réactions chimiques complexes. Elle peut ainsi contribuer à réduire l'empreinte environnementale des activités minières et les responsabilités et les coûts de fermeture qui y sont associés. En outre, l'AMQ peut servir à accroître l'automatisation des opérations (CNRC, 2017a). Les ordinateurs quantiques ont également été utilisés pour optimiser la conception et le fonctionnement de l'exploitation minière à ciel ouvert, dans le but de minimiser les coûts et de maximiser l'efficacité, en fonction des contraintes géologiques, techniques et environnementales (Hindy *et al.*, 2021).

Détection

L'un des principaux avantages des capteurs quantiques dans le secteur extractif est leur capacité à détecter et à identifier les gisements souterrains sans forage ou excavation, grâce à l'utilisation de gravimètres et de magnétomètres quantiques qui peuvent procurer une précision bien supérieure à celle des outils de détection actuels (CNRC, 2017a; Crawford *et al.*, 2021). En outre, l'extrême précision des horloges atomiques pourrait améliorer les capteurs afin d'accroître la précision de l'exploration sous-marine et de la cartographie du terrain (CNRC, 2017a; Crawford *et al.*, 2021). Les magnétomètres quantiques peuvent également être utilisés pour analyser des échantillons géologiques avec une précision extrêmement élevée et aider les véhicules autonomes à naviguer dans des environnements miniers. Des capteurs contenant un dispositif appelé *réseau de Bragg* peuvent être utilisés pour surveiller la santé structurale des bassins de résidus (CNRC, 2017a). Enfin, l'imagerie quantique à méthodes optiques non linéaires — baptisée *géophotonique* dans le secteur minier (Andreana et Stolow, 2014) — offre une variété d'applications potentielles dans l'industrie minière, comme l'amélioration de la récupération d'éléments cibles à partir des matériaux extraits (CNRC, 2017a). Dans cette industrie, la détection quantique peut également aider à détecter les gisements de minéraux cruciaux et à atténuer les impacts environnementaux de l'extraction (ISDE, 2023d).

Produits pharmaceutiques

Informatique

L'informatique quantique devrait considérablement influer sur le secteur biopharmaceutique, et offrir des cas d'utilisation à tous les stades de la R-D. Ce secteur a été décrit comme l'un des plus prometteurs (et financièrement intéressants) en matière d'avantage quantique — avec la chimie et la science des matériaux — en particulier pour la simulation quantique (Langione *et al.*, 2019b). Les ordinateurs quantiques peuvent servir à optimiser la conception et la découverte de médicaments, et pour simuler les effets de différents composés sur leurs cibles biologiques; cela pourrait réduire le nombre et les coûts des essais cliniques (Langione *et al.*, 2019a) et les risques pour les patients. Toutefois, la découverte de médicaments devrait être un objectif à long terme, et nécessitera une plus grande maturité technologique. Les ordinateurs quantiques ont également été appliqués à des problèmes tels que l'optimisation des codons d'ARNm (Fox *et al.*, 2021), la prédiction du repliement des protéines (Robert *et al.*, 2021) et la conception de peptides pour créer des protéines (Mulligan *et al.*, 2019), et pourraient dans tous ces cas aider les chercheurs à comprendre des maladies et à créer des thérapies pour les traiter. Toutefois, ces applications n'en sont qu'à leurs débuts.

Détection

Outre leurs applications en chimie, en science des matériaux et en soins de santé, les centres NV de spectroscopie RMN peuvent être utilisés dans le secteur pharmaceutique. Par exemple, ils permettraient l'étude de la structure et de la dynamique des protéines de la membrane cellulaire, qui sont fréquemment ciblées par les traitements, ce qui faciliterait la découverte de médicaments (Aslam *et al.*, 2023).

Recherche scientifique

Informatique

L'informatique quantique a de nombreuses applications dans la recherche scientifique fondamentale, en particulier en physique. Par exemple, elle peut être utilisée pour simuler les effets des collisions de particules, qui relèvent de la mécanique quantique et sont difficiles à décrire à l'aide d'ordinateurs classiques (Nachman *et al.*, 2021). En outre, l'AMQ a été utilisé pour classifier les bosons de Higgs à un niveau comparable aux méthodes actuelles, tout en offrant des avantages par rapport à l'apprentissage machine classique lorsqu'il est appliqué à des ensembles de données d'entraînement plus petits (Mott *et al.*, 2017). En effet,

l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) a élaboré une stratégie et une feuille de route concernant les technologies quantiques qui, entre autres objectifs, visent à utiliser des ordinateurs quantiques pour analyser les données des supercollisionneurs et, éventuellement, à concevoir de nouveaux capteurs de particules (Bilton *et al.*, 2021).

Il est important de noter que les ordinateurs quantiques ont des applications dans un large éventail de disciplines scientifiques qui dépassent la physique; leur utilisation en chimie, en science des matériaux et en sciences de la vie est décrite à l'annexe B. Ils ont également été appliqués à des problèmes d'inversion (en gros, le calcul des causes à partir des effets observés) dans divers domaines, notamment en hydrologie (O'Malley, 2018) et en géophysique sismique (Souza *et al.*, 2022).

Détection

Les capteurs quantiques permettent d'effectuer des mesures extrêmement précises et pourraient servir à étudier des problèmes dans divers sous-domaines de la physique, notamment en relativité générale, en cosmologie, en mécanique quantique et en physique au-delà du modèle standard. Les capteurs quantiques spatiaux destinés à la recherche scientifique suscitent aussi un grand intérêt (Alonso *et al.*, 2022).

Espace

Les technologies quantiques spatiales ont de nombreuses applications dans différents secteurs, notamment les télécommunications, la défense et la recherche scientifique. Ces types de cas d'utilisation sont décrits dans les sections correspondantes. En revanche, la présente section se concentre sur les utilisations de la technologie quantique dans le secteur spatial proprement dit.

Informatique

La NASA a relevé divers cas d'utilisation de l'informatique quantique, notamment le diagnostic et la gestion des défaillances dans des systèmes d'ingénierie complexes tels que la Station spatiale internationale, l'optimisation de la planification des missions pour une utilisation optimale des ressources, telles que le temps et l'énergie, et l'optimisation de la synchronisation des observations satellitaires, des itinéraires de vol et des circuits d'atterrissage (NASA, 2017).

Détection

Le radar quantique spatial peut être utile pour détecter les objets et les débris proches de la Terre qui menacent les engins spatiaux, les satellites ou la planète

elle-même (Marco et Jeffrey, 2015). Les interféromètres atomiques et les horloges atomiques montés sur des satellites pourraient servir à vérifier les théories sur la matière noire et l'énergie noire, à détecter et mesurer avec précision les ondes gravitationnelles et vérifier l'intrication quantique sur des distances astronomiques (Alonso *et al.*, 2022). Au-delà de la physique, la détection quantique spatiale au moyen d'interféromètres atomiques, de gravimètres et d'horloges atomiques a des applications dans l'observation de la Terre, par exemple pour la détection de changements à grande échelle (Alonso *et al.*, 2022). Elle peut contribuer à améliorer la modélisation du climat et la surveillance des catastrophes naturelles, telles que les inondations, les tremblements de terre et l'activité volcanique. Elle peut également contribuer à atténuer les effets de ces événements (UKQTHST, s.d.-d).

Communications

La NASA travaille actuellement à un projet visant à tester un système de communication quantique à laser à bord de la Station spatiale internationale, qui permet de transmettre des renseignements d'un point à l'autre de la Terre (Oberhaus, 2020).

Télécommunications

Informatique

En télécommunications, l'informatique quantique est appliquée à des problèmes d'optimisation tels que « le placement, l'attribution de puissance et de fréquence de cellules qui se chevauchent dans les réseaux mobiles 4G/5G, la configuration des trajets et des longueurs d'onde sur les réseaux terrestres à fibre optique » (Ezratty, 2021) et la détermination des configurations optimales pour les satellites spatiaux afin de maximiser la zone de couverture (Bass *et al.*, 2018). Elle a également été appliquée aux problèmes de routage du trafic sans fil dans les réseaux d'antennes à entrées-sorties multiples (MIMO) pour la prise en charge de nombreux utilisateurs en même temps (Kim *et al.*, 2020). L'utilisation de l'informatique quantique pour résoudre les problèmes d'optimisation dans le secteur des télécommunications devrait se généraliser à court terme.

Détection

L'industrie des télécommunications pourrait finir par utiliser des horloges optiques quantiques pour synchroniser avec plus de précision les appareils d'un réseau de communication, ce qui permettrait de concevoir de nouvelles technologies qui ne sont pas réalisables actuellement, telles que les MIMO distribuées et les réseaux quantiques (Martin *et al.*, 2021).

Communications

Tous les modes de communication modernes — y compris Internet et les réseaux mobiles, ainsi que l'infrastructure par laquelle les communications sont acheminées — sont protégés par chiffrement. Par conséquent, de nouvelles mesures de sécurité telles que la QRC et le QKD devront être implantées afin de maintenir la sécurité actuelle une fois les ordinateurs quantiques tolérants aux pannes disponibles (ATIS, 2022). Les opérateurs de télécommunications peuvent utiliser le QKD pour des applications internes et externes, c'est-à-dire pour protéger la sécurité interne de l'infrastructure du réseau (p. ex. les connexions entre les centres de données) et le trafic de données des utilisateurs externes (Martin *et al.*, 2021). Le QKD terrestre par fibre optique a été testé dans les télécommunications dans quelques pays, notamment aux États-Unis (Weissberger, 2020) et au Royaume-Uni (BT Group, 2020).

En outre, les systèmes de communication sécurisés par satellite recourant au QKD suscitent un grand intérêt, d'autant plus que le QKD terrestre se heurte à des difficultés techniques qui limitent sa distance de transmission (Jennewein *et al.*, 2014). Comme il est indiqué à la section 2.1.3, plusieurs expériences de QKD satellitaire ont déjà été réalisées, comme la mission QEYSSat (IQC, s.d.-b). Le secteur des télécommunications devrait être l'un des premiers à adopter le QKD.

Transport et logistique

Informatique

L'informatique quantique a de nombreuses applications pour les problèmes d'optimisation dans les transports automobile, aérien et maritime. Dans le secteur du transport aérien, l'informatique quantique et les algorithmes d'inspiration quantique ont été appliqués à des problèmes d'optimisation tels que l'affectation des portes d'embarquement (Lobe et Stollenwer, 2019), l'affectation d'un avion à des ensembles de vols particuliers (Swayne, 2020; Vikstål *et al.*, 2020) et l'optimisation du chargement de passagers et de fret dans les avions (Ezratty, 2021). Dans le domaine du transport automobile, elle a été appliquée à l'optimisation des flux de circulation (Neukart *et al.*, 2017) et des feux de circulation (Inoue *et al.*, 2021). Des applications similaires ont été conçues pour le routage du trafic maritime (Harwood *et al.*, 2021) et les opérations portuaires (TradeArabia, 2021; D-Wave, 2022).

Les ordinateurs quantiques ont également d'importantes applications dans l'optimisation du secteur de la logistique. Ils devraient transformer ce secteur à court ou moyen terme (DHL International, 2020) et seront probablement employés pour l'optimisation dynamique des itinéraires — un problème très difficile, voire

impossible, à résoudre pour les ordinateurs classiques. Ils peuvent également être utilisés pour optimiser l'emballage simultané de marchandises et de colis, et pour bâtir des chaînes d'approvisionnement plus résistantes grâce à une réaffectation adaptative des biens en cas de perturbation (DHL International, 2020). La généralisation de l'informatique quantique pour résoudre les problèmes d'optimisation dans le secteur des transports est attendue à moyen terme.

L'utilisation d'ordinateurs quantiques en matière de simulation a également des applications dans le secteur des transports, pour la R-D et la fabrication aérospatiales et automobiles, notamment dans la simulation de la stabilité des véhicules, de l'aérodynamique et de la thermodynamique (Langione *et al.*, 2019b; Biondi *et al.*, 2021). Par exemple, Airbus a utilisé des ordinateurs quantiques à plusieurs fins, comme la conception d'avions (p. ex. pour la simulation de la mécanique des fluides, des équations différentielles ou l'optimisation du vol) et l'optimisation du chargement du fret (Feldman, 2019); Rolls-Royce a également utilisé la simulation quantique de la dynamique des fluides computationnelle pour la conception de moteurs à réaction (NVIDIA, 2023). De plus, l'informatique quantique peut aussi aider les chercheurs à concevoir de meilleures batteries pour les véhicules électriques en simulant les processus et les réactions chimiques, ce qui contribuera à accroître l'efficacité et à réduire l'usure (Ho *et al.*, 2018; Biondi *et al.*, 2021; Rice *et al.*, 2021). Toutefois, il est peu probable que la simulation quantique se répande dans le secteur des transports à court ou à moyen terme.

Détection

Les capteurs quantiques peuvent également trouver des applications dans le secteur des transports en améliorant (ou en remplaçant en fin de compte) les systèmes de navigation existants, tels que les systèmes de positionnement par satellites (GNSS) (UKQTHST, 2021c). De nouveaux systèmes de navigation basés sur la détection quantique pourraient être utilisés pour aider les véhicules autonomes à évoluer dans leur environnement (UKQTHST, s.d.-c). De même, les gravimètres et magnétomètres quantiques pourraient fournir des systèmes de navigation pour la navigation autonome et les véhicules sous-marins, qui sont confrontés à de fréquentes pertes de signaux satellites (UKQTHST, s.d.-b).

Communications

La QRC pourrait devenir une question importante dans l'industrie automobile, car le chiffrement RSA généralement utilisé dans les modules de commande électronique des véhicules pourrait être vulnérable aux attaques des ordinateurs quantiques (Wang et Stöttinger, 2020).

Annexe C Méthodologie des mesures de recherche

Les mesures de l'activité de recherche — y compris de l'activité de recherche globale, de la croissance de l'activité de recherche, du degré de collaboration internationale et de la part de la recherche fréquemment citée — sont tirées des données recueillies dans la base Web of Science Core Collection selon les critères d'inclusion de Parker *et al.* (2022). Cette base de données est composée de revues examinées par les pairs, de livres et d'actes de conférences édités en fonction de leur qualité et de leur influence (Clarivate, s.d.). Une stratégie de recherche commune a été employée pour chaque application (informatique, communications, détection) au moyen de son propre ensemble de termes de recherche clés (tableau C.1). Les entrées ont ensuite été filtrées par sélection des articles et des actes de conférence (mais pas des articles de revue et des livres). Idéalement, cela permettait de supprimer les entrées ne relevant pas du domaine de chaque application, ce qui laissait trois ensembles d'entrées pour chaque application, lesquelles pouvaient être affinées en fonction de leur date de publication, des détails sur l'affiliation de l'auteur et de la revue.

Pour quantifier le degré de collaboration internationale, les entrées ont été affinées en fonction du pays d'affiliation des auteurs. Pour chaque pays, un sous-ensemble d'entrées comportant au moins un auteur affilié au pays choisi a été défini. Dans ce sous-ensemble, le nombre d'entrées comportant au moins un coauteur d'un autre pays a été enregistré. Cette méthode a également été appliquée aux coauteurs spécifiquement affiliés à la Russie ou à la Chine.

Une méthode systématique d'identification des recherches très influentes a été suivie, en prenant comme critère le nombre total de citations pour une entrée donnée (c.-à-d. la part des articles fréquemment cités). Comme les entrées les plus anciennes ont pris plus de temps à trouver, lire et citer, elles n'ont été comparées les unes aux autres que pour leur année de publication. Les entrées « fréquemment citées » pour une année ont été définies comme celles se situant dans le 90e centile lorsqu'elles étaient classées en fonction du nombre de citations (les citations pouvaient être faites n'importe quelle année). Ce sous-ensemble a été affiné pour isoler les entrées dont au moins un auteur était affilié à un pays donné. Par exemple, en 2016, 2,9 % des entrées dans le 90e centile des citations sur les communications quantiques (sous-ensemble Communications) avaient au moins un auteur affilié au Canada.

Tableau C.1 Termes de recherche utilisés pour déterminer les publications et les actes de conférence dans la base de données Web of Science Core Collection en fonction de la technologie

Technologie	Termes de recherche
Informatique	« adiabatic quantum comput* » ou « amplitude amplification » ou « analog quantum simulation* » ou « blind quantum comput* » ou « boson sampling » ou « bqp » ou « bqp-complete » ou « charge qubit* » ou « circuit quantum electrodynamics » ou « cluster state* » ou « d-wave » ou « delegated quantum comput* » ou « deutsch-jozsa algorithm* » ou « distributed quantum comput* » ou « duality quantum comput* » ou « durr-hoyer algorithm* » ou « fault-tolerant quantum comput* » ou « flux qubit* » ou « geometric quantum comput* » ou « grover algorithm* » ou « grover's algorithm* » ou « grover's quantum search algorithm* » ou « hadamard gate* » ou « hhl algorithm* » ou « holonomic quantum comput* » ou « linear optical quantum comput* » ou « logical qubit* » ou « measurement-based quantum comput* » ou « nisq » ou « nmr quantum comput* » ou « noisy intermediate scale quantum » ou « one-way quantum comput* » ou « optical comput* » ou « qaoa » ou « quantum advantage » ou « quantum algorithm* » ou « quantum annealing » ou « quantum approximate optimization algorithm* » ou « quantum automata » ou « quantum cellular automata » ou « quantum circuit* » ou « quantum compilation » ou « quantum compiler* » ou « quantum complexity » ou « quantum complexity theory » ou « quantum comput* » ou « quantum computation and information » ou « quantum computation architectures and implementation* » ou « quantum computational complexity » ou « quantum computational logic* » ou « quantum computer simulation* » ou « quantum computing simulation* » ou « quantum cost* » ou « quantum counting algorithm* » ou « quantum decryption » ou « quantum error correction » ou « quantum evolutionary algorithm* » ou « quantum finite automata » ou « quantum fourier transform* » ou « quantum game* » ou « quantum gate* » ou « quantum genetic algorithm* » ou « quantum image proces* » ou « quantum information proces* » ou « quantum knot* » ou « quantum lattice gas automata » ou « quantum logic gate* » ou « quantum logic synthesis » ou « quantum logic* » ou « quantum machine learning » ou « quantum neural network* » ou « quantum neuron* » ou « quantum optimization » ou « quantum parallelism » ou « quantum phase estimation algorithm* » ou « quantum private comparison » ou « quantum programming » ou « quantum programming languages » ou « quantum query algorithm* » ou « quantum query complexity » ou « quantum recommendation » ou « quantum register* » ou « quantum search algorithm* » ou « quantum search* » ou « quantum simulation* » ou « quantum software » ou « quantum speedup » ou « quantum supremacy » ou « quantum turing machine* » ou « quantum verification » ou « quantum volume* » ou « quantum walk* » ou « shor's algorithm » ou « superconducting quantum comput* » ou « superconducting qubit* » ou « surface code » ou « topological quantum comput* » ou « topological qubit* » ou « universal quantum comput* » ou « variational quantum eigensolver » ou « variational quantum unsampling » ou « vqe »

Technologie	Termes de recherche
Communications	« bell inequalities » ou « bell inequality » ou « bell state* » ou « bell state measurement » ou « bell states » ou « controlled quantum communication* » ou « entanglement concentration* » ou « entanglement distillation* » ou « entanglement distribution » ou « entanglement swap* » ou « epr pair* » ou « free-space quantum communication* » ou « heralded single photon source* » ou « heralded single-photon source* » ou « long-distance quantum communication* » ou « qber » ou « quantum bit commitment » ou « quantum bit error rate* » ou « quantum channel* » ou « quantum communication* » ou « quantum communication channel* » ou « quantum communication complexity » ou « quantum communication network* » ou « quantum communications » ou « quantum dense coding* » ou « quantum dialogue » ou « quantum direct communication* » ou « quantum discord » ou « quantum internet » ou « quantum key distribution* » ou « quantum network* » ou « quantum networks » ou « quantum private quer* » ou « quantum repeater* » ou « quantum repeaters » ou « quantum router* » ou « quantum sealed-bid auction* » ou « quantum shannon theor* » ou « quantum state sharing » ou « quantum teleportation » ou « remote state preparation* » ou « superdense coding* » ou « the bell state measurement* » ou « quantum cryptogr* » ou « semi-quantum cryptogr* » ou « quantum secret sharing » ou « controlled quantum secure direct communication* » ou « quantum secure direct communication* » ou « deterministic secret quantum communication* » ou « deterministic secure quantum communication* » ou « quantum signature* » ou « quantum blind signature* » ou « quantum private comparison* » ou « quantum encryp* » ou « quantum authentication » ou « quantum identity authentication* » ou « secure quantum communication* » ou « arbitrated quantum signature* » ou « quantum secure communication* » ou « qsdc » ou « quantum communication security » ou « y-00 protocol* » ou « quantum steganogra* » ou « continuous variable quantum key distribution* » ou « continuous-variable quantum key distribution* » ou « quantum key distribution* » ou « measurement-device-independent quantum key distribution* » ou « qkd » ou « qkd network* » ou « b92 » ou « b92 protocol* » ou « bb84 » ou « bb84 protocol* » ou « decoy state* » ou « quantum key agreement » ou « measurement device independent » ou « measurement-device-independent » ou « semi-quantum key distribution* » ou « decoy state protocol* » ou « decoy states* » ou « quantum one-time pad* » ou « quantum key distribution network* » ou « quantum key distribution protocol* » ou « photon number splitting attack* »
Détection	« quantum sensing » ou « quantum sensor* » ou « quantum metrology » ou « atom interferometry » ou « n00n state* » ou « atomic sensor* » ou « quantum gyroscope* » ou « quantum accelerometer* » ou « quantum ins » ou « quantum imu » ou « quantum magnetometer* » ou « quantum rf receiver* » ou « cold-atom interferometer* » ou « cold-atom gas interferometer* » ou « heisenberg limit* » ou « standard quantum limit* » ou « quantum inertial sens* » ou « quantum gravimeter* » ou « quantum electrometer* » ou « quantum radio* » ou « quantum receiver* » ou « rydberg atom sensor* » ou « vapor-cell sensor* » ou « defect-based sensor* » ou « scanning quantum dot microsco* » ou « qubit detector* » ou « quantum detector* » ou « quantum detector tomography » ou « quantum tomography » ou « quantum state tomography » ou « microwave bolometer* » ou « microwave bolometer* » ou « quantum illumination » ou « ghost imaging » ou « quantum dot imaging » ou « quantum imaging » ou « quantum radar* »

Source : Parker *et al.* (2022)

Annexe D Critères de classification des brevets et données supplémentaires

Les sujets des brevets ont été triés par concept selon la description d'Aboy *et al.* (2022). Dans le tableau D.1, « TAC » renvoie aux brevets dont les mots-clés apparaissent dans le titre, le résumé ou le contenu. Les codes de recherche (p. ex. CPC:H01L) sont décrits de la façon suivante :

