

Sciences et technologies

INNOVATION QUANTIQUE DURABLE : PEUT-ON ANTICIPER LES FUTURES CONSÉQUENCES?

Karl Thibault

Professionnel de recherche
Institut quantique
Université de Sherbrooke

Isabelle Lacroix

Professeure titulaire
École de politique appliquée
Université de Sherbrooke

Les technologies quantiques¹ sont en pleine transition d'un domaine scientifique expérimental à un domaine technologique stratégique commercialisable ayant des implications sociétales profondes. Au cours de la prochaine décennie, cette technologie de rupture pourrait redéfinir le cadre éthique, juridique et social entourant le développement quantique, en particulier à Sherbrooke, où un projet de développement économique s'articule autour de la zone d'innovation quantique (ZIQ). On peut s'attendre à plusieurs conséquences : coûts énergétiques, chaînes d'approvisionnement à risque (cryogénie, semi-conducteurs, métaux rares), risques d'inégalités d'accès, besoins massifs en talents et en compétences, iniquités importantes dans les retombées. Dans un contexte marqué par les changements climatiques, les enjeux environnementaux du développement technologique soulèvent des préoccupations incontournables.

1. Les technologies quantiques désignent une nouvelle génération de technologies qui exploitent les propriétés de la physique quantique pour concevoir des dispositifs plus performants ou efficaces que les technologies classiques. Nous sommes aujourd'hui à l'aube de la deuxième révolution quantique, qui permettra notamment le développement d'ordinateurs quantiques ayant le potentiel de résoudre certains problèmes impossibles à résoudre dans un temps raisonnable avec les ordinateurs traditionnels. Cette révolution s'appuie sur les avancées de la première révolution quantique, à l'origine d'innovations majeures, comme le laser et le transistor.