> *Données sur les demandes et octrois de brevets de l'USPTO et de l'OEB de 2001-01-01 à 2021-12-31 (recherche effectuée par MA le 2022-02-18). La catégorie CPC G06N10/00 est consacrée à l'« informatique quantique, c'est-à-dire au traitement de l'information reposant sur des phénomènes mécaniques quantiques »; B82Y20/00, à la « nano-optique, par exemple à l'optique quantique »; B82Y10/00, à la « nanotechnologie pour le traitement, le stockage ou la transmission de l'information, par exemple à l'informatique quantique ou à la logique à électron unique »; H04L9/0852, à la « cryptographie quantique (systèmes de transmission utilisant les ondes électromagnétiques autres que les ondes radio) »; H04B10, aux « systèmes de transmission utilisant des ondes électromagnétiques autres que les ondes radio, par exemple les ondes infrarouges, visibles ou ultraviolettes, ou le rayonnement corpusculaire, par exemple la communication quantique »; H01L, aux « dispositifs semiconducteurs ou aux dispositifs électriques à semiconducteur ».*

Tableau D.1 Technologies quantiques brevetées aux États-Unis (USPTO) et en Europe (OEB) par terme de recherche, 2001–2021

N°	Concept de recherche	Terme de recherche	Demandes	Octroyés
S1	Brevets liés au domaine quantique	« quantum » (et mots-clés apparentés)	236 642	178 033
S2	Brevets quantiques (TAC)	S1 et TAC : quantum	34 402	20 581
S3	Revendications quantiques	ACLM : quantum	30 385	18 696
S4	Revendications indépendantes du quantique	ICLM : quantum	14 672	10 318
S5	Dispositifs quantiques	S2 et CPC : H01L	14 243	8 965
S6	Nanostructures ou optique quantique	S2 et CPC : B82Y20/00	4 917	3 282
S7	Traitement de l'information quantique	S2 et CPC : B82Y10/00	3 331	2 057
S8	Informatique quantique	S2 et CPC : G06N10/00	3 042	1 603
S9	Cryptographie quantique	S2 et CPC : H04L9/0852,55,58	1 219	736
S10	Communications quantiques	S2 et CPC : H04B10	1 057	632

Source des données : Aboy *et al.* (2022)

Tableau D.2 Principaux cessionnaires de brevets de l'USPTO et de l'OEB, 2001–2021, classés selon les brevets obtenus

Cessionnaire	Brevets
IBM	254
D WAVE SYSTEMS	**183**
NORTHROP GRUMMAN	120
MICROSOFT CORP.	111
ALPHABET INC.	59
RIGETTI & CO INC.	53
TOSHIBA CORP.	37
INTEL CORP.	32
HONEYWELL INT INC.	26
US GOVERNMENT	26
HP ENTERPRISE	23
NEWSOUTH INNOVATIONS	22
MASS INST OF TECH	20
EQUAL1LABS INC.	16
HITACHI LTD	15
JAPAN SCIENCE & TECH AG	15
QUANTUM MACHINES	15
1QB INFORMATION TECH	**14**
ACCENTURE PUBLIC LTD	12
IONQ INC.	12
NOKIA CORP.	12
BANK OF AMERICA	11
ELEMENT SIX SA	11
GOV. OF ABU DHABI	11
UNIV OXFORD	11
YALE UNIV	10

Cessionnaire	Brevets
COMMISSARIAT ATOMIQUE	9
RAYTHEON TECH CORP.	9
SEEQC INC.	9
STMICROELECTRONICS	9
HARVARD COLLEGE	8
MAGIQ TECH INC.	8
CALIFORNIA INST OF TECH	7
HP INC.	7
NEC CORP.	7
STANFORD UNIV	7
UNIV SYS OF MARYLAND	7
UNIV WISCONSIN WARF	7
KYNDRYL INC.	6
MITRE CORP.	6
PARALLEL INVESTMENT	6
QC WARE CORP.	6
SEOUL SILIP UNIV	6
TECHNISCHE UNIV DELFT	6
UNIV JOHNS HOPKINS	6
UNIVERSAL RES KK	6
WELLS FARGO BANK	6
CORNING CORP.	5
DARTMOUTH COLLEGE	5
LOCKHEED MARTIN CORP.	5
PHOENIX CO OF CHICAGO	5
QUANTUM VALLEY INVEST	**5**

Source des données : Aboy *et al.* (2022)

Les organisations canadiennes sont indiquées en gras.

Annexe E Critères de transfert de technologie pour certaines universités canadiennes et américaines

Tableau E.1 Critères de transfert de technologie pour certaines universités canadiennes (2020) et universités et collèges américains (2022) dotés de programmes quantiques remarquables, normalisés selon les dépenses de recherche

Établissement	Équivalents temps plein chargés des licences	Licences totales	Options totales	Revenu brut de licence	Divulgations	Nouvelles demandes de brevet	Entreprises en démarrage	Licences et options actives	Brevets accordés
par 100 M$CA									
CANADA									
Université de Calgary	1,27	5,59	0,25	0,21	33,06	4,32	4,58	38,65	2,54
Université de la Colombie-Britannique	1,19	9,62	3,43	5,65	21,60	10,54	1,84	77,86	3,03
Université McMaster (et Hamilton Health Science et St.Joseph's Healthcare Hamilton)	3,32	40,07	0,69	1,48	30,40	15,89	3,11	59,41	5,18
Université de Toronto (à l'exclusion des hôpitaux affiliés)	1,48	5,61	0,99	9,99	20,12	13,19	2,31	54,75	7,26
Université de Waterloo	2,65	1,63	0,00	0,04	8,97	8,97	5,71	53,84	3,26
Université McGill	1,39	3,19	2,59	0,31	25,70	12,95	2,79	40,24	3,19
Université de Sherbrooke (TransferTech Sherbrooke)	1,32	2,20	2,64	1,89	12,75	19,79	1,32	40,90	2,20
Université de Victoria	2,57	2,57	0,00	0,31	35,07	10,27	2,57	26,52	4,28
Université Queen's	0,53	3,74	1,07	0,42	22,95	4,80	0,53	29,89	7,47

Établissement	Équivalents temps plein chargés des licences	Licences totales	Options totales	Revenu brut de licence	Divulgations	Nouvelles demandes de brevet	Entreprises en démarrage	Licences et options actives	Brevets accordés
par 100 M$CA									
ÉTATS-UNIS									
Laboratoire Lincoln MIT	1,74	6,88	2,40	5,83	49,01	25,91	1,60	94,62	29,18
Université de Californie à Berkley (réseau de la Californie)	1,50	4,78	1,12	2,26	27,22	15,13	1,34	0,00	2,34
Université de l'Illinois à Urbana-Champaign	1,57	8,75	2,81	4,93	38,33	16,20	0,86	72,02	11,12
Joint Quantum Institute de l'Université du Maryland (réseau du Maryland)	1,15	6,14	2,74	0,32	34,32	21,93	2,41	58,11	14,69
Centre des sciences et de la technologie de l'information quantique de l'Université de Californie du Sud (CQIST)	1,57	6,95	0,79	0,78	32,67	12,73	1,44	48,94	9,05
California Institute of Technology	2,51	10,55	3,77	1,61	47,24	46,99	2,01	121,11	41,96
Université Stanford	1,89	9,28	3,09	8,89	35,83	29,49	1,73	98,89	16,90
Université Harvard	1,51	13,18	7,42	14,56	52,60	24,72	3,71	161,91	26,50
Université Carnegie Mellon	3,03	15,34	0,70	4,93	120,96	102,13	1,39	215,07	18,13

Source des données : AUTM (2022a, 2022b)

Selon le taux de change annuel de la Banque du Canada pour 2021 (1 $US = 1,2535 $CA) (Banque du Canada, s.d.).

Annexe F Écosystème quantique et Stratégie quantique nationale du Canada

Tableau F.1 Financement et programmes décrits dans la Stratégie quantique nationale du Canada

Fournisseur	Programme	Montant (M$)	Durée	Détails
Recherche				
SQN				
CRSNG	Subventions Alliance (toutes)	132,5	7 ans	
	Quantique	62,4		Chercheurs universitaires collaborant avec des partenaires privés, publics et sans but lucratif. Les subventions s'étendent de 50 000 à 300 000 $ sur une période de 1 à 5 ans.
	Quantique international	29,7		Chercheurs universitaires multipliant les collaborations de recherche internationales. Subventions jusqu'à 25 000 $ pour 1 an.
	Consortium quantique	40,4		Collaborations nationales de grande ampleur en matière de recherche entre pôles régionaux. Les subventions vont de 500 000 $ à 1 M$ par an pendant 3 à 5 ans.
CNRC	Initiative de recherche et de développement en quantique	9	6 ans	Établissement de partenariats entre le gouvernement, les universités et l'industrie en appui aux priorités de la SQN.
Autres programmes				
Trois organismes	Chaires de recherche Canada 150			
	Chaires d'excellence en recherche du Canada			
	Fonds d'excellence en recherche Apogée Canada			
	Fonds Nouvelles frontières en recherche			

Fournisseur	Programme	Montant (M$)	Durée	Détails
CRSNG	Subventions à la découverte			Programmes permanents avec des objectifs à long terme.
	CRSNG-NSF — Collaboration dans le domaine de la science quantique et de l'IA			Protocole d'entente sur la coopération en recherche.
FCI	Fonds d'innovation			Investissement dans l'infrastructure dans tous les domaines de recherche.
	Fonds des leaders John R. Evans			Attraction et rétention des talents.
Ministères fédéraux	Programme canadien de l'innovation à l'international (PCII)			Affaires mondiales Canada, dans le but d'aider les entreprises canadiennes à poursuivre des collaborations internationales en R-D ayant un potentiel de commercialisation.
	Innovation pour la défense, l'excellence et la sécurité (IDEeS)			Appel à propositions du ministère de la Défense nationale et de Recherche et développement pour la défense Canada mettant l'accent sur les capteurs.
Tiers	Institut Perimeter de physique théorique			
Talent				
SQN				
CRSNG	FONCER	5,4	6 ans	Soutient la formation d'équipes de PHQ (étudiants et boursiers postdoctoraux). La valeur et la durée des subventions varient : jusqu'à 150 000 $ la première année, jusqu'à 300 000 $ les 5 années suivantes et jusqu'à un maximum de 1,65 M$ sur 6 ans.
Mitacs		40,0	6 ans	Soutien à l'attraction, la formation, la rétention et le déploiement de PHQ au moyen de stages et du développement de compétences professionnelles.

Fournisseur	Programme	Montant (M$)	Durée	Détails
		Autres programmes		
Programmes d'Immigration, Réfugiés et Citoyenneté Canada	Catégorie de l'expérience canadienne			Travailleurs étrangers temporaires et étudiants étrangers, actuels et anciens, exerçant des professions hautement qualifiées et maîtrisant les langues officielles.
	Programme des travailleurs de métiers spécialisés (fédéral)			Les travailleurs étrangers exerçant certains métiers hautement qualifiés peuvent être admissibles à la résidence permanente.
	Programme des travailleurs qualifiés (fédéral)			Certains travailleurs hautement qualifiés disposant d'un capital humain élevé.
	Stratégie en matière de compétences mondiales			Accélération des délais de traitement des demandes, exemptions de permis de travail et autres pour aider les employeurs à trouver rapidement des travailleurs hautement qualifiés.
	Programme des candidats des provinces			Permet aux provinces et aux territoires de répondre à leurs besoins particuliers en matière de développement économique.
Autres programmes fédéraux	Volet des talents mondiaux			Emploi et Développement social Canada (dans le cadre du programme Travailleurs étrangers temporaires) aide les entreprises innovantes à pourvoir les postes hautement qualifiés et en demande figurant sur la liste des professions exigeant des talents mondiaux.
	Bourses postdoctorales/ Programme de recherche postdoctorale			CNRC et autres; les scientifiques en début de carrière ont accès à des installations de premier plan et ont la possibilité de travailler au sein d'équipes de recherche au Canada (les mandats de 2 ans sont courants).
	Programme des adjoints de recherche			Commission de la fonction publique du Canada; postes à temps plein ou à temps partiel pour des étudiants qui travailleront en tant qu'adjoint de recherche auprès du gouvernement du Canada.

Fournisseur	Programme	Montant (M$)	Durée	Détails
Commercialisation				
SQN				
ISDE	Grappes d'innovation mondiales	14,0	7 ans	Soutient le développement de zones à forte densité d'entreprises, d'établissements universitaires et d'organismes sans but lucratif.
	Solutions innovantes Canada	35,0	7 ans	Facilite la mise en relation des clients du gouvernement du Canada avec les PME canadiennes en phase initiale de recherche ou en phase finale d'essai.
CNRC	Programmes Défi	50	7 ans	Soutient deux programmes Défis — Internet des objets : capteurs quantiques et Informatique quantique appliquée.
Soutien des agences de développement régional	Développement économique Canada pour les régions du Québec	23,3	7 ans	Financement et aide aux PME et aux organismes sans but lucratif dans tout le Québec.
	Agence fédérale de développement économique pour le Sud de l'Ontario	23,3	7 ans	Financement et aide aux PME et aux organismes sans but lucratif dans tout le Sud de l'Ontario.
	Développement économique Canada pour les Prairies	9,4	7 ans	Financement et aide aux PME et aux organismes sans but lucratif dans toute l'Alberta, la Saskatchewan et le Manitoba.
	Développement économique Canada pour le Pacifique	14	7 ans	Financement et aide aux PME et aux organismes sans but lucratif dans toute la Colombie-Britannique.

Fournisseur	Programme	Montant (M$)	Durée	Détails
		Autres programmes		
Ministères et organismes fédéraux	Service des délégués commerciaux du Canada			Affaires mondiales Canada — développement des affaires internationales et mise en réseau.
	Programme Défi « Réseaux sécurisés à haut débit »			CNRC — projets de R-D collaboratifs sur les communications quantiques.
	PARI			CNRC — conseils, contacts et financement à l'intention des PME afin d'accroître leur capacité d'innovation.
	Programme de développement des technologies spatiales			Agence spatiale canadienne — technologies spatiales et innovation pour l'industrie spatiale canadienne.
	Mission QEYSSat (*Quantum Encryption and Science Satellite*, satellite scientifique et de cryptage quantique)			Agence spatiale canadienne — démonstration du procédé d'échange quantique de clés.
	Fonds stratégique pour l'innovation			ISDE — projets à grande échelle, transformateurs et collaboratifs ciblant l'industrie.
	Fonds pour les technologies profondes			BDC — entreprises travaillant dans le domaine des technologies profondes, dont les technologies quantiques.

Source : ISDE (2023d)

Références

Aaronson, S., 2021. *What Makes Quantum Computing So Hard to Explain?* Adresse: https://www.quantamagazine.org/why-is-quantum-computing-so-hard-to-explain-20210608/# (consulté en décembre 2022).

ABC – L'Association des banquiers canadiens, 2022a. *Fiche info - Banques et cybersécurité*. Adresse: https://cba.ca/banks-and-cyber-security?l=fr (consulté en février 2023).

ABC – L'Association des banquiers canadiens, 2022b. *Fiche info - Protéger les Canadiens de la fraude*. Adresse: https://cba.ca/protecting-canadians-from-fraud?l=fr (consulté en février 2023).

Aboy, M., T. Minssen, et M. Kop, 2022. « Mapping the patent landscape of quantum technologies: Patenting trends, innovation and policy implications », *International Review of Intellectual Property and Competition Law*, vol. 53, n°6, p. 853-882.

Abramson, B. et K. Bester, 2022. *How to Make Telecoms More Resilient? For Starters, Better Internal Controls*. Adresse: https://www.cigionline.org/articles/how-to-make-telecoms-more-resilient-for-starters-better-internal-controls/ (consulté en novembre 2022).

Acar, E. et İ. Yilmaz, 2020. « COVID-19 detection on IBM quantum computer with classical-quantum transfer learning », *medRxiv*, (Preprint), doi: https://doi.org/10.1101/2020.11.07.20227306.

ACLC – Association canadienne des libertés civiles, 2022. *Lettre de préoccupation conjointe concernant le projet de loi C-26*. Adresse: https://ccla.org/fr/privacy/joint-letter-of-concern-regarding-bill-c-26/ (consulté en novembre 2022).

Adams, J., 2021. *Canada Should Support Diversity in STEM to Encourage Innovative Research*. Adresse: https://theconversation.com/canada-should-support-diversity-in-stem-to-encourage-innovative-research-146946 (consulté en mai 2022).

Aiello, C. D., D. D. Awschalom, H. Bernien, T. Brower, K. R. Brown, T. A. Brun, … B. M. Zwickl, 2021. « Achieving a quantum smart workforce », *Quantum Science and Technology*, vol. 6, n°3, p. 030501.

Aiello, R., 2022. *Privacy Committee to Study RCMP Use of Spyware Tools*. Adresse: https://www.ctvnews.ca/politics/privacy-committee-to-study-rcmp-use-of-spyware-tools-1.6003077 (consulté en août 2022).

Ajagekar, A. et F. You, 2019. « Quantum computing for energy systems optimization: Challenges and opportunities », *Energy*, vol. 179, p. 76-89.

Alagic, G., D. Apon, D. Cooper, Q. Dang, T. Dang, J. Kelsey, … D. Smith-Tone, 2022. *Status Report on the Third Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process*, Gaithersburg, MD, National Institute of Standards and Technology.

Albert, D. Z., 1992. *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge, MA, Harvard University Press.

Aldrich, J., 2023. *Company to Drill for Helium Over Vast Tract in Southern Alberta*. Adresse: https://calgaryherald.com/news/local-news/company-to-drill-for-helium-over-vast-tract-in-southern-alberta (consulté en juillet 2023).

Alfieri, A., S. B. Anantharaman, H. Zhang, et D. Jariwala, 2022. « Nanomaterials for quantum information science and engineering », *Advanced Materials*, doi:10.1002/adma.202109621.

Allen, J. et Y. Liu, 2007. *A Note on Contestability in the Canadian Banking Industry*, Ottawa, ON, Banque du Canada.

Allert, R. D., K. D. Briegel et D. B. Bucher, 2022. « Advances in nano- and microscale NMR spectroscopy using diamond quantum sensors », *Chemical Communications*, vol. 58, n°59, p. 8165-8181.

Almosallam, I., 2022. *Quantum Computing Will Change the Cyber Landscape, Here's Why We Need Proper Governance*. Adresse: https://www.weforum.org/agenda/2022/02/quantum-computing-governance-regulation/ (consulté en avril 2023).

Alonso, I., C. Alpigiani, B. Altschul, H. Araújo, G. Arduini, J. Arlt, … E. Zupanič, 2022. « Cold atoms in space: Community workshop summary and proposed road-map », *EPJ Quantum Technology*, vol. 9, n°30.

Alowolodu, O. D., G. K. Adelaja, B. K. Alese et O. C. Olayemi, 2018. « Medical image security using quantum cryptography », *Issues in Informing Science and Information Technology*, vol. 15, p. 57-67.

Alper, A., 2022. *Exclusive: Russia's Attack on Ukraine Halts Half of World's Neon Output for Chips*. Adresse: https://www.reuters.com/technology/exclusive-ukraine-halts-half-worlds-neon-output-chips-clouding-outlook-2022-03-11/ (consulté en décembre 2022).

Altepeter, J., s.d. *Quantum Benchmarking (QB)*. Adresse: https://www.darpa.mil/program/quantum-benchmarking#:~:text=The%20Quantum%20Benchmarking%20program%20will,towards%20specific%2C%20transformational%20computational%20challenges. (consulté en septembre 2022).

AMC – Affaires mondiales Canada, 2018. *Résumé du chapitre sur les obstacles techniques au commerce*. Adresse: https://www.international.gc.ca/trade-commerce/trade-agreements-accords-commerciaux/agr-acc/cusma-aceum/technical_barriers_trade-obstacles_techniques_commerce.aspx?lang=fra (consulté en février 2023).

AMC – Affaires mondiales Canada, 2020. *Guide de la Liste des marchandises et technologies d'exportation contrôlée du Canada*, Ottawa, ON, AMC.

Anand, A. I. et A. Green, 2012. « Regulating financial institutions: The value of opacity », *McGill Law Journal*, vol. 57, n°3, p. 400-427.

Anderman, S. D., 2007. « The Competition Law/IP 'Interface': An Introductory Note », dans Anderman, S. D. (réd.), *The Interface Between Intellectual Property Rights and Competition Policy*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.

Andreana, M. et A. Stolow, 2014. « Multimodal nonlinear optical microscopy: From biophotonics to geophotonics », *Optics and Photonics News*, vol. 25, n°3, p. 42-49.

ANL – Argonne National Laboratory, 2022. *A Roadmap for Quantum Interconnects*, Chicago, IL, United States Department of Energy.

ANSSI – Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information, 2022. *Avis scientifique et technique de l'ANSSI sur la migration vers la cryptographie post-quantique*, Paris, France, ANSSI.

ANSSI – Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information, s.d. *Technical Position Paper: QKD v2.1, Should Quantum Key Distribution be Used for Secure Communications?*, Paris, France, ANSSI.

Anyon Systems Inc., 2017. *Anyon Helping Google Scale Up*. Adresse: https://www.anyonsys.com/news/anyon-helps-google-scale-up (consulté en avril 2023).

Arute, F., K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, … J. M. Martinis, 2019. « Quantum supremacy using a programmable superconducting processor », *Nature*, vol. 574, n°7779, p. 505-510.

ASC – Agence spatiale canadienne, 2020. *La mission QEYSSat*. Adresse: https://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/qeyssat.asp (consulté en septembre 2022).

Aslam, N., H. Zhou, E. K. Urbach, M. J. Turner, R. L. Walsworth, M. D. Lukin et H. Park, 2023. « Quantum sensors for biomedical applications », *Nature Reviews Physics*, vol. 5, n°3, p. 157-169.

Aspect, A., J. Dalibard, et G. Roger, 1982. « Experimental test of Bell›s inequalities using time-varying analyzers », *Physical Review Letters*, vol. 49, n°25, p. 1804-1807.

Asselin, R. et S. Speer, 2019. *A New North Star: Canadian Competitiveness in an Intangibles Economy*, Ottawa,ON, Forum des politiques publiques.

Atallah, J., D. Archambault, J. D. Randall, A. Shepro, L. E. Styskal, D. R. Glenn, … M. K. Mansour, 2022. « Rapid quantum magnetic IL-6 point-of-care assay in patients hospitalized with COVID-19 », *Diagnostics*, vol. 12, n°5.

ATIS – Alliance for Telecommunications Industry Solutions, 2022. *Preparing Communications Networks for the Quantum Future*, Washington, D.C., ATIS.

AUTM, 2022a. *AUTM 2020 Canadian Licensing Activity Survey: A Survey Report of Technology Licensing and Related Activity for Canadian Academic and Nonprofit Institutions*, Washington, D.C., AUTM.

AUTM, 2022b. *AUTM 2022 Licensing Activity Survey: A Survey of Technology Licensing Related Activity for US Academic and Nonprofit Research Institutions*, Washington, D.C., AUTM.

Baglieri, D., F. Baldi, et C. L. Tucci, 2018. « University technology transfer office business models: One size does *not* fit all », *Technovation*, vol. 76-77, p. 51-63.

Bania, T. M., R. T. Rood, et D. S. Balser, 2002. « The cosmological density of baryons from observations of $^3He^+$ in the Milky Way », *Nature*, vol. 415, n°6867, p. 54-57.

Banque du Canada, s.d. Taux de change annuels. Adresse: https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/taux-de-change-moyens-annuels/ (consulté en août 2023).