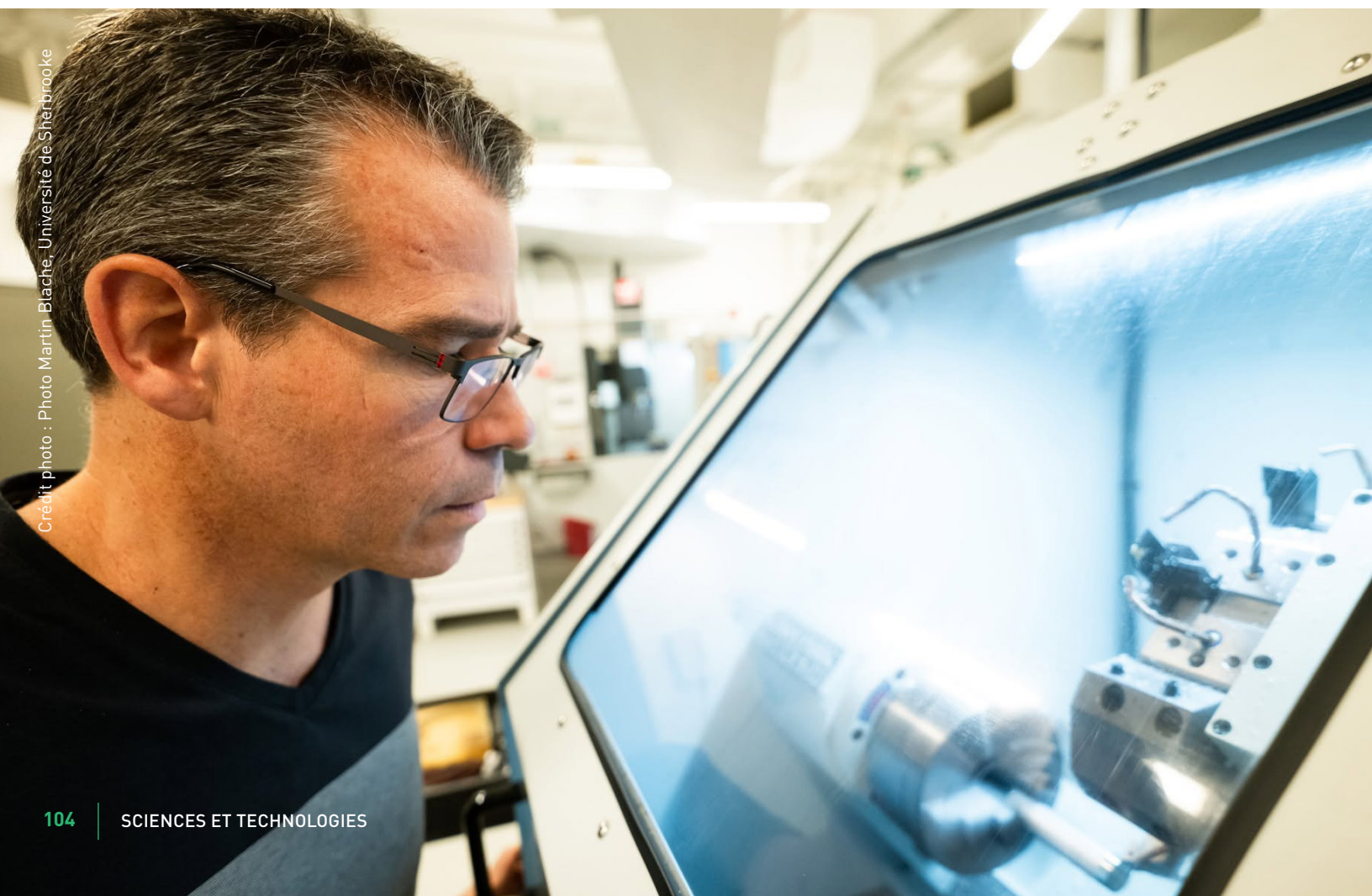
Ainsi, de nombreuses initiatives internationales insistent sur la nécessité d'encadrer l'innovation de façon responsable (*Responsible Research and Innovation* – RRI [von Schomberg, 2011]). Ces cadres promeuvent l'anticipation, la réflexivité, l'inclusion et la réactivité dans la régulation des technologies émergentes, et ce, dès l'étape d'idéation du développement. Pour les technologies quantiques, ces principes sont particulièrement pertinents : leur rythme de maturation est incertain, leurs usages restent en partie spéculatifs et leurs répercussions (sociales, environnementales, légales, etc.) sont encore inconnues.

Dialogues quantiques

Le projet de recherche Dialogues quantiques s'inscrit dans ce contexte, en donnant la parole aux parties prenantes pour coconstruire des scénarios plausibles tout en exprimant leurs craintes, besoins et considérations. Ce projet de recherche vise à atteindre deux objectifs principaux. D'abord, il vise à créer des outils d'accompagnement et de formation à la recherche et à l'innovation responsable destinés à la recherche et à l'entrepreneuriat en physique quantique. Ensuite, il vise à offrir des conseils scientifiques aux autorités municipales, provinciales et fédérales sur les besoins d'encadrement de ce secteur technologique en développement.

La méthodologie choisie est largement inspirée du *Transformative Scenario Planning* (TSP) de Kahane (2012), où les personnes participantes se rencontrent et imaginent des scénarios futurs plausibles d'intégration en société de futures technologies quantiques. Le TSP prévoit, notamment, deux conditions pour assurer la contribution de la démarche. D'abord, les personnes participantes doivent décider elles-mêmes des objets ou des thèmes de discussion. Ensuite, les personnes présentes doivent avoir un pouvoir réel (décisionnel ou d'influence) relativement à la situation réfléchie. Deux dialogues ont été formés : un local, regroupant des acteurs de proximité avec la ZIQ de Sherbrooke, l'autre national, regroupant des acteurs de l'écosystème canadien. Le Tableau 1 présente les organisations participantes et les catégories auxquelles elles sont attachées.