Barrett, J. A., 2019. *The Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*. Oxford, Royaume-Uni, Oxford University Press.

Barry, J. F., M. J. Turner, J. M. Schloss, D. R. Glenn, Y. Song, M. D. Lukin, … R. L. Walsworth, 2016. « Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond », *PNAS*, vol. 113, n°49, p. 14133-14138.

Bass, G., C. Tomlin, V. Kumar, P. Rihaczek et J. Dulny III, 2018. « Heterogeneous quantum computing for satellite constellation optimization: Solving the weighted *k*-clique problem », *Quantum Science and Technology*, vol. 3, n°2.

Batra, G., M. Gschwendtner, I. Ostojic, A. Queirolo, H. Soller, et L. Wester, 2021. *Shaping the Long Race in Quantum Communication and Quantum Sensing*, New York, NY, McKinsey & Company.

Bauer, B., S. Bravyi, M. Motta et G. K.-L. Chan, 2019. *Report on the NSF Workshop on Enabling the Quantum Leap: Quantum Algorithms for Chemistry and Materials*, Alexandria, VA, National Science Foundation.

BDC – Banque de développement du Canada, 2022. *Fonds pour les technologies profondes*. Adresse: https://www.bdc.ca/fr/bdc-capital/capital-risque/fonds/fonds-pour-technologies-profondes (consulté en mai 2022).

Bédard-Maltais, P.-O., 2017. *Industrie 4.0: la nouvelle révolution industrielle. Les fabricants canadiens sont-ils prêts?*, Ottawa, ON, Banque de développement du Canada.

Bednar, V., K. Bester, B. Edwards et D. Liang, 2022. *Present and Potential Futures of Competition in Canada's Banking and Payments Sector*, Hamilton, ON, Université McMaster.

Beitler, R. J., 2020. *Advisory Committee Charter*, Washington, D.C., United States Department of Energy.

Belitski, M., A. Aginskaja et R. Marozau, 2019. « Commercializing university research in transition economies: Technology transfer offices or direct industrial funding? », *Research Policy*, vol. 48, n°3, p. 601-615.

Benioff, P., 1980. « The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines », *Journal of Statistical Physics*, vol. 22, n°5, p. 563-591.

Bennett, C. H. et G. Brassard, 2014. « Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing », *Theoretical Computer Science*, vol. 560, p. 7-11.

Bereskin & Parr LLP, s.d. *Quantum Technologies*. Adresse: https://www.bereskinparr.com/practicearea/quantum-technologies (consulté en septembre 2022).

Bessen, J., 2022a. *The New Goliaths: How Corporations Use Software to Dominate Industries, Kill Innovation, and Undermine Regulation*. New Haven, CT, Yale University Press.

Bessen, J., 2022b. « How big technology systems are slowing innovation ». *MIT Technology Review* (17 février).

Biamonte, J., P. Wittek, N. Pancotti, P. Rebentrost, N. Wiebe et S. Lloyd, 2017. « Quantum machine learning », *Nature*, vol. 549, n°7671, p. 195-202.

Bigliardi, B., G. Ferraro, S. Filippelli et F. Galati, 2020. « The influence of open innovation on firm performance », *International Journal of Engineering and Business Management*, vol. 12, p. 1-14.

Bilder, R. B., 2009. « A legal regime for the mining of helium-3 on the moon: U.S. policy options », *Fordham International Law Journal*, vol. 33, n°2, p. 243-299.

Bilton, A., A. D. Meglio, M. Doser, B. Frisch, D. Grabowska, M. Pierini, et S. Vallecorsa – 2021. *CERN Quantum Technology Initiative: Strategy and Roadmap, v. 1.0-Rev1*, Genève, Suisse, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire.

Biondi, M., A. Heid, N. Henke, N. Mohr, I. Ostojic, L. Pautasso, … R. Zemmel – 2021. *Quantum Computing: An Emerging Ecosystem and Industry Use Cases*, Zurich, Suisse, McKinsey & Company.

BIS – Department of Commerce Bureau of Industry and Security, 2018. *Review of Controls for Certain Emerging Technologies*, Washington, D.C., BIS.

BIS – Department of Commerce Bureau of Industry and Security, 2019. *Implementation of Certain New Controls on Emerging Technologies Agreed at Wassenaar Arrangement 2018 Plenary*, Washington, D.C., BIS.

Bobier, J.-F., M. Langione, E. Tao et A. Gourevitch, 2021. *What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing?*, Boston, MA, Boston Consulting Group.

Bongs, K., S. Bennett et A. Lohmann, 2023. « Quantum sensors will start a revolution—if we deploy them right », *Nature*, vol. 617, p. 672-675.

Bradford, N., 1998. « Prospects for associative governance: Lessons from Ontario, Canada », *Politics and Society*, vol. 26, n°4, p. 539-573.

Bresnahan, T. F. et M. Trajtenberg, 1995. « General purpose technologies: Engines of growth? », *Journal of Econometrics*, vol. 65, p. 83-108.

Brey, P., 2017. « Ethics of Emerging Technologies », dans Hansson, S. O. (réd.), *The Ethics of Technology: Methods and Approaches*, London, Royaume-Uni, Rowman & Littlefield International.

Breznitz, D., D. Ornston et S. Samford, 2018. « Mission critical: The ends, means, and design of innovation agencies », *Industrial and Corporate Change*, doi.org/10.1093/icc/dty027.

Breznitz, D., 2021. *Innovation in Real Places: Strategies for Prosperity in an Unforgiving World*. New York, NY, Oxford University Press.

Brundage, M., 2016. « Artificial Intelligence and Responsible Innovation », dans Müller, V. C. (réd.), *Fundamental Issues of Artificial Intelligence*, Cham, Switzerland, Springer International Publishing.

Bruno, L. et I. Spano, 2021. « Post-quantum encryption and privacy regulation: Can the law keep pace with technology? », *European Journal of Privacy Law & Technologies*, vol. 2021, n°1, p. 72-81.

BSI – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2020. *Quantum-safe Cryptography: Fundamentals, Current Developments, and Recommendations*, Bonn, Allemagne, BSI.

BSIF – Bureau du surintendant des institutions financières, 2022a. Allocution du surintendant Peter Routledge lors du Sommet sur les services bancaires numériques de BMO Marchés des capitaux, Toronto, Ontario, le 20 septembre 2022. Adresse : https://www.osfi-bsif.gc.ca/fra/osfi-bsif/med/sp-ds/Pages/pr20220920.aspx (consulté en novembre 2022).

BSIF – Bureau du surintendant des institutions financières, 2022b. Banques. Adresse : https://www.osfi-bsif.gc.ca/fra/fi-if/dti-id/bnk-bnq/Pages/default.aspx (consulté en novembre 2022).

BSIF – Bureau du surintendant des institutions financières, 2022c. *Gestion du risque lié aux technologies et du cyberrisque*, Ottawa, ON, BSIF.

BSIF – Bureau du surintendant des institutions financières, 2022d. *Feuille de route à court et à moyen terme proposée par le BSIF pour un paysage numérique en évolution*. Adresse : https://www.osfi-bsif.gc.ca/fra/osfi-bsif/med/Pages/20221116_rm.aspx (consulté en juin 2023).

BT Group, 2020. *BT and Toshiba Install UK's First Quantum-secure Industrial Network Between Key UK Smart Production Facilities.* Adresse: https://newsroom.bt.com/bt-and-toshiba-install-uks-first-quantum-secure-industrial-network-between-key-uk-smart-production-facilities/ (consulté en juillet 2023).

Budde, F. et D. Volz, 2019. *The next big thing? Quantum computing's potential impact on chemicals.* Adresse: https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/the-next-big-thing-quantum-computings-potential-impact-on-chemicals (consulté en juin 2023).

Budning, K., G. Cote et A. Wilner, 2023. *Semiconductors and Canadian National Security: Causes, Consequences, and Considerations.* Adresse: https://www.cgai.ca/semiconductors_and_canadian_national_security_causes_consequences_and_considerations (consulté en avril 2023).

Burkitt-Gray, A., 2021. *Luxembourg's SES Plans Satellite-based Quantum Encryption Service.* Adresse: https://www.capacitymedia.com/article/29otdc38gbc2vnjrp1gqo/news/luxembourgs-ses-plans-satellite-based-quantum-encryption-service (consulté en août 2023).

Business Sweden – s.d.-a. *Organization and Governance.* Adresse: https://www.business-sweden.com/about-us/organisation--governance/ (consulté en février 2023).

Business Sweden – s.d.-b. *About Us.* Adresse: https://www.business-sweden.com/about-us/ (consulté en février 2023).

Büthe, T. et W. Mattli, 2014. *The New Global Rulers: The Privatization of Regulation in the World Economy.* Princeton, NJ, Princeton University Press.

Butler, L., 2022. *National Quantum Initiative Advisory Committee*, Washington, D.C., Federal Register.

C2MI – Centre de Collaboration MiQro, s.d. *Modèle unique*. Adresse: https://www.c2mi.ca/ecosysteme/modele-unique/ (consulté en avril 2023).

CAC – Conseil des académies canadiennes, 2009. *Innovation et stratégies d'entreprise : pourquoi le Canada n'est pas à la hauteur*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur l'innovation dans les entreprises, CAC.

CAC – Conseil des académies canadiennes, 2021. *En attente de connexion*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur les réseaux à haut débit pour les collectivités rurales et éloignées du Canada, CAC.

CAC – Conseil des académies canadiennes, 2022. *Entre progrès et défis*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur l'intelligence artificielle en sciences et en génie, CAC

CAC – Conseil des académies canadiennes, 2023. *Lignes de faille*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur les conséquences socio-économiques de la mésinformation en science et en santé, CAC.

CAI – Collectif d'actifs en innovation, 2023. *Le Collectif d'actifs en innovation*. Adresse: https://www.ipcollective.ca/fr/ (consulté en juillet 2023).

Cameron, A. et S. Faisal, 2016. *Digital Economy Talent Supply: Immigration Stream*, Ottawa, ON, Conseil des technologies de l'information et des communications.

Campagna, M., L. Chen, Ö. Dagdelen, J. Ding, J. K. Fernick, N. Gisin, … Z. Zhang, 2015. *Quantum Safe Cryptography and Security: An Introduction, Benefits, Enablers and Challengers*, Sophia Antipolis, France, European Telecommunications Standards Institute.

Canada Action, 2021. *Canada's Helium Opportunity: More Than Just 'Party Balloons.'* Adresse: https://www.canadaaction.ca/helium-canada-opportunity-top-producer-exporter (consulté en septembre 2022).

Capgemini – Capgemini Research Institute, 2022. *Quantum Technologies: How to Prepare Your Organization for a Quantum Advantage Now*, Paris, France, Capgemini.

Cartlidge, E., 2018. *Europe's Billion-Euro Quantum Flagship Hands Out First Grants*. Adresse: https://www.science.org/content/article/europe-s-billion-euro-quantum-flagship-hands-out-first-grants (consulté en septembre 2022).

Cartwright, M., 2021. *Report Together with Minority Views (to Accompany H.R. 4505)*, Washington, D.C., United States House of Representatives Committee on Appropriations.

Cava, R., N. de Leon, et W. Xie, 2021. « Introduction: Quantum materials », *Chemical Reviews*, vol. 121, n°5, p. 2777-2779.

Caves, C. M., 1981. « Quantum-mechanical noise in an interferometer », *Physical Review D*, vol. 23, n°8, p. 1693-1708.

Cavinato, S., T. Felser, M. Fusella, M. Paiusco, et S. Montangero, 2020. « Optimizing radiotherapy plans for cancer treatment with tensor networks », *Physics in Medicine and Biology*, vol. 66, n°12.

CBC News, 2023. *Why Doctors Still Use Faxes, and Why Ontario Aims to Phase Them Out of Health Care.* Adresse: https://www.cbc.ca/news/canada/toronto/ontario-fax-machines-health-care-1.6734810 (consulté en août 2023).

CCA – Conseil canadien des affaires, 2022. *Canada's Immigration Advantage : A Survey of Major Employers*. Ottawa, ON, CCA.

CCCST – Comité consultatif canadien pour la sécurité des télécommunications, 2020. *Politique sur les pratiques exemplaires en matière de sécurité pour les fournisseurs canadiens de services de télécommunications*, Ottawa, ON, CCCST.

CCN – Conseil canadien des normes, 2021. *L'Initiative d'innovation du CCN : Pour alimenter l'innovation canadienne à la source*, Ottawa,ON, CCN.

CCN – Conseil canadien des normes, 2022. Élaboration d'une stratégie nationale de normalisation, Ottawa, ON, CCN .

CCPPP – Le Conseil Canadien pour les Partenariats Public-Privé, s.d. *What are Public-Private Partnerships (P3s)?* Adresse: https://www.pppcouncil.ca/why-p3s/what-are-p3s (consulté en février 2023).

CCSN – Commission canadienne de sûreté nucléaire, 2023. *Notre mission.* Adresse: https://nuclearsafety.gc.ca/fra/about-us/our-mission.cfm (consulté en février 2023).

CCT – Conseil du commerce et des technologies UE-États-Unis, 2022. Le Conseil du commerce et des technologies UE–États-Unis relève des défis communs et fait face aux crises mondiales, Paris-Saclay, France, CCT.

CDL – Creative Destruction Lab, s.d. *Companies - Quantum Stream.* Adresse: https://creativedestructionlab.com/companies/?stream=quantum-machine-learning (consulté en juin, 2023).

CE – Commission Européenne, 2010. *A Decade of EU-Funded GMO Research (2001 - 2010)*, Bruxelles, Belgique, CE.

CE – Commission Européenne, 2020. *Règlement délégué (UE) 2020/1749 de la Commission du 7 octobre 2020 modifiant le règlement (CE) no 428/2009 du Conseil instituant un régime communautaire de contrôle des exportations, des transferts, du courtage et du transit de biens à double usage*, Bruxelles, Belgique, CE.

CE – Commission Européenne, 2021. *Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle (législation sur l'intelligence artificielle) et modifiant certains actes législatifs de l'Union*, Bruxelles, Belgique, CE.

CE – Commission Européenne, 2022. *Strategic Research and Industry Agenda*, Bruxelles, Belgique, CE.

CE – Commission Européenne, 2023. *L'initiative «Infrastructure européenne de communication quantique» (EuroQCI).* Adresse: https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci (consulté en juillet 2023).

CE – Commission Européenne, s.d. *Technologies quantiques phares*. Adresse: https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/policies/quantum-technologies-flagship (consulté en juillet 2023).

CEC – Cour de l'Échiquier du Canada, 1954. *Canadian Admiral Corp. v. Rediffusion Inc. [1954] Ex. CR 382*, Ottawa, ON, CEC.

CEI – Commission électrotechnique internationale, 2021. *Quantum Information Technology*, Genève, Suisse, CE.

CEN-CENELEC – Comité européen de normalisation – Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique, 2023. *Quantum Technologies*. Adresse : https://www.cencenelec.eu/areas-of-work/cen-cenelec-topics/quantum-technologies/ (consulté en février 2023).

CEN-CENELEC – Comité européen de normalisation – Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique, s.d. *FGQT Q03: Towards Standardization for Quantum Technologies*, Bruxelles, Belgique, CEN-CENELEC.

Cerezo, M., G. Verdon, H.-Y. Huang, L. Cincio, et P. J. Coles, 2022. « Challenges and opportunities in quantum machine learning », *Nature Computational Science*, vol. 2, n°9, p. 567-576.

CGN – Conseil de gouvernance numérique, s.d. *Le Conseil de gouvernance numérique*. Adresse: https://dgc-cgn.org/fr/ (consulté en juillet 2023).

Chambre des communes – Chambre des communes du Canada, 2017. *Propriété intellectuelle et transfert des technologies : promouvoir des pratiques exemplaires*, Ottawa, ON, Chambre des communes.

Chambre des communes – Chambre des communes du Canada, 2022a. *Projet de loi C-27 : oi édictant la Loi sur la protection de la vie privée des consommateurs, la Loi sur le Tribunal de la protection des renseignements personnels et des données et la Loi sur l'intelligence artificielle et les données et apportant des modifications corrélatives et connexes à d'autres lois*, Ottawa, ON, Chambre des communes du Canada.

Chambre des communes – Chambre des communes du Canada, 2022b. *Projet de loi C-26 : Loi concernant la cybersécurité, modifiant la Loi sur les télécommunications et apportant des modifications corrélatives à d'autres lois*, Ottawa, ON, Chambre des communes.

Charbon, E., F. Sebastiano, A. Vladimirescu, H. Homulle, S. Visser, L. Song, et R. M. Incandela, 2016. *Cryo-CMOS for Quantum Computing*, communication présentée dans le cadre du 2016 IEEE International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA.

Chen, Y.-A., Q. Zhang, T.-Y. Chen, W.-Q. Cai, S.-K. Liao, J. Zhang, … J.-W. Pan, 2021. « An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres », *Nature*, vol. 589, n°7841, p. 214-219.

Chesbrough, H., 2017. « The future of open innovation », *Research-Technology Management*, vol. 60, n°1, p. 35-38.

Chesbrough, H., W. Vanhaverbeke, et J. West, (réd.), 2006. *Open Innovation – Researching a New Paradigm*. New York, NY, Oxford University Press.

Choi, Y., E. Crossman, et F. Hou, 2021. *Les étudiants étrangers comme source de main-d'oeuvre : Transition vers la résidence permanente*, Ottawa, ON, Statistique Canada.

CIFAR, 2022a. *Informatique quantique.* Adresse : https ://cifar.ca/fr/programmes-de-recherche/informatique-quantique/ (consulté en mai 2022).

CIFAR, 2022b. *Matériaux quantiques.* Adresse : https ://cifar.ca/fr/programmes-de-recherche/materiaux-quantiques/ (consulté en mai 2022).

CIPVP – Commissaire à l'information et à la protection de la vie privée de l'Ontario, 2022. *Le Bureau du commissaire à l'information et à la protection de la vie privée de l'Ontario se joint à l'appel pour mettre fin à l'utilisation du télécopieur et chiffrer les communications aux fins de la prestation des soins de santé.* Adresse: https://www.newswire.ca/fr/news-releases/le-bureau-du-commissaire-a-l-information-et-a-la-protection-de-la-vie-privee-de-l-ontario-se-joint-a-l-appel-pour-mettre-fin-a-l-utilisation-du-t-elecopieur-et-chiffrer-les-communications-aux-fins-de-la-prestation-des-soins-de-sante-843873331.html (consulté en janvier 2023).

CIRA – Center for Intelligence Research and Analysis, 2022. *A New "Great Game?": China's Role in International Standards for Emerging Technologies*, Washington, D.C., CIRA.

Clarivate, s.d. *Web of Science Core Collection: Editorial Selection Process.* Adresse: https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/web-of-science/core-collection/editorial-selection-process/ (consulté en février 2023).

Climenhaga, C., 2022. *We Need Rare Earth Elements for a Greener Future But There's a Catch.* Adresse: https://www.cbc.ca/news/canada/edmonton/rare-earth-minerals-elements-alberta-canada-climate-change-environment-1.6558991 (consulté en septembre 2022).

CMC Microsystèmes, 2020. *CMC devient membre du Réseau quantique d'IBM à l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke.* Adresse: https://www.cmc.ca/fr/cmc-devient-membre-de-lespace-ibm-q-a-linstitut-quantique-de-luniversite-de-sherbrooke/ (consulté en novembre 2022).

CMC Microsystèmes, 2022. *À propos de CMC.* Adresse: https://www.cmc.ca/fr/a-propos-de-cmc/ (consulté en septembre 2022).

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2017a. *Atelier de mobilisation du secteur minier - Rapport sommaire*, Ottawa ON, CNRC.

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2017b. *Saisir les possibilités du Canada dans le domaine quantique : rapport sur le symposium et l'atelier de Quantique Canada*, Ottawa, ON, CNRC, Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG), et ICRA.

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2022a. *Programme Photonique quantique appliquée à la détection et à la sécurité.* Adresse : https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/recherche-collaboration/programmes/programme-photonique-quantique-appliquee-detection-securite (consulté en mai 2022).

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2022b. *Programme Défi « Internet des objets : capteurs quantiques »*. Adresse: https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/recherche-collaboration/programmes/programme-defi-internet-objets-capteurs-quantiques (consulté en mai 2022).

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2022c. Évaluation du Programme d'aide à la recherche industrielle du CNRC, Ottawa, ON, Bureau de la vérification et de l'évaluation.

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2022d. *Installations de recherche sur le dépôt et la caractérisation de nanomatériaux*. Adresse : https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/installations-cnrc/installations-recherche-depot-caracterisation-nanomateriaux (consulté en septembre 2022).

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2022e. *Programmes*. Adresse : https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/recherche-collaboration/programmes (consulté en juillet 2023).

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2022f. *Installations du CNRC*. Adresse : https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/installations-cnrc (consulté en juillet 2023).

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2022g. *Centre de recherche en nanotechnologie*. Adresse: https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/recherche-collaboration/centres-recherche/centre-recherche-nanotechnologie (consulté en septembre 2022).

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2022h. *Installation de microscopie*. Adresse: https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/installations-cnrc/installation-microscopie (consulté en septembre 2022).

CNRC – Conseil national de recherches Canada, 2023. *Soutien du PARI CNRC à la propriété intellectuelle*. Adresse: https://nrc.canada.ca/index.php/fr/soutien-linnovation-technologique/soutien-pari-cnrc-propriete-intellectuelle (consulté en juillet 2023).

CNRS – Centre national de la recherche scientifique, 2022. *Quantique : un nouveau réseau France-Canada*. Adresse : https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/quantique-un-nouveau-reseau-france-canada (consulté en avril 2023).

Coccia, M., 2021. *Technological and Scientific Trajectories of the Emerging General-Purpose Technology of Quantum Computing*, Moncalieri, Italie, National Research Council of Italy.

Colangelo, A. et A. Maurushat, 2006. « Exploring the limits of computer code as a protected form of expression: A suggested approach to encryption, computer viruses, and technological protection measures », McGill Law Journal, vol. 51, n°1, p. 47-96.

Collette, E. et D. Santilli, 2019. *Rapport sur la PI 2019*, Ottawa, ON, Innovation, Sciences et Développement économique Canada.

Commonwealth d'Australie, 2021. *Army Quantum Technology Roadmap*, Canberra, Australie, Commonwealth d'Australie.

Cook, S., 2022. *U of A Finds Calgary-Based Benefactor to Help with Helium Shortage*. Adresse: https://www.cbc.ca/news/canada/edmonton/university-alberta-helium-shortage-1.6458721 (consulté en septembre 2022).

Cooper, J., 2020. *Incorporating Indigenous Cultures and Realities in STEM*, Ottawa, ON, Le Conference Board du Canada.

Coussens, T., C. Abel, A. Gialopsou, M. G. Bason, T. M. James, F. Orucevic, et P. Kruger, 2021. « Modular optically-pumped magnetometer system », *arXiv*:2106.05877v1.

CPVP – Commissariat à la protection de la vie privée du Canada, 2016. *Consentement et protection de la vie privée : Document de discussion sur les améliorations possibles au consentement sous le régime de la Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques*, Gatineau, QC, le Commissariat.