Si le dialogue local s'est réuni plus fréquemment en raison de la proximité géographique, ce n'était pas le cas pour le dialogue national. Ainsi, le premier s'est rencontré 13 fois de 2023 à 2026, pour des rencontres de 2 heures chacune. Le second s'est rencontré cinq fois, à raison d'une journée entière. Les thèmes choisis par les personnes participant au dialogue local étaient les suivants : cybersécurité, accessibilité, démocratisation, politique et science, environnement, revalorisation de quartier, communication, outils potentiels de recherche et d'innovation responsable.



Catégories d'organisations	Dialogue local	Dialogue national
Recherche	Université de Sherbrooke	Université de Sherbrooke
		Université de Waterloo
		Université d'Ottawa
		Université de Calgary
		Quantum Algorithm Institute
Industrie quantique	1QBit ²	1QBit
	Nord quantique	Nord quantique
	IBM	IBM
	Pasqal	Xanadu
	QuantACET	Quantum Industry Canada
Gouvernement	Ville de Sherbrooke	Ministères québécois, ontarien, albertain et britanno-colombien responsables du domaine
	Sherbrooke Innovante	Instances fédérales concernées (Ressources naturelles Canada; Innovation, sciences et développement économique Canada et Conseil national de recherches Canada)
Société civile ³ et institution	PÉPINES (femmes et diversité)	Co-savoir
	Conseil régional en environnement (environnement)	Regroupement national des conseils régionaux de l'environnement du Québec
	Chambre de commerce de Sherbrooke (économie hors secteur quantique)	Chambre de commerce du Canada
	Musée de la nature et des sciences de Sherbrooke (culture)	Conseil des arts et de la culture du Canada
	Axelys (valorisation de la recherche)	Bureau du Scientifique en chef du Québec
	Cégep de Sherbrooke (éducation)	Bureau de la Conseillère scientifique en chef du Canada
	DistriQ (OBNL de la ZIQ)	

Tableau 1. Organisations participantes aux dialogues quantiques 2023-2026

Quant au dialogue national, les thèmes retenus ont plutôt été : la réactivité de l'écosystème quantique canadien, les ressources humaines, le double usage de la technologie (civil et militaire) et les communications, le leadership canadien en matière de quantique. Les enjeux sociétaux qui émergeaient des discussions, comme l'influence du développement quantique sur le climat, étaient

tributaires de la volonté des personnes participantes selon la pertinence qu'elles y accordaient.

Lors des rencontres, locales ou nationales, une question générale sur le thème était proposée aux personnes participantes afin de lancer la discussion et d'amorcer leur réflexion sur les potentiels scénarios futurs. Une

2. Les industries quantiques participant au dialogue local devaient être présentes à la ZIQ de Sherbrooke.

3. Le choix des organisations de la société civile a été fait en fonction des enjeux sociétaux mentionnés dans la littérature concernant le développement de technologies quantiques : équité, inclusion, durabilité, accessibilité, inégalité, etc.

fois la discussion lancée, les personnes qui animaient les discussions n'intervenaient que minimalement pour recentrer la discussion sur le thème ou à la demande des personnes participantes pour clarifier un point. Les personnes participantes étaient encouragées à plonger dans chacun des scénarios envisagés tout en explorant une gamme de possibilités.

Toutes les discussions ont été enregistrées sous format audio et un verbatim a été créé à partir du logiciel *Transkriptor*, puis revu par une des chercheuses. À partir de ces verbatim, une analyse de contenu thématique a été réalisée. Ce projet respecte l'ensemble des exigences en matière d'éthique de la recherche⁴.

Résultats

L'enjeu de l'impact environnemental étant régulièrement cité dans la littérature comme un des enjeux sociétaux à considérer dans une orientation de recherche et d'innovation responsable (Berger, et al., 2021 ; Cordier, Thibault, Arpin et Amor, 2025), nous nous sommes intéressés particulièrement à celui-ci dans les verbatim des dialogues des trois années du projet. Est-ce que cet enjeu incontournable selon la littérature se retrouve