CPVP – Commissariat à la protection de la vie privée du Canada, 2019a. *Survol de la Loi sur la protection des renseignements personnels. Adresse* : https://www.priv.gc.ca/fr/sujets-lies-a-la-protection-de-la-vie-privee/lois-sur-la-protection-des-renseignements-personnels-au-canada/la-loi-sur-la-protection-des-renseignements-personnels/lprp_survol/ (consulté en septembre 2022).

CPVP – Commissariat à la protection de la vie privée du Canada, 2019b. *Survol de la LPRPDE.* Adresse : https://www.priv.gc.ca/fr/sujets-lies-a-la-protection-de-la-vie-privee/lois-sur-la-protection-des-renseignements-personnels-au-canada/la-loi-sur-la-protection-des-renseignements-personnels-et-les-documents-electroniques-lprpde/lprpde_survol/ (consulté en septembre 2022).

CPVP – Commissariat à la protection de la vie privée du Canada, 2021. *Ce que vous devez savoir sur la déclaration obligatoire des atteintes aux mesures de sécurité.* Adresse : https://www.priv.gc.ca/fr/sujets-lies-a-la-protection-de-la-vie-privee/protection-des-renseignements-personnels-pour-les-entreprises/mesures-de-securite-et-atteintes/atteintes-a-la-vie-privee/comment-reagir-a-une-atteinte-a-la-vie-privee-dans-votre-entreprise/gd_pb_201810/ (consulté en septembre 2022).

Crane, K. W., L. G. Joneckis, H. Acheson-Field, I. D. Boyd, B. A. Corbin, X. Han, et R. N. Rozansky, 2017. *Assessment of the Future Economic Impact of Quantum Information Science*, Alexandria, VA, Institute for Defense Analyses.

Crawford, K., 2022. *Atlas of AI: Power, Politics, and the Planetary Costs of Artificial Intelligence*. New Haven, CT, Yale University Press.

Crawford, S. E., R. A. Shugayev, H. P. Paudel, P. Lu, M. Syamlal, P. R. Ohodnicki, … Y. Duan, 2021. « Quantum sensing for energy applications: Review and perspective », *Advanced Quantum Technologies*, vol. 4, n°8.

Crisan, D., 2020. *Buying with Intent: Public Procurement for Innovation by Provincial and Municipal Governments*, Calgary, AB, Université de Calgary.

CRSNG – Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, 2020a. *Équipes qui ont obtenu du financement à l'issue de l'appel de propositions Canada—Royaume-Uni dans le domaine des technologies quantiques.* Adresse: https://www.nserc-crsng.gc.ca/NSERC-CRSNG/FundingDecisions-DecisionsFinancement/2020/UKRI_fra.asp (consulté en février 2023).

CRSNG Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, 2020b. *Le Royaume-Uni et le Canada collaborent au lancement du premier programme de technologies quantiques au monde.* Adresse: https://www.nserc-crsng.gc.ca/Media-Media/NewsDetail-DetailNouvelles_fra.asp?ID=1195 (consulté en février 2023).

CRSNG – Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, 2021a. *Appel de propositions CRSNG—Comission européenne dans le domaine des technologies quantiques.* Adresse: https://www.nserc-crsng.gc.ca/Innovate-Innover/NSERC_EC-CRSNG_CE_fra.asp (consulté en février 2023).

CRSNG – Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, 2021b. *Annonce d'un nouveau partenariat canado-américain pour une collaboration en recherche et innovation.* Adresse : https ://www.nserc-crsng.gc.ca/Media-Media/NewsDetail-DetailNouvelles_fra.asp ?ID=1271 (consulté en février 2023).

CRSNG – Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, 2022. *L'ensemble des possibilités des financement du CRSNG à l'appui de la Stratégie quantique nationale maintenant accessibles.* Adresse: https://www.nserc-crsng.gc.ca/Media-Media/NewsDetail-DetailNouvelles_fra.asp?ID=1323 (consulté en mai 2022).

CRSNG – Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, 2023. *Les possibilités de financement présentées ci-après viennent appuyer la Stratégie quantique nationale du Canada en soutenant des collaborations nationales et internationales qui favorisent le progrès de la recherche, de l'innovation et du développement des talents en science et en technologies quantiques.* Adresse: https://www.nserc-crsng.gc.ca/Innovate-Innover/NQS-SQN_fra.asp (consulté en septembre 2023).

CRTC – Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes, 2015. *Politique réglementaire de télécom CRTC 2015-326*, Ottawa, ON, CRTC.

CRTC – Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes, 2018. *Notre mandat, mission et ce que nous faisons.* Adresse: https://crtc.gc.ca/fra/acrtc/acrtc.htm (consulté en novembre 2022).

CRTC – Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes, 2020. *Rapport de surveillance des communications*, Ottawa, ON, CRTC.

Crump, C., 2016. « Surveillance policy making by procurement », *Washington Law Review*, vol. 91, n°4, p. 1595-1662.

CSC – Cour Suprême du Canada, 2004. *R. c. Tessling. 2004, SCC 67*, Ottawa, ON, CSC.

CSC – Cour Suprême du Canada, 2012. *Teva Canada Ltée c. Pfizer Canada Inc., 2012 SCC 60*, Ottawa, ON, CSC.

CSC – Cour Suprême du Canada, 2019. *R. c. Jarvis. 2019 SCC 10*, Ottawa, ON, CSC.

CSIC – (Spanish National Research Council), 2022. *CSIC Scientists Explore Applications of Quantum Computing to Agriculture.* Adresse: https://qtep.csic.es/project/csic-scientists-explore-applications-of-quantum-computing-to-agriculture-duplicate (consulté en mars 2023).

CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 2020. *Growing Australia's Quantum Technology Industry*, Canberra, Australie, CSIRO.

CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 2022. *Growing Australia's Quantum Technology Industry: Updated Economic Modelling*, Canberra, Australie, CSIRO.

CTIC – Conseil des technologies de l'information et des communications, 2012. *L'impact de l'immigration sur l'économie numérique au Canada – Une analyse de situation*, Ottawa, ON, CTIC.

Cybercentre – Centre canadien pour la cybersécurité, 2021. *Préparez votre organisation à la menace que pose l'informatique quantique pour la cryptographie - ITSAP.00.017.* Adresse: https://www.cyber.gc.ca/fr/orientation/preparez-votre-organisation-la-menace-que-pose-linformatique-quantique-pour-la (consulté en novembre 2022).

Cybercentre – Centre canadien pour la cybersécurité, 2022. *Algorithmes cryptographiques pour l'information Non classifié, Protégé A et Protégé B (Version 2)*, Ottawa, ON, Gouvernement du Canada.

D-Wave, 2022. *SavantX: Logistics Optimization at the Port of Los Angeles.* Adresse: https://www.dwavesys.com/media/y3hl22va/dwave_port_of_la_case_story_v6.pdf (consulté en novembre 2022).

D-Wave, s.d. *Fast Track Your Quantum Journey with Quantum Computing Training.* Adresse: https://www.dwavesys.com/learn/training/ (consulté en juillet 2023).

Dastin, J., 2018. *Amazon Scraps Secret AI Recruiting Tool that Showed Bias Against Women.* Adresse: https://www.reuters.com/article/us-amazon-com-jobs-automation-insight-idUSKCN1MK08G (consulté en avril 2023).

de Jong, E., 2022. « Own the unknown: An anticipatory approach to prepare society for the quantum age », *Digital Society*, vol. 1, n°2, p. 15.

de Smyter, G., 2021. *Untappable Communication Becomes Practical with New System in Future Quantum Internet.* Adresse: https://phys.org/news/2021-07-untappable-future-quantum-internet.html (consulté en septembre 2022).

Deibert, R., 2022. *UK Government Officials Infected with Pegasus.* Adresse: https://citizenlab.ca/2022/04/uk-government-officials-targeted-pegasus/ (consulté en juillet 2023).

Dekate, C., M. Reynolds, M. Horvath, et M. Brisse, 2021. *Predicts 2021: Disruptive Potential During the Next Decade of Quantum Computing*, Stamford, CT, Gartner.

Dekker, T. et F. Martin-Bariteau, 2022. « Regulating uncertain states: A risk-based policy agenda for quantum technologies », *Canadian Journal of Law and Technology*, vol. 20, n°2, p. 179.

DeNardis, L., 2013. *Internet Points of Control as Global Governance*, Waterloo, ON, Centre for International Governance Innovation.

DeNardis, L., 2022. *Quantum Internet Protocols*, Washington, D.C., Georgetown University.

Denver, J., 2020. « Could Quantum Computing Help Feed the World? », *The Quantum Insider* (5 février).

Devi, V. A. et V. K. Kalaivani, 2021. « Enhanced BB84 quantum cryptography protocol for secure communication in wireless body sensor networks for medical applications », *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 27, p. 875-885.

DHL International, 2020. *Quantum computing could transform the logistics industry within the next decade.* Adresse: https://lot.dhl.com/quantum-computing-could-transform-the-logistics-industry-within-the-next-decade/ (consulté en mai 2022).

Dieterich, J. M. et E. A. Carter, 2017. « Opinion: Quantum solutions for a sustainable energy future », *Nature Reviews Chemistry*, vol. 1, n°4, p. 0032.

DLR – (German Aerospace Center), s.d. *QuNET - Satellite-based Quantum Technology for Secure Communication.* Adresse: https://www.dlr.de/kn/en/desktopdefault.aspx/tabid-17795/#gallery/36425 (consulté en juillet 2023).

DOJ et FTC – United States Department of Justice and the United States Federal Trade Commission, 2007. *Antitrust Enforcement and Intellectual Property Rights: Promoting Innovation and Competition*, Washington, D.C., DOJ et FTC.

Donahue, J. D., 2009. « The Transformation of Government Work: Causes, Consequences, and Distortions », dans Freeman, J. et M. Minow (réd.), *Government by Contract: Outsourcing and American Democracy*, Cambridge, MA, Harvard University Press.

Dowling, J. P. et G. J. Milburn, 2003. « Quantum technology: The second quantum revolution », *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 361, p. 1655-1674.

Doyletech Corporation, 2020. *Socio-Economic Impact Assessment of Quantum Technologies in Canada*, Ottawa, ON, Doyletech Corporation.

Dunlop, R., 2019. *A National Quantum Strategy for Canada*, Ottawa, ON, Dunlop.

Dylan, D. W., 2019. « Implementation & governance challenges in Canada respecting UNDRIP Article 31 », *University of New Brunswick Law Journal*, vol. 70, n°2019, p. 61-87.

EA – European Accreditation, 2017. *CETA Agreement and Conformity Assessment: Accreditation, a Tool to Enhance Trade Between the European Union and Canada*, Paris, France, EA.

ECCC et SC – Environnement et Changement climatique Canada & Santé Canada, 2022. *Cadre pour l'évaluation des risques associés aux nanomatériaux manufacturés, prescrite par la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) (ébauche)*, Ottawa, ON, ECCC et SC.

Edler, J., G. Ã. Abdullah, P. Cunningham, et P. Shapira, 2016. « Introduction: Making Sense of Innovation Policy », dans Edler, J., P. Cunningham, A. Gök et P. Shapira (réd.), *Handbook of Innovation Policy Impact*, Cheltenham, Royaume-Uni, Edward Elgar Publishing.

Edler, J., 2019. *La politique du Canada en matière d'innovation trop axée sur l'offre au détriment de la demande*, Montréal, QC, Institut de recherche en politiques publiques.

EDSC – Emploi et Développement social Canada, 2022a. *Exigences du programme pour le Volet des talents mondiaux*. Adresse: https://www.canada.ca/fr/emploi-developpement-social/services/travailleurs-etrangers/talents-mondiaux/exigences.html (consulté en décembre 2022).

EDSC – Emploi et Développement social Canada, 2022b. *Embaucher un travailleur talentueux de l'étranger par l'entremise du Volet des talents mondiaux*. Adresse: https://www.canada.ca/fr/emploi-developpement-social/services/travailleurs-etrangers/talents-mondiaux.html (consulté en décembre 2022).

Egger, D. J., C. Gambella, J. Marecek, S. McFaddin, M. Mevissen, R. Raymond, ... E. Yndurain, 2020. « Quantum Computing for Finance: State-of-the-Art and Future Prospects », *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 1, p. 1-24.

Einstein, A., B. Podolsky, et N. Rosen, 1935. « Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? », *Physical Review*, vol. 47, n°10, p. 777-780.

EKOS – EKOS Research Associates Inc., 2019. Étude sur la satisfaction de la clientèle du Service des délégués commerciaux du Canada 2019 : rapport définitif, Ottawa, ON, Affaires mondiales Canada.

EPSRC – Engineering and Physical Sciences Research Council, s.d. *Quantum Technologies: Public Dialogue Report*, Londres, Royaume-Uni, EPSRC.

Ericsson, 2023. *Ericsson Establishes Quantum Research Hub in Canada*. Adresse: https://www.ericsson.com/en/press-releases/6/2023/ericsson-establishes-quantum-research-hub-in-canada (consulté en juin 2023).

ET Telecom, 2023. *ISRO Aims to Launch QKD Satellite, Ahmedabad to Play Key Role*. Adresse: https://telecom.economictimes.indiatimes.com/news/portal-in-portal/satcom/isro-aims-to-launch-qkd-satellite-ahmedabad-to-play-key-role/101230570 (consulté en juillet 2023).

ETHI – Comité permanent de l'accès à l'information, de la protection des renseignements personnels et de l'éthique, 2022. *Collecte et utilisation de données sur la mobilité par le gouvernement du Canada et enjeux liés*, Ottawa, ON, Chambres des Communes Canada.

Etzkowitz, H., 2008. *The Triple Helix: University-Industry-Government Innovation in Action*. New York, NY, Routledge.

Ezratty, O., 2021. *Understanding Quantum Technologies, Fourth Edition*, Paris, France, Le Lab Quantique.

Ezratty, O., 2022. « Mitigating the quantum hype », *arXiv*, doi.org/10.48550/arXiv.2202.01925.

FCI – Fondation canadienne pour l'innovation, 2023. *Tableau de bord des projets financés*. Adresse: https://www.innovation.ca/fr/projets-resultats/tableau-bord-projets-finances#!list-view (consulté en août 2023).

Feldman, M., 2019. *Airbus Gets Aerodynamic With Quantum Computing*. Adresse: https://www.nextplatform.com/2019/01/24/airbus-gets-aerodynamic-with-quantum-computing/ (consulté en mars 2022).

Felsch, D., M. Grothe, J. Schwenk, A. Czubak, et M. Szymanek, 2018. *The Dangers of Key Reuse: Practical Attacks on IPsec IKE*, communication présentée dans le cadre du 27e USENIX Security Symposium, Baltimore, MD.

FEM – Forum économique mondial, 2020. *Future Series: Cybersecurity, Emerging Technology and Systemic Risk*, Cologny, Suisse, FEM.

FEM – Forum économique mondial, 2022a. *Quantum Computing Governance Principles*, Cologny, Suisse, FEM.

FEM – Forum économique mondial, 2022b. *State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy*, Cologny, Suisse, FEM.

Ferreira, C. et C. Klütsch, 2018. « How Canada can attract international talent and improve knowledge exchange ». *Affaires universitaires* (16 juillet).

Fescenko, I., A. Laraoui, J. Smits, N. Mosavian, P. Kehayias, J. Seto, … V. M. Acosta, 2019. « Diamond magnetic microscopy of malarial hemozoin nanocrystals », *Physical Review Applied*, vol. 11, n°3, p. 034029.

Feynman, R. P., 1982. « Simulating physics with computers », *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, n°6, p. 467-488.

Fife, R. et S. Chase, 2023. *Ottawa Ends All Research Funding With Chinese Military and State Security Institutions*. Adresse: https://www.theglobeandmail.com/politics/article-ottawa-bans-research-funding-chinese-military/ (consulté en février, 2023).

Filipp, S. et P. Leibinger, 2021. *Roadmap Quantencomputing*, Berlin, Allemagne, Der Expertenrat „Quantencomputing."

FIN – Ministère des Finances Canada, 2018. *Le budget de 2018 : Égalité et croissance pour une classe moyenne forte*, Ottawa, ON, FIN.

FIN – Ministère des Finances Canada, 2021. *Budget de 2021 – Bâtir une économie de l'innovation de demain*. Adresse: https://www.canada.ca/fr/ministere-finances/nouvelles/2021/04/budget-de-2021--batir-une-economie-de-linnovation-de-demain.html (consulté en mai 2022).

Flemming, D., J. Kimmerle, U. Cress, et G. M. Sinatra, 2020. « Research is tentative, but that's okay: Overcoming misconceptions about scientific tentativeness through refutation texts », *Discourse Processes*, vol. 57, n°1, p. 17-35.

Forcese, C. et L. West, 2021. *National Security Law, 2e édition*. Toronto, ON, Irwin Law.

Fox, D. M., K. M. Branson, et R. C. Walker, 2021. « mRNA codon optimization with quantum computers », *PLOS ONE*, vol. 16, n°10, p. e0259101.

Fox, M., B. Zwickl, et H. Lewandowski, 2020. « Preparing for the quantum revolution: What is the role of higher education? », *Physical Review Physics Education Research*, vol. 16, n°2, p. 020131.

Frantz, T., 2022. *China Raising the Ante on Standards Setting*. Adresse: https://quantumconsortium.org/blog/china-raising-the-ante-on-standards-setting/ (consulté en décembre 2022).

Fraunhofer IKS, 2023. *QuaST — Quantum-enabling Services and Tools for Industrial Applications.* Adresse: https://www.iks.fraunhofer.de/en/projects/quast-quantum-computing-for-industrial-applications.html (consulté en février 2023).

Frederiks, A. J., S. Costa, B. Hulst, et A. J. Groen, 2022. « The early bird catches the worm: The role of regulatory uncertainty in early adoption of blockchain's cryptocurrency by fintech ventures », *Journal of Small Business Management*, en avance sur l'impression, p. 1-34.

Frenette, M. et K. Frank, 2020. Automatisation et transformation des emplois au Canada : Qui est à risque ?, Ottawa, ON, Statistique Canada.

Fruchterman, J. et J. Mellea, 2018. *Expanding Employment Success for People with Disabilities*, Palo Alto, CA, Benetech.

Fruchtman, A. et I. Choi, 2016. *Technical Roadmap for Fault-Tolerant Quantum Computing*, Oxford, Royaume-Uni, Networked Quantum Information Technologies and U.K. National Quantum Technologies Programme.

GACG – Global Advantage Consulting Group, 2021a. *Quantum Challenge Collaboration Models for Stakeholder Engagement and Technology Roadmapping*, Ottawa, ON, GACG.

GACG – Global Advantage Consulting Group, 2021b. *Quantum-Safe Cybersecurity Talent and Job Market Analysis*, Ottawa, ON, GACG.

Galasso, A. et M. Schankerman, 2018. « Patent rights, innovation, and firm exit », *The RAND Journal of Economics*, vol. 49, n°1, p. 64-86.

Gallini, N. et A. Hollis, 2019. *To Sell or Scale Up: Canada's Patent Strategy in a Knowledge Economy*, Montréal, QC, l'Institut de recherche en politiques publiques.

Gartner, 2019. *Strategy Guide to Navigating the Quantum Computing Hype*, Stamford, CT, Gartner.

Gartner, 2021a. Assessing Emerging Technology Adoption Readiness, Stamford, CT, Gartner.

Gartner, 2021b. *Hype Cycle for Emerging Technologies, 2021*, Stamford, CT, Gartner.

Gartner, 2022. *Hype Cycle for Cloud Computing 2022*, Stamford, CT, Gartner.

Gartner, s.d. *Gartner Glossary.* Adresse: https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/interoperability (consulté juillet 2023).

GC – Gouvernement du Canada, 1985a. *Loi sur les licences d'exportation et d'importation (L.R.C. (1985), ch. E-19)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 1985b. *Loi sur la concurrence (L.R.C. (1985), ch. C-34)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 1985c. *Loi sur le Bureau du surintendant des institutions financières (L.R.C. (1985), ch. 18 (3e suppl.), partie I)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 1985d. *Loi sur les brevets (L.R.C. (1985), ch. P-4)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 1985e. *Loi sur le droit d'auteur (L.R.C. (1985), ch. C-42)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 1985f. *Loi sur l'énergie nucléaire (L.R.C. (1985), ch. A-16)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 1993. *Loi sur les télécommunications (L.C. 1993, ch. 38)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 1995. *Loi de mise en œuvre de la Convention sur les armes chimiques (L.C. 1995, ch. 25)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 1997. *Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires (L.C. 1997, ch. 9)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2000. *Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques (L.C. 2000, ch. 5)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2009. *Loi sur les agents pathogènes humains et les toxines (L.C. 2009, ch. 24)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2010. *Règlement sur le contrôle de l'importation et de l'exportation aux fins de la non-prolifération nucléaire (DORS/2000-210)*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2011. *Innovation Canada: Le pouvoir d'agir - Examen du soutien fédéral de la recherche-développement – Rapport final du groupe d'experts*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2017. La *Gazette du Canada, Partie I, volume 151, numéro 37 : Accord économique et commercial global Canada-Union européenne*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2018. *Gouvernement du Canada Livre blanc : Souveraineté des données et nuage public*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2019. Établir de nouvelles orientations à l'appui de la recherche et de la formation en recherche autochtone au Canada 2019 - 2022, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2022a. *Des modifications importantes apportées à la Loi sur la concurrence entrent en vigueur.* Adresse: https://www.canada.ca/fr/bureau-concurrence/nouvelles/2022/06/des-modifications-importantes-apportees-a-la-loi-sur-la-concurrence-entrent-en-vigueur.html (consulté en mars 2023).

GC – Gouvernement du Canada, 2022b. *Immigrer avec un visa pour démarrage d'entreprise : À propos du processus.* Adresse: https://www.canada.ca/fr/immigration-refugies-citoyennete/services/immigrer-canada/visa-demarrage/apropos.html (consulté en décembre 2022).

GC – Gouvernement du Canada, 2022c. *Le gouvernement du Canada annonce la prochaine phase de renforcement du Réseau d'innovation pour la cybersécurité.* Adresse: https://www.canada.ca/fr/innovation-sciences-developpement-economique/nouvelles/2022/02/le-gouvernement-du-canada-annonce-la-prochaine-phase-de-renforcement-du-reseau-dinnovation-pour-la-cybersecurite.html (consulté en février, 2023).

GC – Gouvernement du Canada, 2022d. *Budget de 2022: Un plan pour faire croître notre économie et rendre la vie plus abordable*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2022e. *La Stratégie du Canada pour l'Indo-Pacifique*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2022f. *La Mission QEYSSat*. Adresse : https://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/qeyssat.asp (consulté en mai 2022).

GC – Gouvernement du Canada, 2023a. *Corporation d'innovation du Canada – Plan directeur*, Ottawa, ON, GC.

GC – Gouvernement du Canada, 2023b. *Le gouvernement du Canada met sur pied de nouveaux pôles de recherche visant à accélérer la production de vaccins et de produits thérapeutiques au Canada.* Adresse: https://www.canada.ca/fr/chaires-recherche/nouvelles/2023/03/le-gouvernement-du-canada-met-sur-pied-de-nouveaux-poles-de-recherche-visant-a-accelerer-la-production-de-vaccins-et-de-produits-therapeutiques-au-canada.html (consulté en avril 2023).

GC – Gouvernement du Canada, 2023c. *Note d'information : Le Canada et les États-Unis poursuivent leur travail pour faire croître leurs économies propres et créer de bons emplois dans la classe moyenne des deux côtés de la frontière.* Adresse: https://www.pm.gc.ca/fr/nouvelles/notes-dinformation/2023/03/24/note-dinformation-canada-et-les-etats-unis-poursuivent-leur (consulté en avril 2023).

GC – Gouvernement du Canada, 2023d. *Directive on Automated Decision-Making*, Ottawa, ON, GC.

GECLMRT – Groupe d'examen du cadre législatif en matière de radiodiffusion et de télécommunications, 2020. *L'avenir des communications au Canada : Le temps d'agir*, Ottawa, ON, Centre de services aux citoyens d'ISDE.

Geroski, P. A., 1990. « Innovation, technological opportunity, and market structure », *Oxford Economic Papers*, vol. 42, n°3, p. 586-602.

Ghose, S., 2020. *Are You Ready for the Quantum Revolution?* Adresse: https://hbr.org/2020/09/are-you-ready-for-the-quantum-computing-revolution (consulté en août 2023).

Gialopsou, A., C. Abel, T. M. James, T. Coussens, M. G. Bason, R. Puddy, … P. Krüger, 2021. « Improved spatio-temporal measurements of visually evoked fields using optically-pumped magnetometers », *Scientific Reports*, vol. 11, n°1, p. 22412.

Giles, M., 2019. *We'd Have More Quantum Computers if It Weren't so Hard to Find the Damn Cables.* Adresse : https ://www.technologyreview.com/2019/01/17/137811/quantum-computers-component-shortage/ (consulté en avril 2022).

Girard, M., 2019. *Big Data Analytics Need Standards to Thrive: What Standards Are and Why They Matter*, Waterloo,ON, Centre for International Governance Innovation.

Glenn, D. R., K. Lee, H. Park, R. Weissleder, A. Yacoby, M. D. Lukin, … C. B. Connolly, 2015. « Single-cell magnetic imaging using a quantum diamond microscope », *Nature Methods*, vol. 12, n°8, p. 736-738.

Goldsmith, T., 2021. *Picking up Speed: Digital Maturity in Canadian SMEs — And Why Increasing It Matters*, Toronto, ON, Brookfield Institute for Innovation+Entrepreneurship.

Gonzalez-Zalba, F., T.-Y. Yang, et A. Rossi, 2019. « Manufacturing Silicon Qubits at Scale ». *Physics World* (12 novembre).

Google, s.d. *Educational Resources*. Adresse: https://quantumai.google/education (consulté en décembre 2022).

Gouv. de l'Ont. – Gouvernement de l'Ontario, 1992. *Working With Sectors*, Toronto, ON, Gouv. de l'Ont.

Gouv. des É.-U. – Gouvernement des États-Unis, 2018. *Export Control Reform Act of 2018*, Washington, D.C., Gouv. des É.-U.

Gouv. des É.-U. – Gouvernement des États-Unis, 2022. *Quantum Computing Cybersecurity Preparedness Act*, Washington, D.C., Gouv. des É.-U.

Gouv. du Qc. – Gouvernement du Québec, 2022. *Lancement des zones d'innovation - Des investissements de plus de 435 M$ pour le lancement de Sherbrooke quantique.* Adresse: https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/lancement-des-zones-dinnovation-des-investissements-de-plus-de-435-m-pour-le-lancement-de-sherbrooke-quantique-37725 (consulté en novembre 2022).

Gouv. du R.-U. – Gouvernement du Royaume-Uni, 2021. *The Economic and Innovation Impacts of Trade Secrets*, Londres, Royaume-Uni, Intellectual Property Office.

Grant, R., 2022. *Le gouvernement fédéral propose une nouvelle loi pour renforcer la cybersécurité au Canada.* Adresse: https://mcmillan.ca/fr/perspectives/le-gouvernement-federal-propose-une-nouvelle-loi-pour-renforcer-la-cybersecurite-au-canada/ (consulté en novembre 2022).

Gratton, É., F. Joli-Coeur, A. Nagy, S. Du Perron, D.-N. El Khoury, et M. Vani, 2023. *Consumer Privacy Protection Act (Canada's Bill C-27): Feedback from Industry Participants*, Toronto, ON, Borden Ladner Gervais.

Green, D., H. Soller, Y. Oreg, et V. Galitski, 2021. « How to profit from quantum technology without building quantum computers », *Nature Reviews Physics*, vol. 3, n°3, p. 150-152.

Grewal, S., 2022. « International students for long-term prosperity in Canadian economy: Expanding pathways to permanence for international students in Canada », *Crossings*, vol. 2, n°1.

Growth Market Reports, 2021. *Cryogen Free Dilution Refrigerators Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast.* Adresse: https://growthmarketreports.com/report/cryogen-free-dilution-refrigerators-market-global-industry-analysis (consulté en septembre 2022).

Gunashekar, S., C. d'Angelo, I. Flanagan, D. Motsi-Omoijiade, M. Virdee, et C. Feijao, 2022. *Using Quantum Computers and Simulators in the Life Sciences: Current Trends and Future Prospects*, Santa Monica, CA, RAND Europe.

Guston, D. H., 2008. « Preface », dans Fisher, E., C. Selin et J. M. Wetmore (réd.), *The Yearbook of Nanotechnology in Society: Presenting Futures*, vol. 1, New York, NY, Springer.

GW – Geospatial World, 2019. *Singapore and UK Collaborates to Build Satellite Quantum Key Distribution (QKD) Test Bed.* Adresse: https://www.geospatialworld.net/news/singapore-and-uk-collaborates-to-build-satellite-quantum-key-distribution-qkd-test-bed/ (consulté en juillet 2023).

Hagen, G., S. Scassa, C. Hutchison, M. A. Wilkinson, G. Reynolds, et T. Dagne, 2022. *Canadian Intellectual Property Law: Cases and Materials*. Toronto, ON, Emond Publishing.

Hance, J. R. et J. Rarity, 2021. « Counterfactual ghost imaging », *npj Quantum Information*, vol., n°7, p. 88.

Haroche, S. et J. Raimond, 1996. « Quantum computing: Dream or nightmare? », *Physics Today*, vol. 49, n°8, p. 51.

Harwood, S., C. Gambella, D. Trenev, et A. Simonetto, 2021. *ExxonMobil & IBM Explore Quantum Algorithms to Solve Routing Formulations.* Adresse: https://ibm-research.medium.com/exxonmobil-ibm-scientists-explore-state-of-art-quantum-algorithms-to-solve-routing-formulations-e7ce39f8741c (consulté en mars 2022).

Helm, D., 2006. « Regulatory reform, capture, and the regulatory burden », *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 22, n°2, p. 169-185.

Helpman, E., 1998. « Introduction », dans Helpman, E. (réd.), *General Purpose Technologies and Economic Growth*, Cambridge, MA, MIT Press.

Hemmadi, M., 2022. *Ottawa's Program for Buying From Startups Falling Far Short of Liberal Government's Promise, Financials Show.* Adresse: https://thelogic.co/news/ottawas-program-for-buying-from-startups-falling-far-short-of-liberal-governments-promise-financials-show/ (consulté en novembre 2022).

Hemmadi, M., 2023. *Canada Tries to Build Quantum Advantage with Rollout of $360M National Strategy.* Adresse: https://thelogic.co/news/special-report/canada-tries-to-build-quantum-advantage-with-rollout-of-360m-national-strategy/ (consulté en février 2023).

Henry, F., E. Dua, A. Kobayashi, C. James, P. Li, H. Ramos, et M. S. Smith, 2017. « Race, racialization and Indigeneity in Canadian universities », *Race Ethnicity and Education*, vol. 20, n°3, p. 300-314.

Hindy, Y., J. Pointing, M. Tolunay, S. Venkatarao, M. Motta, et J. A. Latone, 2021. « A quantum computational approach to the open-pit mining problem », *arXiv.*

Hinton, J. W. et M. Witzel, 2023. *Canadian IP is Draining Abroad: That Needs to Stop.* Adresse: https://www.cigionline.org/articles/canadian-ip-is-draining-abroad-that-needs-to-stop/ (consulté en juillet 2023).

Hinton, J. W., M. Witzel, et J. Wajda, 2023. *An Economic Mirage: How Canadian Universities Impact Freedom to Operate*, Waterloo, ON, Centre for International Governance Innovation.

Ho, A., J. McClean, et S. P. Ong, 2018. « The promise and challenges of quantum computing for energy storage », *Joule*, vol. 2, n°5, p. 810-813.

Hoffmann, V. H., T. Trautmann, et J. Hamprecht, 2009. « Regulatory uncertainty: A reason to postpone investments? Not necessarily », *Journal of Management Studies*, vol. 46, n°7, p. 1227-1253.

Hoofnagle, C. J. et S. L. Garfinkel, 2021. *Law and Policy for the Quantum Age*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.

Hou, F., E. Crossman, et G. Picot, 2020. *Two-step Immigration Selection: Why Did Immigrant Labour Market Outcomes Vary by Admission Programs?*, Ottawa, ON, Statistique Canada.

Huang, R., 2020. « Here's Why Quantum Computing Will Not Break Cryptocurrencies ». *Forbes* (21 décembre).

Iacobucci, E. M., 2021. *Examining the Canadian Competition Act in the Digital Era*, Toronto, ON, University of Toronto.

IBM – International Business Machines Corporation, 2018. *Building Your Quantum Capability: The Case for Joining an "Ecosystem"*, New York, NY, IBM.

IBM – International Business Machines Corporation, 2019. *Exploring Quantum Computing Use Cases for Manufacturing*, New York, NY, IBM.

IBM – International Business Machines Corporation, 2020. *Exploring Quantum Computing Use Cases for Healthcare*, New York, NY, IBM.

IBM – International Business Machines Corporation, 2022a. *The Quantum Decade*, New York, NY, IBM.

IBM – International Business Machines Corporation, 2022b. *IBM Research Launches the First Discovery Accelerator in Canada.* Adresse: https://research.ibm.com/blog/quebec-discovery-accelerator (consulté en mai 2022).

IBM – International Business Machines Corporation, s.d.-a. *Modeling Mother Nature to Feed a Growing Citizenry—While Reducing Carbon Emissions.* Adresse: https://research.ibm.com/interactive/5-in-5/nitrogen-fixation/ (consulté en décembre 2022).

IBM – International Business Machines Corporation, s.d.-b. *Qiskit.* Adresse: https://qiskit.org/ (consulté en décembre 2022).

IDQ – ID Quantique, 2018. *Quantum-Safe Security: Relevance for Central Banks*, Genève, Suisse, IDQ.

IDQ – ID Quantique, 2022. *Quantum-Safe Security Solutions for Protecting Healthcare Data Networks.* Adresse: https://www.idquantique.com/quantum-safe-security/applications/healthcare/ (consulté en mai 2022).

IfM, Technology Strategy Board et University of Cambridge, 2014. *Quantum Technologies Roadmap Report*, Cambridge, Royaume-Uni, IfM, Technology Strategy Board et University of Cambridge.

INDU – Comité permanent de l'industrie et de la technologie, 2022a. Témoignages – *Numéro 013, le vendredi 25 mars 2022*, Ottawa, ON, Chambres des Communes Canada.

INDU – Comité permanent de l'industrie et de la technologie, 2022b. *Comment le Canada peut demeurer un chef de file dans le marathon quantique mondial?*, Ottawa, ON, Chambres des Communes Canada.

Inglesant, P., M. Jirotka, et M. Hartswood, 2016. *Thinking Ahead to a World with Quantum Computers: The Landscape of Responsible Research and Innovation in Quantum Computing*, Oxford, Royaume-Uni, Networked Quantum Information Technologies.

INGN – Institut des normes de gouvernance numérique, s.d. *Institut des normes de gouvernance numérique publie une norme nationale pour la gouvernance responsable des données.* Adresse: https://dgc-cgn.org/fr/institut-des-normes-de-gouvernance-numerique-publie-une-norme-nationale-pour-la-gouvernance-responsable-des-donnees/ (consulté en juillet 2023).

INO – L'Institut National d'Optique, s.d. *L'innovation comme force d'action.* Adresse: https://www.ino.ca/fr/qui-nous-sommes/ (consulté en avril 2023).

Inoue, D., A. Okada, T. Matsumori, K. Aihara, et H. Yoshida, 2021. « Traffic signal optimization on a square lattice with quantum annealing », *Scientific Reports*, vol. 11, n°1, p. 3303.

IQ – Institut quantique, s.d. *Sensibilisation.* Adresse: https://www.usherbrooke.ca/iq/ressources/curieux-quantiques/sensibilisation/ (consulté en avril 2023).

IQC – Institute for Quantum Computing, s.d.-a. *Quantum EncrYption and Science Satellite (QEYSSat).* Adresse: https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/qeyssat (consulté en mai 2022).

IQC – Institute for Quantum Computing, s.d.-b. *Outreach and Workshops.* Adresse: https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/outreach-and-workshops (consulté en avril 2023).

IQT – Inside Quantum Technology News, 2019. *QKD Versus PQC — Which One to Use?* Adresse: https://www.insidequantumtechnology.com/quantum-key-distribution-vs-post-quantum-cryptography/ (consulté en avril 2023).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2019a. *Plan ministériel 2019-2020*, Ottawa, ON, ISDE.

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2019b. *Stratégie sur la propriété intellectuelle : Collectif de brevets – Guide du programme*, Ottawa, ON, ISDE.

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2020. *Comité consultatif canadien pour la sécurité des télécommunications (CCCST).* Addresse : https://ised-isde.canada.ca/site/gestion-spectre-telecommunications/fr/savoir-plus/comites-intervenants/conseils-comites/comite-consultatif-canadien-pour-securite-telecommunications-cccst (consulté en novembre 2022).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2021. *Volet Mise à l'essai — Appels ouverts aux prototypes innovants.* Adresse: https://ised-isde.canada.ca/site/solutions-innovatrices-canada/fr/volet-mise-lessai-appels-ouverts-aux-prototypes-innovants (consulté en septembre 2022).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2022a. *Projets financés.* Adresse: https://ised-isde.canada.ca/site/solutions-innovatrices-canada/fr/compagnies-financees-solutions-innovatrices-canada (consulté en juillet 2023).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2022b. *Principales statistiques relatives aux petites entreprises*, Ottawa, ON, ISDE.

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2022c. *Appel à prototypes de détection quantique : Réfrigérateur à dilution à échelle réduite.* Adresse: https://ised-isde.canada.ca/site/solutions-innovatrices-canada/fr/appel-prototypes-detection-quantique-refrigerateur-dilution-echelle-reduite (consulté en septembre 2022).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2022d. *Consultations sur la Stratégie quantique nationale : Ce que nous avons entendu*, Ottawa, ON, ISDE.

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2022e. *Informatique quantique.* Adresse: https://ised-isde.canada.ca/site/solutions-innovatrices-canada/fr/informatique-quantique (consulté en novembre 2022).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2022f. *Les gouvernements du Canada et du Royaume-Uni établissent un partenariat en biofabrication et en sicence quantique.* Adresse: https://www.canada.ca/fr/innovation-sciences-developpement-economique/nouvelles/2023/06/les-gouvernements-du-canada-et-du-royaume-uni-etablissent-un-partenariat-en-biofabrication-et-en-science-quantique.html (consulté en juillet 2023).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2022g. *Le gouvernement du Canada annonce un important investissement dans les industries canadiennes des semi-conducteurs et de la photonique.* Adresse: https://www.canada.ca/fr/innovation-sciences-developpement-economique/nouvelles/2022/02/le-gouvernement-du-canada-annonceun-important-investissement-dans-les-industries-canadiennes-des-semi-conducteurs-et-de-la-photonique.html (consulté en septembre 2022).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2023a. *Volet Mise à l'essai pour le gouvernement.* Adresse: https://ised-isde.canada.ca/site/solutions-innovatrices-canada/fr/volet-mise-lessai-pour-gouvernement (consulté en juillet 2023).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2023b. *Conseil consultatif sur la quantique.* Adresse: https://ised-isde.canada.ca/site/strategie-quantique-nationale/fr/conseil-consultatif-quantique (consulté en août 2023).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2023c. *Défi pour le gouvernement.* Adresse: https://ised-isde.canada.ca/site/solutions-innovatrices-canada/fr/defi-pour-gouvernement (consulté en avril 2023).

ISDE – Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2023d. *Stratégie quantique nationale du Canada*, Ottawa, ON, ISDE.

Jaccobsen, J., 2022. *Canada Silver Cobalt Works Extracts Rubidium.* Adresse: https://www.miningmagazine.com/comminution/news/1424393/canada-silver-cobalt-works-extracts-rubidium (consulté en septembre 2022).

Jaeger, L., 2018. *The Second Quantum Revolution: From Entanglement to Quantum Computing and Other Super-Technologies*. Cham, Suisse, Springer.

Jennewein, T., J. P. Bourgoin, B. Higgins, C. Holloway, E. Meyer-Scott, C. Erven, … R. Laflamme, 2014. *QEYSSAT: A Mission Proposal for a Quantum Receiver in Space*, communication présentée dans le cadre du SPIE OPTO 2014, Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication VII, San Francisco, CA.

Jensen, J. D., N. Carcioppolo, A. J. King, J. K. Bernat, L. Davis, R. Yale, et J. Smith, 2011. « Including limitations in news coverage of cancer research: Effects of news hedging on fatalism, medical skepticism, patient trust, and backlash », *Journal of Health Communication*, vol. 16, n°5, p. 486-503.

Jensen, K., M. A. Skarsfeldt, H. Stærkind, J. Arnbak, M. V. Balabas, S.-P. Olesen, … E. S. Polzik, 2018. « Magnetocardiography on an isolated animal heart with a room-temperature optically pumped magnetometer », *Scientific Reports*, vol. 8, n°1, p. 16218.

Johnson, D. G., 2011. « Software Agents, Anticipatory Ethics, and Accountability », dans Marchant, G. E., B. R. Allenby et J. R. Herkert (réd.), *The Growing Gap Between Emerging Technologies and Legal-Ethical Oversight: The Pacing Problem*, Dordrecht, Les Pays-Bas, Springer Pays-Bas.

Johnson, H., 2021. « Quantum Cryptography Network Spans 4600 km in China ». *PhysicsWorld* (7 janvier).

Johnson, W., 2019. « Governance tools for the second quantum revolution », *Jurimetrics*, vol. 59, n°4, p. 487-522.

Jones, A., 2023. « China is Developing a Quantum Communications Satellite Network ». *SpaceNews* (10 mars).

Jones, H. D., 2015. « Regulatory uncertainty over genome editing », *Nature Plants*, vol. 1, n°1, p. 14011.

Judge, P., 2022. « Why Do We Need a Quantum Internet? ». *Data Center Dynamics* (janvier).

Kaartosalmi, M., 2021. *Legal Issues Regarding Helium-3 — The Solution to the World's Energy Crisis*, Turku, Finland, Université de Turku.

Kantsepolsky, B., I. Aviv, R. Weitzfeld, et E. Bordo, 2023. « Exploring quantum sensing potential for systems applications », *IEEE Access*, vol. 11, p. 31569-31582.

Kaur, M. et A. Venegas-Gomez, 2022. « Defining the quantum workforce landscape: A review of global quantum education initiatives », *Optical Engineering*, vol. 61, n°8, p. 081806.

Kaye, D., 2015. *Rapport du Rapporteur spécial sur la promotion et la protection du droit à la liberté d'opinion et d'expression, David Kaye*, Genève, Suisse, Conseil des droits de l'homme.

Kazmi, N., 2022. *Diversity, Equity and Inclusion Within STEM in Canada: A Literature Review*, Victoria, BC, Université de Victoria.

Kearney, J. J. et C. A. Perez-Delgado, 2021. « Vulnerability of blockchain technologies to quantum attacks », *Array*, vol. 10, p. 100065.

Kelley, A., 2023. « NIST Releases Draft Post-Quantum Encryption Document ». *Nextgov* (25 avril).

Khan, I., B. Heim, A. Neuzner, et C. Marquardt, 2018. « Satellite-based QKD », *Optics & Photonics News*, vol. 29, n°2, p. 26-33.

Kim, M., D. Venturelli, et K. Jamieson, 2020. « Leveraging Quantum Annealing for Large MIMO Processing in Centralized Radio Access Networks », *arXiv:* doi.org/10.1145/3341302.3342072.

Kim, Y., A. Eddins, S. Anand, K. X. Wei, E. van den Berg, S. Rosenblatt, … A. Kandala, 2023. « Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance », *Nature*, vol. 618, n°7965, p. 500-505.

Kitai, K., J. Guo, S. Ju, S. Tanaka, K. Tsuda, J. Shiomi, et R. Tamura, 2020. « Designing metamaterials with quantum annealing and factorization machines », *Physical Review Research*, vol. 2, n°1, p. 013319.

Kjølberg, K. L. et R. Strand, 2011. « Conversations about responsible nanoresearch », *Nanoethics*, vol. 5, n°1, p. 99-113.

Klar, M., P. Schworm, X. Wu, M. Glatt, et J. C. Aurich, 2022. « Quantum annealing based factory layout planning », *Manufacturing Letters*, vol. 32, p. 59-62.

Koller, J. S., 2019. *The Future of Ubiquitous, Real-Time Intelligence: A GEOINT Singularity*, El Segundo,CA, Aerospace Corporation.

Kop, M., 2020. « Regulating transformative technology in the quantum age: Intellectual property, standardization & sustainable innovation », *Transatlantic Antitrust and IPR Developments*, vol. , n°2, p. 17-42.

Kop, M., 2021a. *Establishing a Legal-Ethical Framework for Quantum Technology.* Adresse: https://yjolt.org/blog/establishing-legal-ethical-framework-quantum-technology (consulté en avril 2022).

Kop, M., 2021b. « Quantum computing and intellectual property law », *Berkeley Technology Law Journal*, vol. 33, n°3, p. 101-115.

Kop, M., 2021c. *Why We Need to Consider the Ethical Implications of Quantum Technologies.* Adresse: https://physicsworld.com/a/why-we-need-to-consider-the-ethical-implications-of-quantum-technologies/ (consulté en avril 2022).

Kop, M. et M. Brongersma, 2021. *Integrating Bespoke IP Regimes for Quantum Technology into National Security Policy*, Stanford, CA, Stanford University.

Kop, M., M. Aboy, et T. Minssen, 2022. « Intellectual property in quantum computing and market power: A theoretical discussion and empirical analysis », *Journal of Intellectual Property Law & Practice*, vol. 17, n°8, p. 613-628.

Kop, M., M. Aboy, E. De Jong, U. Gasser, T. Minssen, I. G. Cohen, … R. Laflamme, 2023. *Towards Responsible Quantum Technology: Safeguarding, Engaging and Advancing Quantum R&D*, Stanford, CA, Stanford University.

Kop, M., s.d. *Quantum ELSPI: Ethical, Legal, Social and Policy Implications of Quantum Technology.* Adresse: https://link.springer.com/collections/eiebhdhagd (consulté en février 2023).

KPMG Australia et Sydney Quantum Academy, 2021. *Responsible Quantum: Starting the Conversation*, Sydney, Australie, KPMG.

Kramer, H. J., 2022. *QKDSat (Quantum Key Distribution Satellite).* Adresse: https://www.eoportal.org/satellite-missions/qkdsat#qkdsat-quantum-key-distribution-satellite (consulté en juillet 2023).

Krelina, M., 2021. « Quantum technology for military applications », *EPJ Quantum Technology*, vol. 8, n°1, p. 24.

Krishnamurthy, V., 2022. « Quantum technology and human rights: An agenda for collaboration », *Quantum Science and Technology*, vol. 7, n°4, p. 1-7.

Kundu, O., A. D. James, et J. Rigby, 2020. « Public procurement and innovation: A systematic literature review », *Science and Public Policy*, vol. 47, n°4, p. 490-502.

Landauer, R., M. E. Welland, et J. K. Gimzewski, 1995. « Is quantum mechanics useful? », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, vol. 353, n°1703, p. 367-376.

Langione, M., J.-F. Bobier, C. Meier, S. Hasenfuss, et U. Schulze, 2019a. *Will Quantum Computing Transform Biopharma R&D?*, Boston, MA, Boston Consulting Group.

Langione, M., C. Tillemann-Dick, A. Kumar, et V. Taneja, 2019b. *Where Will Quantum Computers Create Value — and When?*, Boston, MA, Boston Consulting Group.

Langione, M., J.-F. Bobier, L. Krayer, H. Park, et A. Kumar, 2022. *The Race to Quantum Advantage Depends on Benchmarking.* Adresse: https://www.bcg.com/publications/2022/value-of-quantum-computing-benchmarks (consulté en avril 2022).

Laucht, A., F. Hohls, N. Ubbelohde, M. Fernando Gonzalez-Zalba, D. J. Reilly, S. Stobbe, … J. Baugh, 2021. « Roadmap on quantum nanotechnologies », *Nanotechnology*, vol. 32, n°16, p. 162003.

Leckel, A., S. Veilleux, et L. P. Dana, 2020. « Local open innovation: A means for public policy to increase collaboration for innovation in SMEs », *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 153, p.

Lee, K. et H. J. Jung, 2021. « Does TTO capability matter in commercializing university technology? Evidence from longitudinal data in South Korea », *Research Policy*, vol. 50, n°1, p. 104133.

Lee, K. B. et T. A. Serles, 2021. « IBM-HBCU Quantum Center: A model for industry-academic partnerships to advance the creation of a diverse, quantum aware workforce », *arXiv*: doi.org/10.48550/arXiv.2109.00898.

Lee, S., J. Lee, H. Zhai, Y. Tong, A. M. Dalzell, A. Kumar, … G. K.-L. Chan, 2023. « Evaluating the evidence for exponential quantum advantage in ground-state quantum chemistry », *Nature Communications*, vol. 14, n°1, p. 1952.

Levine, D. S. et T. Sichelman, 2019. « Why do startups use trade secrets? », *Notre Dame Law Review*, vol. 94, n°2, p. 751-820.

LIGO Caltech – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, California Institute of Technology, s.d. *What is an Interferometer*? Adresse: https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer (consulté en février 2023).

Lipsey, R. G., C. Bekar, et K. Carlaw, 1998. « What Requires Explanation? », dans Helpman, E. (réd.), *General Purpose Technologies and Economic Growth*, Cambridge, MA, MIT Press.

Lipsey, R. G., Kenneth I. Carlaw, et C. T. Bekar, 2005. *Economic transformations: General purpose technologies and long-term economic growth*. New York, NY, Oxford University Press.

Liu, K. S., A. Henning, M. W. Heindl, R. D. Allert, J. D. Bartl, I. D. Sharp, … D. B. Bucher, 2022. « Surface NMR using quantum sensors in diamond », *PNAS*, vol. 119, n°5, p. e2111607119.

Lobe, E. et T. Stollenwer, 2019. *Flight Gate Assignment with a Quantum Annealer*, communication présentée dans le cadre du Qubits Europe 2019, Milan, Italie.

Macnaghten, P., R. Owen, et R. Jackson, 2016. « Synthetic biology and the prospects for responsible innovation », *Essays in Biochemistry*, vol. 60, n°4, p. 347-355.

MacQuarrie, E. R., C. Simon, S. Simmons, et E. Maine, 2020. « The emerging commercial landscape of quantum computing », *Nature Reviews Physics*, vol. 2, p. 596-598.

Madsen, L. S., F. Laudenbach, M. F. Askarani, F. Rortais, T. Vincent, J. F. F. Bulmer, … J. Lavoie, 2022. « Quantum computational advantage with a programmable photonic processor », *Nature*, vol. 606, n°7912, p. 75-81.

Mahboubi, P., 2022. *The Knowledge Gap: Canada Faces a Shortage in Digital and STEM Skills*, Toronto, ON, C.D. Howe Institute.

Maine, E. et E. Garnsey, 2006. « Commercializing generic technology: The case of advanced materials ventures », *Research Policy*, vol. 35, p. 375–393.

Malik, M., E. Agudelo, et R. Kunjwal, 2022. « Quantum researcher mobility: The wonderful wizard of Oz who paid for Dorothy's visa fees », *Quantum Science and Technology*, vol. 7, n°3, p. 034005.

Mallah, T., 2021a. *Lockheed Martin se joint à l'Espace IBM Quantique de l'Institut quantique.* Adresse: https://www.usherbrooke.ca/iq/actualites/nouvelles/lockheed-martin-se-joint-a-lespace-ibm-quantique-de-linstitut-quantique/ (consulté en novembre 2022).

Mallah, T., 2021b. *L'Espace IBM Q de l'Institut Quantique entame son premier projet d'apprentissage-machine quantique grâce à une collaboration avec Statistique Canada.* Adresse: https://www.usherbrooke.ca/iq/actualites/nouvelles/lespace-ibm-q-de-linstitut-quantique-entame-son-premier-projet-dapprentissage-machine-quantique-grace-a-une-collaboration-avec-statistique-canada/ (consulté en novembre 2022).

Mamiya, A., K. Tanaka, S. Yokote, M. Sasaki, M. Fujiwara, M. Tanaka, … Y. Katagiri, 2022. *Satellite-based QKD for Global Quantum Cryptographic Network Construction*, communication présentée dans le cadre virtuel du 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS).

Mandelbaum, R., 2023. *A New Paper from IBM and UC Berkeley Shows a Path Toward Useful Quantum Computing.* Adresse: https://research.ibm.com/blog/utility-toward-useful-quantum (consulté en juillet 2023).

Manin, Y. I., 1980. *Computable and Uncomputable*. Moscou, Russie, Sovetskoye Radio.

Mantha, Y. et L. Turner, 2023. *The Canadian Quantum Ecosystem Report 2023*, Surrey, C.-B., Quantum Algorithms Institute.

Marco, L. et U. Jeffrey, 2015. *Space-based Quantum Sensing for Low-power Detection of Small Targets*, communication présentée dans le cadre du 2015 SPIE Defense + Security, 946115, Baltimore, MD.

Martin, V., J. P. Brito, C. Escribano, M. Menchetti, C. White, A. Lord, … D. López, 2021. « Quantum technologies in the telecommunications industry », *EPJ Quantum Technology*, vol. 8, n°1, p. 19.

Masiowski, M., N. Mohr, H. Soller, et M. Zesko, 2022. *Quantum Computing Funding Remains Strong, but Talent Gap Raises Concern.* Adresse: https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-funding-remains-strong-but-talent-gap-raises-concern (consulté en novembre 2022).

Mathas, C., 2022. *Germany Expands its Quantum Computing Roadmap with QuaST.* Adresse: https://quantumcomputingreport.com/germany-expands-its-quantum-computing-roadmap-with-quast/ (consulté en février 2023).

Matthews, M., F. Rice, et T. Quan, 2021. *L'innovation responsable au Canada et ailleurs : Comprendre et améliorer les impacts sociaux de la technologie*, Ottawa, ON, Conseil des technologies de l'information et des communications.

Maufe, Z., 2021. *Google Cloud Study: Cloud Adoption Increasing in Financial Services, but Regulatory Hurdles Remain.* Adresse: https://cloud.google.com/blog/topics/inside-google-cloud/new-study-shows-cloud-adoption-increasing-in-financial-services (consulté en avril 2023).

Mazzucato, M., 2018. « Mission-oriented innovation policies: Challenges and opportunities », *Industrial and Corporate Change*, vol. 27, n°5, p. 803-805.

McCarty, N., 2013. « Complexity, Capacity, and Capture », dans Carpenter, D. et D. A. Moss (réd.), *Preventing Regulatory Capture: Special Interest Influence and How to Limit it*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.

McKenna, M. P., 2006. « Intellectual property, privatization and democracy: A response to Professor Rose », *Saint Louis University Law Journal*, vol. 50, n°3, p. 829-842.

McKeown, R. J., 2017. *An Overview of the Canadian Banking System: 1996 to 2015*, Kingston, ON, Université Queen's.

McKinsey, 2022. *The Quantum Technology Monitor*, New York, NY, McKinsey & Company.

McPhail, B., 2022. Déclaration sur l'utilisation de logiciels espions par la GRC. Adresse : https://ccla.org/fr/press-release/statement-on-the-rcmps-use-of-spyware/ (consulté en septembre 2022).

MDN – Ministère de la Défense nationale, 2023. *Le saut quantique : technologies de détection de rétrécissement pour les opérations sur le terrain.* Adresse: https://www.canada.ca/fr/ministere-defense-nationale/programmes/idees-defense/element/projets-competitifs/challenges/saut-quantique-technologies-detection-retrecissement-operations-terrain.html (consulté en juin 2023).

MDN et FAC – Ministère de la Défense nationale et des Forces armées canadiennes, 2021. *Stratégie S et T quantique du ministère de la Défense nationale et des Forces armées canadiennes : se préparer à des ruptures technologiques dans l'environnement opérationnel futur*, Ottawa, ON, MDN et FAC.

MDN et FAC – Ministère de la Défense nationale et des Forces armées canadiennes, 2023. *Quantum 2030: Plan de mise en œuvre de la stratégie des sciences et technologies quantiques*, Ottawa, ON, MDN et FAC.

Meckling, J. et J. Nahm, 2018. « When do states disrupt industries? Electric cars and the politics of innovation », *Review of International Political Economy*, vol. 25, n°4, p. 505-529.

Meige, A., R. Eagar, et L. Könnecke, 2022. *Quantum Computing - State of Play and What it Means for Business*, Boston, MA, Arthur D. Little.

Metz, C., 2018. « The Next Tech Talent Shortage: Quantum Computing Researchers ». *New York Times* (21 octobre).

Microsoft, 2022. *Azure Quantum Cloud Service.* Adresse: https://azure.microsoft.com/en-ca/services/quantum/#features (consulté en mai 2022).

Miller, S., 2022. *Combler le fossé : le rôle des intermédiaires de l'innovation au Canada*, Ottawa, ON, Mitacs.

Mitacs, 2021. *2021–22 Corporate Plan for Innovation, Science, and Economic Development Canada*, N.l., Mitacs.

Monroe, C., D. M. Meekhof, B. E. King, W. M. Itano, et D. J. Wineland, 1995. « Demonstration of a fundamental quantum logic gate », *Physical Review Letters*, vol. 75, n°25, p. 4714-4717.

Moody, G., V. J. Sorger, D. J. Blumenthal, P. W. Juodawlkis, W. Loh, C. Sorace-Agaskar, ... R. M. Camacho, 2022. « 2022 Roadmap on integrated quantum photonics », *Journal of Physics: Photonics*, vol. 4, n°1, p. 012501.

Mosca, M. et B. Munson, s.d. *The Quantum Threat to Cyber Security.* Adresse: https://www.cigionline.org/articles/quantum-threat-cyber-security/ (consulté en août 2022).

Mott, A., J. Job, J.-R. Vlimant, D. Lidar, et M. Spiropulu, 2017. « Solving a Higgs optimization problem with quantum annealing for machine learning », *Nature*, vol. 550, n°7676, p. 375-379.

Mulligan, V. K., H. Melo, H. I. Merritt, S. Slocum, B. D. Weitzner, A. M. Watkins, ... R. Bonneau, 2019. « Designing peptides on a quantum computer », *bioRxiv*, p. 752485.

Nachman, B., D. Provasoli, W. A. de Jong, et C. W. Bauer, 2021. « Quantum algorithm for high energy physics simulations », *Physical Review Letters*, vol. 126, n°6, p. 062001.

Nakamura, Y., Y. A. Pashkin, et J. S. Tsai, 1999. « Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box », *Nature*, vol. 398, p. 786-788.

NanoFabNet, 2021. *Nanofabrication Competence Map: Infrastructures, Knowlege & Skills*, Bruxelles, Belgique, NanoFabNet.

NASA – National Aeronautics and Space Administration, 2017. *Quantum Computer Project*, Moffett Field, CA, NASA.

NASEM – National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019. *Quantum Computing: Progress and Prospects*, Washington, D.C., The National Academies Press.

Nazareth, D. P. et J. D. Spaans, 2015. « First application of quantum annealing to IMRT beamlet intensity optimization », *Physics in Medicine and Biology*, vol. 60, n°10, p. 4137-4148.

NCSC – National Cyber Security Centre, 2020. *Quantum Security Technologies.* Adresse: https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/quantum-security-technologies (consulté en avril 2023).

Neukart, F., G. Compostella, C. Seidel, D. von Dollen, S. Yarkoni, et B. Parney, 2017. « Traffic flow optimization using a quantum annealer », *Frontiers in ICT*, vol. 4.

Neumann, N. M. P., M. P. P. v. Heesch, F. Phillipson, et A. A. P. Smallegange, 2021. *Quantum Computing for Military Applications*, communication présentée dans le cadre du 2021 International Conference on Military Communication and Information Systems (ICMCIS), Oeiras, Portugal et virtuel.

Nickel, R., 2022. *Canada's Saskatchewan Province Gets Lift From Record Helium Activity.* Adresse: https://www.reuters.com/business/energy/canadas-saskatchewan-province-gets-lift-record-helium-activity-2022-01-18/ (consulté en septembre 2022).

NIEHS – National Institute of Environmental Health Sciences, 2021. *Nanomaterials.* Adresse: https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/sya-nano/index.cfm (consulté en novembre 2022).

NIEHS – National Institute of Environmental Health Sciences, 2022. *Nano Environmental Health and Safety (Nano EHS*). Adresse: https://www.niehs.nih.gov/research/supported/exposure/nanohealth/index.cfm (consulté en novembre 2022).

Niraula, D., J. Jamaluddin, M. M. Matuszak, R. K. T. Haken, et I. E. Naqa, 2021. « Quantum deep reinforcement learning for clinical decision support in oncology: Application to adaptive radiotherapy », *Scientific Reports*, vol. 11, n°1, p. 23545.

NIST – National Institute of Standards and Technology, 2022. *PQC Standardization Process: Announcing Four Candidates to be Standardized, Plus Fourth Round Candidates.* Adresse: https://csrc.nist.gov/News/2022/pqc-candidates-to-be-standardized-and-round-4 (consulté en avril 2023).

NIST – National Institute of Standards and Technology, s.d. *De-Identification.* Adresse: https://csrc.nist.gov/glossary/term/de_identification (consulté en mai 2023).

NQCC, 2022. « Early adopters position themselves for quantum advantage ». *Physics World* (16 juin).

NQCO – National Quantum Coordination Office, 2022. *Summary of Workshop on Quantum Recruitment in the Federal Government*, Washington, D.C., White House Office of Science and Technology Policy.

NQIAC – National Quantum Initiative Advisory Committee, s.d. *National Quantum Initiative Advisory Committee.* Adresse: https://www.quantum.gov/about/nqiac/ (consulté en février 2022).

NSA – National Security Agency, 2021. *FAQ: Quantum Computing and Post-Quantum Cryptography.* Adresse: https://media.defense.gov/2021/Aug/04/2002821837/-1/-1/1/Quantum_FAQs_20210804.PDF (consulté en juillet 2023).

NSA – National Security Agency, s.d. *Quantum Key Distribution (QKD) and Quantum Cryptography (QC).* Adresse: https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/ (consulté en septembre 2022).

NSTC-SCQIS – National Science & Technology Council Subcommittee on Quantum Information Science, 2022. *Quantum Information Science and Technology Workforce Development National Strategic Plan*, Washington, D.C., NSTC.

Nurminen, J. K., A. Meijer, I. Salmenperä, et L. Becker, 2022. « The next bottleneck after quantum hardware will be quantum software », *ERCIM News*, vol. 1, n°128, p. 9-12.

NVIDIA, 2023. *NVIDIA, Rolls-Royce and Classiq Announce Quantum Computing Breakthrough for Computational Fluid Dynamics in Jet Engines.* Adresse: https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-rolls-royce-and-classiq-announce-quantum-computing-breakthrough-for-computational-fluid-dynamics-in-jet-engines (consulté en juin 2023).

NWA – Nationale Wetenschapsagenda, 2021. *NWA Makes 2.8 Million Euros Available for Research into Impact of Quantum Technology on Society.* Adresse: https://www.nwo.nl/en/news/nwa-makes-28-million-euros-available-research-impact-quantum-technology-society (consulté en décembre 2022).

O'Shea, D., 2022. « A Closer Look at the Quantum Technology Manufacturing Roadmap Effort ». *Inside Quantum Technology News* (1 juillet).

O'Malley, D., 2018. « An approach to quantum-computational hydrologic inverse analysis », *Scientific Reports*, vol. 8, n°1, p. 6919.

Oberhaus, D., 2020. « NASA's Plan to Turn the ISS Into a Quantum Laser Lab ». *WIRED* (22 avril).

Obermeyer, Z., B. Powers, C. Vogeli, et S. Mullainathan, 2019. « Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations », *Science*, vol. 366, n°6464, p. 447-453.

OCDE – Organisation de coopération et de développement économiques, 2017. *Public Procurement for Innovation: Good Practices and Strategies*, Paris, France, OCDE.

OCDE – Organisation de coopération et de développement économiques, 2021a. *La transformation digitale des PME*, Paris, France, OCDE.

OCDE – Organisation de coopération et de développement économiques, 2021b. Études économiques de l›OCDE : Canada *2021*, Paris, France, OCDE.

OCDE – Organisation de coopération et de développement économiques, s.d. *Government at a Glance — 2021 Edition: Public Procurement.* Adresse : https://stats.oecd.org/Index.aspx?QueryId=107593 (consulté en septembre 2022).

OEB – Office européen des brevets, 2017. *Preuves de l'importance des brevets pour les PME.* Adresse: https://www.epo.org/about-us/annual-reports-statistics/annual-report/2017/highlights/importance-of-patents-for-smes_fr.html (consulté en avril 2023).

OEB – Office européen des brevets, 2023. *Directives relatives à l'examen pratiqué à l'Office européen des brevets.* Adresse: https://new.epo.org/fr/legal/guidelines-epc (consulté en juillet 2023).

OGGO – Comité permanent des opérations gouvernementales et des prévisions budgétaires, 2018. *Modernisation des marchés publics fédéraux pour les petites et moyennes entreprises, les entreprises appartenant à des femmes et les entreprises autochtones*, Ottawa, ON, Chambre des Communes Canada.

Ohm, P., 2010. « Broken promises of privacy: Responding to the surprising failure of anonymization », *UCLA Law Review,* vol. 57, p. 1701–1777.

OMC – Organisation mondiale du commerce, 1947. *Accord Général sur les Tarifs Douaniers et le Commerce*, Genève, Suisse, OMC.

OMC – Organisation mondiale du commerce, s.d. Accord sur les ADPIC : Aperçu. Adresse: https://www.wto.org/french/tratop_f/trips_f/intel2_f.htm - :~:text=The%2520TRIPS%2520Agreement%2520requires%2520Member,novelty%252C%2520inventiveness%2520and%2520industrial%2520applicability (consulté en juillet 2023).

OMPI – Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, 2012. *Travaux futurs sur les éléments de flexibilité relatifs aux brevets dans le cadre juridique multilatéral*, Genève, Suisse, OMPI.

OpenQKD, s.d.-a. *Objectives.* Adresse: https://openqkd.eu/objectives/ (consulté en avril 2023).

OpenQKD, s.d.-b. *OPENQKD - Open European Quantum Key Distribution Testbed*. Adresse: https://qt.eu/projects/communication/openqkd (consulté en juin 2023).

OPIC – Office de la propriété intellectuelle du Canada, 2020. *Objet brevetable en vertu de la Loi sur les brevets.* Adresse : https ://ised-isde.canada.ca/site/office-propriete-intellectuelle-canada/fr/objet-brevetable-vertu-loi-brevets (consulté en juillet 2023).

Optica, 2022. « Compact QKD System Paves the Way to Cost-effective Satellite-based Quantum Networks ». *ScienceDaily* (18 août).

Ornston, D., 2012. *When Small States Make Big Leaps: Institutional Innovation and High-Tech Competition in Western Europe*. Ithaca, NY, Cornell University Press.

Orus, R., S. Mugel, et E. Lizaso, 2019. « Quantum computing for finance: Overview and prospects », *arXiv*:1807.03890v03892.

Outka, U., 2012. « Environmental law and fossil fuels: Barriers to renewable energy », *Vanderbilt Law Review*, vol. 65, n°6, p. 1679-1721.

Owen, R. et M. Pansera, 2019. « Responsible Innovation and Responsible Research and Innovation », dans Simon, D., S. Kuhlmann, J. Stamm et W. Canzler (réd.), *Handbook on Science and Public Policy*, Cheltenham, Royaume-Uni, Edward Elgar Publishing.

PAC – Pierre Audoin Consultants, 2019. *Quantum Computing State of the Art, Part 2: Value Chain and Market Players*, Paris, France, Software and IT Services Industry.

Pakela, J. M., H.-H. Tseng, M. M. Matuszak, R. K. Ten Haken, D. L. McShan, et I. El Naqa, 2020. « Quantum-inspired algorithm for radiotherapy planning optimization », *Medical Physics*, vol. 47, n°1, p. 5-18.

Palacios-Berraquero, C., L. Mueck, et D. M. Persaud, 2019. « Instead of 'supremacy' use 'quantum advantage' », *Nature*, vol. 576, p. 213.

Pan, F., K. Chen, et P. Zhang, 2022. « Solving the sampling problem of the sycamore quantum circuits », *arXiv*:2111.03011v03012.

Pang, X.-L., Ai-Lin Yang, C.-N. Zhang, J.-P. Dou, H. Li, J. Gao, et X.-M. Jin, 2020. « Hacking quantum key distribution via injection locking », *arXiv*, 1902.10423v10423.

Parker, E., 2021. *Commercial and Military Applications and Timelines for Quantum Technology*, Santa Monica, CA, RAND Corporation.

Parker, E., D. Gonzales, A. K. Kochhar, S. Litterer, K. O'Connor, J. Schmid, … S. W. Harold, 2022. *An Assessment of the U.S. and Chinese Industrial Bases in Quantum Technology*, Santa Monica, CA, RAND Corporation.

Parlement du Canada, s.d. *Loi concernant la cybersécurité, modifiant la Loi sur les télécommunications et apportant des modifications corrélatives à d'autres lois.* Adresse : https://www.parl.ca/legisinfo/fr/projet-de-loi/44-1/c-26 (consulté en juillet 2023).

Parsons, C., 2022. *Cybersecurity Will Not Thrive in Darkness: A Critical Analysis of Proposed Amendments in Bill C-26 to the Telecommunications Act*, Toronto, ON, University of Toronto.

Parveen, N. et J. Waterson, 2020. *UK Phone Masts Attacked Amid 5G-Coronavirus Conspiracy Theory.* Adresse: https://www.theguardian.com/uk-news/2020/apr/04/uk-phone-masts-attacked-amid-5g-coronavirus-conspiracy-theory (consulté en avril 2023).

Patra, B., R. M. Incandela, J. P. G. van Dijk, H. A. R. Homulle, L. Song, M. Shahmohammadi, … E. Charbon, 2018. « Cryo-CMOS Circuits and systems for quantum computing applications », *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 53, n°1, p. 309-321.

PCTC — le Groupe de travail sur la protection cybernétique des télécommunications canadiennes, 2020. *Politique sur les pratiques exemplaires en matière de sécurité pour les fournisseurs canadiens de services de télécommunications.* Ottawa, ON, PCTC.

Perrier, E., 2022. « The quantum governance stack: Models of governance for quantum information technologies », *Digital Society*, vol. 1, n°3, p. 22.

PINQ² – Plateforme d'innovation numérique et quantique du Québec, 2023. *Quebec's Platform for Digital and Quantum Innovation Adds the Country's First IBM Quantum System One To Its HPC and Accelerated Discovery Capabilities.* Adresse: https://www.newswire.ca/news-releases/the-platform-for-digital-and-quantum-innovation-of-quebec-adds-to-its-service-offering-the-capabilities-of-the-quantum-computer-of-quebec-whose-c-onception-and-approach-represent-a-world-unique-formula-on-many-levels-848401892.html (consulté en juillet 2023).

Platt, B., 2023. *IBM and Canada to Unveil Chips Pact During Biden-Trudeau Visit.* Adresse: https://financialpost.com/pmn/business-pmn/ibm-and-canada-to-unveil-chips-pact-during-biden-trudeau-visit (consulté en avril 2023).

Popkin, G., 2016, 1 décembre. « Scientists are Close to Building a Quantum Computer that Can Beat a Conventional One ». *Science.*

Preskill, J., 2018. « Quantum computing in the NISQ era and beyond », *Quantum*, vol. 2.

Prisco, J., 2020. « To QKD Or Not To QKD: What Quantum Key Distribution Means For Business ». *Forbes* (18 décembre).

Pultarova, T., 2021. *UK company to start sending secret quantum keys with satellites in 2023.* Adresse: https://www.space.com/arqit-quantum-key-distribution-space (consulté en juillet 2023).

Q-12 Partnership — National Q-12 Education Partnership, s.d. *About.* Adresse : https://q12education.org/about (consulté en juillet 2023).

Q-STAR — Quantum STrategic Alliance for Revolution, s.d.-a. *Q-STAR.* Adresse : https://qstar.jp/en (consulté en février 2023).

Q-STAR — Quantum STrategic Alliance for Revolution, s.d.-b. *Activities.* Adresse : https://qstar.jp/en/activity (consulté en février 2023).

QCR – Quantum Computing Report, 2022a. *Venture Capital–Sorted by Quantum Company.* Adresse: https://quantumcomputingreport.com/venture-capital-sorted-by-company/ (consulté en avril 2022).

QCR – Quantum Computing Report, 2022b. *Quantum Lessons Learned at the Port of Los Angeles.* Adresse: https://quantumcomputingreport.com/quantum-lessons-learned-at-the-port-of-los-angeles/ (consulté en avril 2023).

QCR – Quantum Computing Report, 2022c. *DARPA Awards Contracts for the Quantum Benchmarking Program.* Adresse: https://quantumcomputingreport.com/darpa-awards-contracts-for-the-quantum-benchmarking-program/ (consulté en avril 2023).

QDNL – Quantum Delta Nederland, 2019. *National Agenda for Quantum Technology*, Delft, Netherlands, QDNL.

QDNL – Quantum Delta Nederland, 2020. *Economic Impact of Quantum in The Netherlands*, Delft, Netherlands, QDNL.

QED-C – Quantum Economic Development Consortium, 2020a. *Goals.* Adresse: https://quantumconsortium.org/goals/ (consulté en février 2023).

QED-C – Quantum Economic Development Consortium, 2020b. *Purposes.* Adresse: https://quantumconsortium.org/purpose/ (consulté en février 2023).

QED-C – Quantum Economic Development Consortium, 2020c. *Our Mission.* Adresse: https://quantumconsortium.org/#our-mission (consulté en février 2023).

QED-C – Quantum Economic Development Consortium, 2022a. *Challenges and Opportunities for Securing a Robust US Quantum Computing Supply Chain*, St. Paul, MN, QED-C.

QED-C – Quantum Economic Development Consortium, 2022b. *Quantum Sensing Use Cases*, Menlo Park, CA, SRI International.

QED-C – Quantum Economic Development Consortium, 2022c. *Public-Private Partnerships in Quantum Computing: The Potential for Accelerating Near-Term Quantum Applications*, Arlington, VA, QED-C.

QED-C – Quantum Economic Development Consortium, 2023a. *Quantum Consortia QIC, QED-C, Q-STAR and QuIC Form International Council to Enable and Grow the Global Quantum Industry.* Adresse: https://quantumconsortium.org/quantum-consortia-qic-qed-c-q-star-and-quic-form-international-council-to-enable-and-grow-the-global-quantum-industry/ (consulté en févier 2023).

QED-C – Quantum Economic Development Consortium, 2023b. *QED-C Releases New Paper Highlighting Major Enhancements to Its Benchmarking Suite.* Adresse: https://quantumconsortium.org/qed-c-releases-new-paper-highlighting-major-enhancements-to-its-benchmarking-suite/ (consulté en avril 2023).

QIC – L'Industrie Quantique Canada, 2020. *Quantum Industry Canada.* Adresse : https://www.quantumindustrycanada.ca/fr/ (consulté en novembre 2022).

QTEdu – Quantum Technology Education, 2022. *Qualification Profiles for Quantum Technology.* Adresse : https://qtedu.eu/qualification-profiles-quantum-technologies (consulté en avril 2023).

QTEdu – Quantum Technology Education, s.d.-a. *Quantum Technology Education.* Adresse: https://qtedu.eu/ (consulté en avril 2023).

QTEdu – Quantum Technology Education, s.d.-b. *Why QTEdu Csa.* Adresse: https://qtedu.eu/why-qtedu-csa (consulté en décembre 2022).

QTEdu – Quantum Technology Education, s.d.-c. *Pilot Projects.* Adresse: https://qtedu.eu/qtedu-european-pilot-projects (consulté en décembre 2022).

QuantERA, s.d. *D6.2 Guidelines in Responsible Research and Innovation in QT*, Kraków, Pologne, National Science Centre.

QuantLR, 2021. *QuantLR Partners With SpeQtral To Develop A Complete Space and Terrestrial QKD Solution To Protect Against Future Quantum Computer Attacks.* Adresse: https://quantlr.com/news/space-and-terrestrial-qkd-announcement/ (consulté en juillet 2023).

Quantum-Safe Canada, s.d. *Quantum Readiness Toolkit Made Available by World Economic Forum (WEF) Centre for Cybersecurity.* Adresse: https://quantum-safe.ca/news/ (consulté en juin 2023).

Quantum Alberta, 2022. *Annual Report 2021-2022*, Calgary, AB, Quantum Alberta.

Quantum BC, 2022. *Quantum BC.* Adresse: http://quantum-bc.ca/ (consulté en mai 2022).

Quantum BC, s.d. *NSERC CREATE in Quantum Computing.* Adresse : https://quantum-bc.ca/quantum-computing-program/ (consulté en juillet 2023).

Quantum Flagship, 2017. *L'initiative phare de L'UE en matière de technologies quantiques*, Bruxelles, Belgique, Commission européenne.

Quantum Flagship, s.d. *Fertilizer and Other Quantum Computer Chemistry.* Adresse: https://qt.eu/discover-quantum/applications-of-qt/fertilizer-and-other-quantum-computer-chemistry/ (consulté en décembre 2022).

Québec Quantique, s.d. *Les Initiatives et Projets de l'Écosystème.* Adresse : https://quebec-quantique.ca/initiatives/ (consulté en avril 2023).

QuIC – European Quantum Industry Consortium, s.d.-a. *QuIC in a nutshell.* Adresse: https://www.euroquic.org/about-quic/ (consulté en décembre 2022).

QuIC – European Quantum Industry Consortium, s.d.-b. *Working Groups.* Adresse: https://www.euroquic.org/working-groups/ (consulté en février 2023).

QuIC – European Quantum Industry Consortium, s.d.-c. *Working Groups.* Adresse: https://www.euroquic.org/working-groups/ (consulté en décembre 2022).

QUTAC, A. Bayerstadler, G. Becquin, J. Binder, T. Botter, H. Ehm, … F. Winte, 2021. « Industry quantum computing applications », *EPJ Quantum Technology*, vol. 8, n°25.

QVI – Quantum Valley Investments, 2022. *Quantum Valley Investments — The Fund.* Adresse: https://quantumvalleyinvestments.com/the-fund/ (consulté en mai 2022).

Racorean, O., 2014. « Decoding stock market behavior with the topological quantum computer », *arXiv*: doi.org/10.48550/arXiv.1406.3531.

Rand, L. et T. Rand, 2022. « The «prime factors» of quantum cryptography regulation », *Notre Dame Journal of Emerging Technologies* vol. 3, n°1, p. 37-73.

Ratcliff, C. L., J. D. Jensen, C. Katheryn, K. Crossley, et M. Krakow, 2018. « News Coverage of Cancer Research: Does Disclosure of Scientific Uncertainty Enhance Credibility? », dans O'Hair, H. D., H. Chapman et M. Sizemore (réd.), *Risk and Health Communication in an Evolving Media Environment*, New York, NY, Routledge.

Rebentrost, P. et S. Lloyd, 2018. « Quantum computational finance: Quantum algorithm for portfolio optimization », *arXiv*: doi.org/10.48550/arXiv.1811.03975.

Reiher, M., N. Wiebe, K. M. Svore, D. Wecker, et M. Troyer, 2017. « Elucidating reaction mechanisms on quantum computers », *PNAS*, vol. 114, n°29, p. 7555-7560.

Reisinge, S. H. et M. Salamatin, 2022. *New US Sanctions and Export Restrictions on Russia and Belarus.* Adresse: https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/24319b83/new-us-sanctions-and-export-restrictions-on-russia-and-belarus (consulté en mars 2023).

Renner, R. et R. Wolf, 2023. « Quantum Advantage in Cryptography », *AIAA Journal*, vol. 61, n°5, p. 1895-1910.

Rice, J. E., T. P. Gujarati, M. Motta, T. Y. Takeshita, E. Lee, J. A. Latone, et J. M. Garcia, 2021. « Quantum computation of dominant products in lithium-sulfur batteries », *arXiv*: doi.org/10.1063/5.0044068.

Richardson, R., J. M. Schultz, et K. Crawford, 2019. « Dirty data, bad predictions: How civil rights violations impact police data, predictive policing systems, and justice », *New York University Law Review*, vol. 94, n°15, p. 15-55.

Robert, A., P. K. Barkoutsos, S. Woerner, et I. Tavernelli, 2021. « Resource-efficient quantum algorithm for protein folding », *npj Quantum Information*, vol. 7, n°1, p. 38.

Robertson, K., C. Khoo, et Y. Song, 2020. *To Surveil and Predict: A Human Rights Analysis of Algorithmic Policing in Canada*, Toronto, ON, Université de Toronto.

Robitaille, J.-P., B. Macaluso, et P. Lemelin, 2022. *Bibliometric Study of the Canadian and International Scientific Output in Quantum Technologies*, Montréal, QC, Observatoire des Sciences et des Technologies.

Rosenberg, G., P. Haghnegahdar, P. Goddard, P. Carr, K. Wu, et M. L. de Prado, 2016. « Solving the optimal trading trajectory problem using a quantum annealer », *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, n°6, p. 1053-1060.

Rosenthal, E., 2021, 9 février. « Quantum Computing Enables Simulations to Unravel Mysteries of Magnetic Materials ». *phys.org* .

RRI Tools, s.d. *Find Out What RRI Means, Why It Is Important and How to Foster It.* Adresse: https://rri-tools.eu/about-rri?p_p_id=2_WAR_kaleodesignerportlet&p_p_lifecycle=0 (consulté en juillet 2023).

Ryan, C. D., A. J. Schaul, R. Butner, et J. T. Swarthout, 2020. « Monetizing disinformation in the attention economy: The case of genetically modified organisms (GMOs) », *European Management Journal*, vol. 38, n°1, p. 7-18.

Sahner, D. K. et R. J. Williams, 2021. « Clinical decision support using a partially instantiated probabilistic graphical model optimized through quantum annealing: Proof-of-concept of a computational method using a clinical data set », *medRxiv*, 10.1101/2020.1112.1113.20248138.

Salehi, Ö., Z. C. Seskir, et I. Tepe, 2022. « A computer science-oriented approach to introduce quantum computing to a new audience », *IEEE Transactions on Education*, vol. 65, n°1, p. 1-8.

Samuelson, P., 2017. « Functionality and expression in computer programs: Refining the tests for software copyright infringement », *Berkeley Technology Law Journal*, vol. 31, n°3, p. 1215-1300.

Sap, M., D. Card, S. Gabriel, Y. Choi, et N. A. Smith, 2019. *The Risk of Racial Bias in Hate Speech Detection*, communication présentée dans le cadre du 57e Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Florence, Italie.

Sayler, K. M. 2021. *Defense Primer: Quantum Technology*, Washington, D.C., Congressional Research Service.

Scassa, T., 2020. *Replacing Canada's 20-Year-Old Data Protection Law.* Adresse: https://www.cigionline.org/articles/replacing-canadas-20-year-old-data-protection-law/ (consulté en septembre 2022).

Scassa, T., 2022. *Bill C-27 and the Erasable Right of Erasure.* Adresse: https://www.teresascassa.ca/index.php?option=com_k2&view=item&id=358:bill-c-27-and-the-erasable-right-of-erasure (consulté en juillet 2023).

Schmit, C., 2013. « Intellectual property's upcoming quantum leap: Projecting the future challenges facing quantum information technology through a historical perspective of the computer revolution », *Journal of the Patent and Trademark Society*, vol. 95, n°3, p. 272-284.

Schrödinger, E., 1935. « Die gegenwärtige situation in der quantenmechanik », *Naturwissenschaften*, vol. 23, n°48, p. 807-812.

Scott, C. T. et C. Selin, 2019. « What to expect when expecting CRISPR baby number four », *American Journal of Bioethics*, vol. 19, n°3, p. 7-9.

Scott, C. T. et D. Barlevy, 2022. « How ethics can better anticipate the consequences of emerging biotechnologies », *American Journal of Bioethics*, vol. 22, n°1, p. 46-48.

SCRS – Service canadien du renseignement de sécurité, 2018. *La Chine et l'ère de la rivalité stratégique*, Ottawa, ON, SCRS.

SDC – Service des délégués commerciaux, 2021a. *Le contrôles à l'exportation.* Adresse: https://www.deleguescommerciaux.gc.ca/sell2usgov-vendreaugouvusa/procurement-marches/export-cont-export.aspx?lang=fra&_ga=2.115201863.1970178131.1697061535-1543227718.1697061534 (consulté en septembre 2021).

SDC – Service des délégués commerciaux, 2021b. *Comment un accélérateur technologique canadien peut aider votre entreprise.* Adresse: https://www.deleguescommerciaux.gc.ca/cta-atc/about-a_propos.aspx?lang=fra&_ga=2.149885174.1970178131.1697061535-1543227718.1697061534 (consulté en mai 2022).

SDC – Service des délégués commerciaux, 2023. *Service des délégués commerciaux.* Adresse: https://www.deleguescommerciaux.gc.ca/index.aspx?lang=fra&_ga=2.157532026.1970178131.1697061535-1543227718.1697061534 (consulté en février 2023).

Seskir, Z. C., S. Umbrello, C. Coenen, et P. E. Vermaas, 2023. « Democratization of quantum technologies », *Quantum Science and Technology*, vol. 8, n°2, p. 024005.

SFU – Université Simon-Fraser, s.d. *4D Labs.* Adresse: http://www.4dlabs.ca/ (consulté en juillet 2023).

Shankland, S., 2022. *Global Chip Shortage and $53B Subsidy Boosts US Manufacturing.* Adresse: https://www.cnet.com/tech/computing/global-chip-shortage-gives-us-manufacturing-a-boost/ (consulté en février, 2023).

Shapiro, C., 2000. « Navigating the patent thicket: Cross licenses, patent pools, and standard setting », *Innovation Policy and the Economy*, vol. 1, p. 119-150.

Shaw, D., 2022. *Quantum Value Chain – An Overview.* Adresse: https://www.factbasedinsight.com/quantum-value-chain-overview/ (consulté en septembre 2022).

Shea, D. A. et D. Morgan, 2010. *The Helium-3 Shortage: Supply, Demand, and Options for Congress*, Washington, D.C., Federation of American Scientists.

Shor, P. W., 1994. *Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring*, communication présentée dans le cadre du Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Sante Fe, NM.

Shor, P. W., 1995. « Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory », *Physical Review A*, vol. 52, n°4, p. R2493-R2496.

SIC – Solutions Innovatrices Canada, 2022. *Détection quantique.* Adresse: https://ised-isde.canada.ca/site/solutions-innovatrices-canada/fr/detection-quantique (consulté en juin 2023).

Siemiatycki, M., 2015. « Public-Private Partnerships in Canada: Reflections on twenty years of practice », *Canadian Public Administration*, vol. 58, n°3, p. 343-362.

Sigurdson, K., C. M. Sá, et A. Kretz, 2015. « Looking under the street light: Limitations of mainstream technology transfer indicators », *Science and Public Policy*, vol. 42, n°5, p. 632-645.

Silverthorn, C., 2021. *Sask. Government Wants Province to Become World Leader in Helium Production.* Adresse: https://www.cbc.ca/news/canada/saskatchewan/helium-bronwyn-eyre-1.6250050 (consulté en septembre 2022).

Simmons, S., 2022. *What Quantum Technology Means for Canada's Future.* Adresse: https://theconversation.com/what-quantum-technology-means-for-canadas-future-189674 (consulté en novembre 2022).

Simpson, M., 2018. *Canadian Startup Teams Up with Google to Advance Quantum Computing.* Adresse: https://www.itworldcanada.com/article/canadian-startup-teams-up-with-google-to-advance-quantum-computing/407518 (consulté en mai 2022).

Singer, C., 2022. *Canada Must Remove Obstacles to Immigration, Say Business Groups.* Adresse: https://www.cimmigrationnews.com/canada-must-remove-obstacles-to-immigration-say-business-groups/ (consulté en novembre 2022).

Singh, K., S. Anand, A. Pocklington, J. T. Kemp, et H. Bernien, 2022. « Dual-element, two-dimensional atom array with continuous-mode operation », *Physical Review X*, vol. 12, n°1, p. 011040.

Smith, P. et P. Coorey, 2023. *Why Australia is Investing In This 'Game-Changing' Futuristic Tech.* Adresse: https://www.afr.com/technology/why-australia-is-investing-in-this-game-changing-futuristic-tech-20230502-p5d4zw (consulté en mai 2023).

Smolina, A., S. Ghose, E. Hennessey, A. Tassone, S. Hennessey, et K. Hewitt, 2021. *The First Canada-Wide Equity, Diversity & Inclusion in Physics Survey*, Halifax, NS, CanPhysCounts.

Southin, T. C., 2022. *Overcoming Barriers to Policy Change: The Politics of Canada's Innovation Policy*, Toronto, ON, Université de Toronto.

Souza, A. M., E. O. Martins, I. Roditi, N. Sá, R. S. Sarthour, et I. S. Oliveira, 2022. « An Application of Quantum Annealing Computing to Seismic Inversion », *Frontiers in Physics*, vol. 9.

SP – Sécurité publique Canada, 2022. *Le gouvernement annonce un soutien pour la préparation du Canada pour lutter contre les cybermenaces.* Adresse : https://www.canada.ca/fr/securite-publique-canada/nouvelles/2022/08/le-gouvernement-annonce-un-soutien-pour-la-preparation-du-canada-pour-lutter-contre-les-cybermenaces.html (consulté en novembre 2022).

SPAC – Services publics et Approvisionnement Canada, 2022. *Approvisionnements en partenariat public-privé (PPP).* Adresse : https://achatsetventes.gc.ca/politiques-et-lignes-directrices/guide-des-approvisionnements/section/9/60 (consulté en juillet 2023).

Spectrum News 1, 2022. *Port of LA Attempts to Balance Supply Chain Influx, Employment.* Adresse: https://spectrumnews1.com/ca/la-west/inside-the-issues/2022/08/01/port-of-los-angeles-attempts-to-balance-supply-chain-influx-and-employment- (consulté en novembre 2022).

SpeQtral, 2022. *SpeQtral Announces SpeQtral-1 Quantum Satellite Mission for Ultra-Secure Communications.* Adresse: https://speqtral.space/speqtral-announces-speqtral-1-quantum-satellite-mission-for-ultra-secure-communications/ (consulté en juillet 2023).

SRI – Schwartz Reisman Institute for Technology and Society, 2023. *Discerning Signal from Noise: The State of Global AI Standardization and What It Means for Canada*, Toronto, ON, University of Toronto.

SRII – Stanford Research Institute International, 2021. *QED-C Introduces a Novel Approach to Measuring Performance of Quantum Computers. Adresse*: https://www.prnewswire.com/news-releases/qed-c-introduces-a-novel-approach-to-measuring-performance-of-quantum-computers-301398063.html (consulté en avril 2023).

SRII – Stanford Research Institute International, 2022. *Quantum Technology Manufacturing Roadmap.* Adresse: https://www.sri.com/quantum/quantum-technology-manufacturing-roadmap/ (consulté en avril 2023).

SSAC – Scottish Science Advisory Council, 2022. *Quantum Technology: Opportunities for Scotland*, Édimbourg, Royaume-Uni, Scottish Science Advisory Council.

StatCan – Statistique Canada, 2021. *Tableau : 27-10-0367-01 - Utilisation de technologies de pointe ou émergente, selon l'industrie et la taille de l'entreprise.* Adresse : https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/cv.action?pid=2710036701 (consulté en juillet 2023).

StatCan – Statistique Canada, 2022a. *Tableau 27-10-0333-01 : Dépenses au titre de la recherche et développement intra-muros des entreprises, selon le groupe d'industries fondé sur le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN), le pays de contrôle et le type de dépenses (x 1 000 000)*, Ottawa, ON, StatCan.

StatCan – Statistique Canada, 2022b. *Tableau 36-10-0401-01 : Produit intérieur brut (PIB) aux prix de base, par industries (x 1 000 000) (x 1,000,000)*, Ottawa, ON, StatCan.

StatCan – Statistique Canada, 2022c. *Tableau 27-10-0358-01 : Dépenses courantes au titre de la recherche et développement intra-muros en pourcentage des revenus, selon le groupe d'industries fondé sur le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) et le pays de contrôle*, Ottawa, ON, StatCan.

StatCan – Statistique Canada, 2023a. Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise, 2019. Adresse : https://www.statcan.gc.ca/fr/programmes-statistiques/instrument/5171_Q1_V4 (consulté en juillet 2023).

StatCan – Statistique Canada, 2023b. Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise, 2022. Adresse : https://www.statcan.gc.ca/fr/programmes-statistiques/instrument/5171_Q1_V5 (consulté en juillet 2023).

StatCan – Statistique Canada, 2023c. Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise. Adresse : https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV_f.pl?Function=getSurvey&SDDS=5171 (consulté en juillet 2023).

Steane, A. M., 1996. « Error correcting codes in quantum theory », *Physical Review Letters*, vol. 77, n°5, p. 793-797.

Steffan, M., 2022. *What's the Difference Between Error Suppression, Error Mitigation, and Error Correction?* Adresse: https://research.ibm.com/blog/quantum-error-suppression-mitigation-correction (consulté en juillet 2023).

Stein, A. L., 2014. « Reconsidering regulatory uncertainty: Making a case for energy storage », *Florida State University Law Review*, vol. 41, p. 697-766.

Stilgoe, J., R. Owen, et P. Macnaghten, 2013. « Developing a framework for responsible innovation », *Research Policy*, vol. 42, n°9, p. 1568-1580.

Stinson, C., 2022. « Algorithms are not neutral », *AI and Ethics*, vol. 2, p. 763-770.

Stray, B., A. Lamb, A. Kaushik, J. Vovrosh, A. Rodgers, J. Winch, … M. Holynski, 2022. « Quantum sensing for gravity cartography », *Nature*, vol. 602, n°7898, p. 590-594.

Swallow, J. G. et L. G. Joneckis, 2021. *Manufacturing for Quantum Systems*, Alexandria, VA, Institute for Defense Analyses.

Swayne, M., 2020. *Two-Bit Quantum Computer Solves Real Optimization Problem.* Adresse: https://thequantuminsider.com/2020/12/21/two-bit-quantum-computer-solves-real-optimization-problem/ (consulté en avril 2022).

Swayne, M., 2022. « Post-Quantum Safe Algorithm Candidate Cracked in an Hour on a PC ». *The Quantum Insider* (5 août).

TC — Transports Canada, 2021. *International Standards: Targeted Regulatory Review – Regulatory Roadmap*, Ottawa, ON, TC.

Team Finland, s.d. *About Team Finland.* Adresse: https://www.team-finland.fi/en/about-team-finland (consulté en février 2023).

Temme, K., E. v. d. Berg, A. Kandala, et J. Gambetta, 2022. *With Fault Tolerance the Ultimate Goal, Error Mitigation is the Path that Gets Quantum Computing to Usefulness.* Adresse: https://research.ibm.com/blog/gammabar-for-quantum-advantage (consulté en juillet 2023).

Ten Holter, C., P. Inglesant, R. Srivastava, et M. Jirotka, 2022. « Bridging the quantum divides: A chance to repair classic(al) mistakes? », *Quantum Science and Technology*, vol. 2022, n°7, p. 044006.

The White House – The United States White House, 2019. *Establishing the National Quantum Initiative Advisory Committee*, Washington, D.C., The White House.

The White House – The United States White House, 2022a. *National Security Memorandum on Promoting United States Leadership in Quantum Computing While Mitigating Risks to Vulnerable Cryptographic Systems*, Washington, D.C., The White House.

The White House – The United States White House, 2022b. *CHIPS and Science Act Will Lower Costs, Create Jobs, Strengthen Supply Chains, and Counter China.* Adresse: https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/09/fact-sheet-chips-and-science-act-will-lower-costs-create-jobs-strengthen-supply-chains-and-counter-china/ (consulté en février 2023).

The White House – The United States White House, 2022c. *Enhancing the National Quantum Initiative Advisory Committee*, Washington, D.C., The White House.

Torres Trade Law, 2022. *BIS's New Approach to Identifying "Emerging and Foundational Technologies."* Adresse: https://www.torrestradelaw.com/posts/BIS%E2%80%99s-New-Approach-to-Identifying-%E2%80%9CEmerging-and-Foundational-Technologies%E2%80%9D/285#sdfootnote5sym (consulté en septembre 2022).

Total Energies, 2020. *Total is Exploring Quantum Algorithms to Improve CO_2 Capture.* Adresse: https://totalenergies.com/media/news/news/total-exploring-quantum-algorithms-improve-co2-capture (consulté en avril 2022).

TQT — Transformative Quantum Technologies, s.d.-a. *Waterloo's Quantum Valley.* Adresse: https://tqt.uwaterloo.ca/quantum-valley/ (consulté en avril 2023).

TQT – Transformative Quantum Technologies, s.d.-b. *About.* Adresse: https://tqt.uwaterloo.ca/about/ (consulté en avril 2023).

TradeArabia, 2021. *DP World Explores Quantum Computing Technology.* Adresse: http://www.tradearabia.com/news/IND_381417.html (consulté en mars 2022).

Troyer, M., R. Thew, F. Petruccione, P. Knight, N. Gisin, et P. Treutlein, 2020. *Future Quantum Technologies*, Genève, Suisse, Geneva Science and Diplomacy Anticipator.

Twyman, R., L.-M. Berg, et M. Riley, 2021. « Recent legislative and regulatory developments of interest to energy lawyers », *Alberta Law Review*, vol. 59, n°2, p. 527-562.

Tyson, M., 2022. *Ultrathin Silicon-28 Nanowires in CPUs Could Be a Game Changer.* Adresse: https://www.tomshardware.com/news/silicon-nanowires-could-be-game-changer-for-cpus (consulté en décembre 2022).

U.K. ICO – United Kingdom Information Commissioner's Office, 2012. *Anonymisation: Managing Data Protection Risk Code of Practice*, Wilmslow, Royaume-Uni, U.K. ICO.

U.S. Congress – United States Congress, 2018. *National Quantum Initiative Act*, Washington, D.C., U.S. Congress.

U.S. DHS – United States Department of Homeland Security, 2021. *Post-Quantum Cryptography: Frequently Asked Questions*, Washington, D.C., U.S. DHS.

U.S. DHS – United States Department of Homeland Security, 2022. *Post-Quantum Crytography.* Adresse: https://www.dhs.gov/quantum (consulté en février 2023).

UBC – Université de la Colombie-Britannique s.d. *Quantum Matter Institute — Facilities.* Adresse: https://qmi.ubc.ca/facility-types/facilities/ (consulté en juillet 2023).

UE – Union européenne, 2016. *Quantum Technologies Roadmap*, s.l., UE.

UIT – Union internationale des télécommunications, 2021. *Standardization Outlook and Technology Maturity: Network Aspects of Quantum Information Technologies*, Genève, Suisse, ITU-T Focus Group on Quantum Information Technology for Networks (FG QIT4N).

UKNQTP – United Kingdom National Quantum Technologies Program, 2015. *A Roadmap for Quantum Technologies in the UK*, s.l., Innovate UK and EPSRC.

UKQTHST – United Kingdom Quantum Technology Hub Sensors and Timing, 2021a. *Wearable Brain Imaging System Installed in Toronto for Autism Research.* Adresse: https://quantumsensors.org/news/2021/08/24/wearable-brain-imaging-system-installed-in-toronto-for-autism-research (consulté en mars 2022).

UKQTHST – United Kingdom Quantum Technology Hub Sensors and Timing, 2021b. *Quantum Brain Sensors Could Spot Dementia After Hub Researchers at the University of Sussex Find They Track Brain Waves.* Adresse: https://quantumsensors.org/news/2021/11/22/quantum-brain-sensors-could-spot-dementia-after-hub-researchers-at-the-university-of-sussex-find-they-track-brain-waves (consulté en mars 2022).

UKQTHST – United Kingdom Quantum Technology Hub Sensing and Timing, 2021c. *Hub Researchers at the Universities of Birmingham and Strathclyde Partner on ISCF Project to Develop More Accurate Atomic Clock.* Adresse: https://quantumsensors.org/news/2021/03/10/hub-researchers-at-the-university-of-birmingham-partner-on-iscf-project-to-develop-more-accurate-atomic-clock (consulté en mars 2022).

UKQTHST – United Kingdom Quantum Technology Hub Sensors and Timing, s.d.-a. *Healthcare.* Adresse: https://quantumsensors.org/sectors/healthcare (consulté en mars 2022).

UKQTHST – United Kingdom Quantum Technology Hub Sensors and Timing, s.d.-b. *Space.* Adresse: https://quantumsensors.org/sectors/space (consulté en mars 2022).

UKQTHST – United Kingdom Quantum Technology Hub Sensors and Timing, s.d.-c. *Transport.* Adresse: https://quantumsensors.org/sectors/transport (consulté en mars 2022).

UKQTHST – United Kingdom Quantum Technology Hub Sensors and Timing, s.d.-d. *Map Matching Navigation.* Adresse: https://quantumsensors.org/technology/map-matching-navigation (consulté en mars 2022).

UKRI – United Kingdom Research and Innovation, 2020a. *Strategic Intent*, Royaume-Uni, UK National Quantum Technologies Programme.

UKRI – United Kingdom Research and Innovation, 2020b. *UK and Canada launch world-first programme of quantum technologies.* Adresse: https://www.ukri.org/news/uk-and-canada-launch-world-first-programme-of-quantum-technologies/ (consulté en mars, 2022).

UKRI – United Kingdom Research and Innovation, 2021. *EPSRC Quantum Technologies Training and Skills Workshop*, Royaume-Uni, UK National Quantum Technologies Programme.

UKRI – United Kingdom Research and Innovation, 2022. *Framework for Responsible Research and Innovation.* Adresse: https://www.ukri.org/about-us/epsrc/our-policies-and-standards/framework-for-responsible-innovation/ (consulté en novembre 2022).

UKRI – United Kingdom Research and Innovation, 2023. *UKRI Awards £45 Million to Develop Quantum Technologies.* Adresse: https://www.ukri.org/news/ukri-awards-45-million-to-develop-quantum-technologies/ (consulté en juillet, 2023).

UKRI – United Kingdom Research and Innovation, s.d. *Towards a Methodology for Combining Participatory Design and Responsible Research and Innovation Approaches in Quantum Technologies.* Adresse: https://gtr.ukri.org/projects?ref=studentship-2220046 (consulté en décembre 2022).

Université de Sherbrooke, s.d. *Integrated Innovation Chain.* Adresse: https://www.usherbrooke.ca/partenariats/fr/initiatives-innovation/chaine-innovation-integree (consulté en avril 2023).

Universités Canada, 2022. *Les universités canadiennes nous propulsent vers un avenir quantique.* Adresse : https://www.univcan.ca/fr/salle-de-presse/communiques-de-presse/les-universites-canadiennes-nous-propulsent-vers-un-avenir-quantique/ (consulté en décembre 2022).

UofC – Université de Calgary, 2022. *Quantum City.* Adresse: https://research.ucalgary.ca/quantum-city (consulté en mai 2022).

UofT – Université de Toronto, 2023. *Canada's Quantum Hubs: A Foundation for Global Quantum Advantage*, Toronto, ON, Université de Toronto.

USAF – United States Air Force, s.d. *Utility of Quantum Systems for the Air Force Study Abstract*, Washington, D.C., USAF Scientific Advisory Board Study.

USGAO – United States Government Accountability Office, 2021. *Quantum Computing and Communications: Status and Prospects*, Washington, D.C., USGAO.

UWaterloo – Université de Waterloo, 2021. *Researchers Test New Approach to Quantum-Secured Communication in Space.* Adresse: https://uwaterloo.ca/physics-astronomy/news/researchers-test-new-approach-quantum-secured-communication (consulté en avril 2023).

Uyarra, E., J. M. Zabala-Iturriagagoitia, K. Flanagan, et E. Magro, 2020. « Public procurement, innovation and industrial policy: Rationales, roles, capabilities and implementation », *Research Policy*, vol. 49, n°1, p. 103844.

Valtakari, M., J. Nyman, M. Hjelt, S. Sepponen, A.-M. Järvelin, K. Haila, et K. Halme, 2018. *Evaluation of Precommercialisation Activities of Tekes-TUTL and Innovation Scout*, Helsinki, Finlande, Business Finland.

van Dam, K. K. – 2020. *From Long-distance Entanglement to Building a Nationwide Quantum Internet: Report of the DOE Quantum Internet Blueprint Workshop*, Long Island, NY, United States Department of Energy, Brookhaven National Laboratory.

VeriQloud – s.d.-a. *HyQloud Technology.* Adresse: https://veriqloud.com/solutions/hyqloud/ (consulté en novembre 2022).

VeriQloud – s.d.-b. *Qline Technology.* Adresse: https://veriqloud.com/solutions/qline/ (consulté en novembre 2022).

Vikstål, P., M. Grönkvist, M. Svensson, M. Andersson, G. Johansson, et G. Ferrini, 2020. « Applying the quantum approximate optimization algorithm to the tail assignment problem », *arXZiv.*

Von Schomberg, R., 2012. « Prospects for Technology Assessment in a Framework of Responsible Research and Innovation », dans Dusseldorp, M. et R. Beecroft (réd.), *Technikfolgen abschätzen lehren: Bildungspotenziale transdisziplinärer Methoden*, Wiesbaden, Allemagne, VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Wang, W. et M. Stöttinger, 2020. « Post-quantum secure architectures for automotive hardware secure modules », *Journal of Cryptology*, vol. 2020, p. 26.

Wang, Y., W. Vanhaverbeke, et N. Roijakkers, 2012. « Exploring the impact of open innovation on national systems of innovation — A theoretical analysis », *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 79, p. 419-428.

WAS – Wassenaar Arrangement Secretariat, 2021. *The Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies*, Vienne, Autriche, WAS.

WAS – Wassenaar Arrangement Secretariat, 2022. *The Wassenaar Arrangement.* Adresse: https://www.wassenaar.org/about-us/ (consulté en septembre 2022).

Webb, J., 2014. *Purer-Than-Pure Silicon Solves Problem for Quantum Tech.* Adresse: https://www.bbc.com/news/science-environment-28632263 (consulté en juillet, 2023).

Wehner, S., D. Elkouss, et R. Hanson, 2018. « Quantum internet: A vision for the road ahead », *Science*, vol. 362, n°6412.

Weinbaum, C., S. Berner, et B. McClintock, 2017. *SIGINT for Anyone: The Growing Availability of Signals Intelligence in the Public Domain*, Santa Monica, CA, RAND Corporation.

Weissberger, A., 2020. *Verizon Trials Quantum Key Distribution for Encryption over Fiber Optic Links.* Adresse: https://techblog.comsoc.org/2020/09/04/verizon-trials-quantum-key-distribution-for-encryption-over-fiber-optic-links/ (consulté en avril 2022).

West, S. M., M. Whittaker, et K. Crawford, 2019. *Discriminating Systems: Gender, Race, and Power in AI*, New York, NY, AI Now Institute.

White, E., 2013. « The Berne Convention's flexible fixation requirement: A problematic provision for user-generated content », *Chicago Journal of International Law*, vol. 13, n°2, p. 685-707.

Wiesner, S., 1983. « Conjugate coding », *SIGACT News*, vol. 15, n°1, p. 78-88.

Wijesingha, R. et H. Ramos, 2017. « Human capital or cultural taxation: What accounts for differences in tenure and promotion of racialized and female faculty? », *Canadian Journal of Higher Education*, vol. 47, n°3, p. 54-75.

Wille, R., A. Fowler, et Y. Naveh, 2018. *Computer-Aided Design for Quantum Computation*, communication présentée dans le cadre du IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), San Diego, CA.

Wolfe, D. A., 2002. « Negotiating Order: Sectoral Policies and Social Learning in Ontario », dans D. A. Wolfe et M. S. Gertler (réd.), *Innovation and Social Learning*. Londres, Royaume-Uni, Palgrave Macmillan.

Wong, J., 2021. *Quantum Algorithms Institute Receives $2.2M Boost from Canadian Government to Support B.C. as World Leader in Quantum Technologies*. Adresse: https://www.sfu.ca/sfunews/stories/2021/07/quantum-algorithms-institute-receives--2-2m-boost-from-canadian-.html (consulté en juin, 2023).

Woodhouse, E. J., 2005. « (Re)Constructing technological society by taking social construction even more seriously », *Social Epistemology*, vol. 19, n°2-3, p. 199-223.

Wootton, J. R., F. Harkins, N. T. Bronn, A. C. Vazquez, A. Phan, et A. T. Asfaw, 2020. *Teaching Quantum Computing with an Interactive Textbook*, communication présentée dans le cadre du 2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Broomfield, CO.

Xie, Z., 2022. *Comparing Regulatory Uncertainty with Other Policy Uncertainty Measures*, Washington, D.C., George Washington University.

Yang, B., N. D. Burns, et C. J. Backhouse, 2004. « Management of uncertainty through postponement », *International Journal of Production Research*, vol. 42, n°6, p. 1049-1064.

Zapata Computing, 2021. *The First Annual Report on Enterprise Quantum Computing Adoption*, Boston, MA, Zapata Computing.

Zapata Computing, 2022. *The Second Annual Report on Enterprise Quantum Computing Adoption*, Boston, MA, Zapata Computing.

Zhang, Y., A. Sit, F. Bouchard, H. Larocque, F. Grenapin, E. Cohen, … E. Karimi, 2019. « Interaction-free ghost-imaging of structured objects », *Optics Express*, vol. 27, n°3, p. 2212-2224.

Zhong, H.-S., H. Wang, Y.-H. Deng, M.-C. Chen, L.-C. Peng, Y.-H. Luo, … J.-W. Pan, 2020. « Quantum computational advantage using photons », *Science*, vol. 370, n°6523, p. 1460-1463.

Zuboff, S., 2019. *The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power*. Londres, Royaume-Uni, Profile Books.

Zwerver, A. M. J., T. Krähenmann, T. F. Watson, L. Lampert, H. C. George, R. Pillarisetty, … J. S. Clarke, 2022. « Qubits made by advanced semiconductor manufacturing », *Nature Electronics*, vol. 5, n°3, p. 184-190.

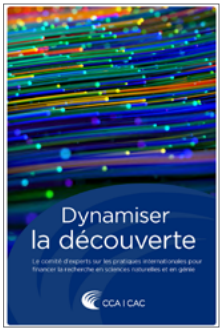
Rapports du CAC

Les rapports d'évaluation répertoriés ci-dessous sont accessibles sur le site Web du CAC (www.rapports-cac.ca) :

Connexions vulnérables (2023)

Lignes de faille (2023)

Entre progrès et défis (2022)



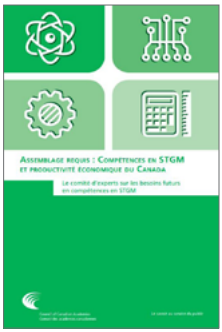
Dynamiser la découverte (2021)

Concevoir l'avenir de l'automobile au Canada (2021)

Formés pour réussir (2021)

Améliorer l'innovation grâce à de meilleures pratiques de gestion (2018)

Rivaliser dans une économie mondiale axée sur l'innovation : L'état de la R-D au Canada (2018)



Assemblage requis : Compétences en STGM et productivité économique du Canada (2015)

Conseil d'administration du CAC*

Sue Molloy, FACG, (présidente), présidente de Glas Ocean Electric et professeure auxiliaire à l'Université Dalhousie (Halifax, N.-É.)

Soheil Asgarpour, **FACG,** président, Petroleum Technology Alliance Canada; président désigné, Académie canadienne du génie (Calgary, Alb.)

Pascal Grenier, vice-président principal, Services de vol et Opérations mondiales, CAE (Montréal, Qc)

Chantal Guay, FACG, directrice générale, Conseil canadien des normes (Ottawa, Ont.)

Jawahar (Jay) Kalra, M.D., MACSS, professeur, Département de pathologie et de médecine de laboratoire et membre du Conseil des gouverneurs, Université de la Saskatchewan (Saskatoon, Sask.)

Catherine Karakatsanis, FACG, cheffe de l'exploitation, Morrison Hershfield Group Inc. et présidente élue de l'Académie canadienne du génie (Toronto, Ont.)

Cynthia E. Milton, MSRC, vice-présidente associée à la recherche, Université de Victoria (Victoria, C.-B.)

Donna Strickland, C.C., MSRC, FACG, professeure, Département de physique et d'astronomie, Université de Waterloo (Waterloo, Ont.)

Gisèle Yasmeen, vice-rectrice associée, International, Université d'Ottawa (Ottawa, Ont.)

*En novembre 2023

Comité consultatif scientifique du CAC*

David Castle (président), professeur, École d'administration publique et Gustavson School of Business, Université de Victoria; chercheur en résidence, Bureau du conseiller scientifique principal du premier ministre du Canada (Victoria, C.-B.)

Maydianne C. B. Andrade, professeure de sciences biologiques, Université de Toronto à Scarborough; présidente, Réseau canadien des scientifiques noirs (Toronto, Ont.)

Peter Backx, MSRC, MACSS, professeur, Département de biologie; titulaire, Chaire de recherche du Canada en biologie cardiovasculaire, Université York (Toronto, Ont.)

Kyle Bobiwash, professeur adjoint et érudit autochtone, Département d'entomologie, Université du Manitoba (Winnipeg, Man.)

Stephanie E. Chang, professeure, School of Community and Regional Planning and Institute for Resources, Environment and Sustainability, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

Jackie Dawson, MSRC, titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur l'environnement, la société et les politiques et professeure agrégée au Département de géographie, Université d'Ottawa (Ottawa, Ont.)

Colleen M. Flood, MSRC, MACSS, Doyenne, Faculté de droit, Université Queen's (Kingston, Ont.)

Digvir S. Jayas, **O.C., MSRC, FACG,** professeur éminent et vice-recteur à la recherche et aux relations internationales, Université du Manitoba (Winnipeg, Man.)

Malcolm King, MACSS, directeur scientifique, Saskatchewan Centre for Patient-Oriented Research, Université de la Saskatchewan (Saskatoon, Sask.)

Chris MacDonald, professeur agrégé; directeur, Ted Rogers Leadership Centre; président, Département de droit et des affaires; Ted Rogers School of Management, Université métropolitaine de Toronto (Toronto, Ont.)

Nicole A. Poirier, FACG, présidente, KoanTeknico Solutions Inc. (Beaconsfield, Qc)

Louise Poissant, MSRC, directrice scientifique du Fonds de recherche du Québec — Société et culture (Montréal, Qc)

Jamie Snook, directeur général, Torngat Wildlife Plants and Fisheries Secretariat (Happy Valley-Goose Bay, T.-N.-L.)

David A. Wolfe, professeur de sciences politiques, Université de Toronto à Mississauga; codirecteur, Innovation Policy Lab à la Munk School of Global Affairs and Public Policy, Université de Toronto (Toronto, Ont.)

*En novembre 2023

Council of Canadian Academies | Conseil des académies canadiennes

180, rue Elgin, bureau 1401
Ottawa (Ontario) K2P 2K3
Tél: 613 567-5000
www.rapports-cac.ca