également au cœur des préoccupations mentionnées par les personnes participant aux dialogues local et national ? Pour tenter de répondre à cette question, nous avons d'abord exploré les verbatim en cherchant à relever les termes utilisés par les personnes participantes et pouvant se référer à l'enjeu climatique, voire plus largement l'enjeu environnemental. Cette première étape a mené à l'identification des termes suivants, qui ont ensuite été cherchés dans les verbatim : chaîne, climat, consommation, durabilité, énergie, électricité, environnement, humain, nature, ressource, territoire, urbain et vie. Parmi ceux-ci, plusieurs ont été retirés en raison de leur faible présence (cités moins de 20 fois sur l'ensemble des heures de discussion) dans l'ensemble des données analysées. Les mots conservés (voir Tableau 4) lors de l'analyse finale sont donc : climat, énergie, environnement, humain et ressource. Ces mots étaient associés à une réflexion portant sur l'enjeu environnemental, notamment parfois l'enjeu climatique.

L'analyse montre que chacun de ces mots est utilisé dans certains contextes particuliers. Le mot *climat* a davantage été mentionné sur le plan local, généralement dans le duo *changement climatique*, ce qui indique que cette considération est présente dans les discussions de l'écosystème local. Le mot *énergie* fait majoritairement référence à l'impact environnemental et à l'empreinte énergétique des technologies quantiques. La présence

Mots	Citation directe - Dialogue local
Climat	« Présentement, je pense que quand on se demande, OK, est-ce que le quantique va pouvoir nous aider pour solutionner le problème du climat... il y a beaucoup de ces questions qui sont tellement floues, ce ne sera pas nécessairement... Je ne suis pas d'une grande confiance que ça va arriver à une solution, en bonne partie parce que présentement, la technologie n'est tellement pas avancée qu'on ne sait pas ça va être quoi les gros impacts. »
Énergie	« Dans le fond, pour revenir sur des choses très concrètes en environnement, tu sais, je pense, je suis d'accord avec toi sur la question de la source de l'énergie. En fait, la question énergétique est comme au cœur de tout ça. »
Environnement	« Si les pouvoirs en place, parce qu'on est quand même à la merci des gens qui vont prendre des décisions sur le financement, qui va au final influencer la recherche, mais est-ce que si ce pouvoir-là a à cœur justement de travailler sur des solutions qui vont nous aider au niveau environnemental, est-ce qu'il y a la possibilité ou c'est un <i>wish list</i> du futur un peu impossible ? »
Ressources	« Si on est capable d'optimiser les ressources, par exemple, d'aller chercher au niveau de la construction des matériaux, puis on est dans un monde capitaliste, il ne faut pas se cacher non plus que, dans le moment, capitalisme veut dire que ça devient de plus en plus cheap. Mais disons qu'on y va plus sur un point de vue vraiment d'optimisation parfaite au niveau des structures moléculaires et donc de diminuer la quantité de fer dans les bâtiments, donc assurément au niveau des ressources naturelles, donc des changements climatiques, il y a un avantage à pouvoir optimiser ce genre de recherche-là. Cela dit, en même temps, il y a des dynamiques de pouvoir, de qui est propriétaire des ressources sur la planète, que là, il faut se poser la question. »

Tableau 2. Exemples de citations tirées du dialogue local selon les mots recherchés

4. Certificat éthique délivré par le CER de l'UdeS : N/Réf. 2023-4094/Lacroix

Mots	Citation directe - Dialogue national
Climat	« Je pense donc que cela aura des répercussions très importantes sur les entreprises. Les personnes qui auront accès à l'informatique quantique pourront bénéficier de capacités qui transformeront de nombreux secteurs, et ces changements se répercuteront ensuite dans l'ensemble de la société, notamment par une meilleure disponibilité de produits et de services. Je crois donc qu'il y aura des avantages considérables. Par exemple, la découverte de nouveaux matériaux pourrait nous aider à lutter contre les changements climatiques en permettant de trouver des substances capables de capter ou de transformer le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère, entre autres. Nous en tirerons tous des bénéfices. » (traduction libre)
Énergie	« Je pense qu'il y a également une dimension liée aux matériaux, c'est-à-dire savoir où ils se trouvent et déterminer si leur exploitation est particulièrement énergivore. » (traduction libre)
Environnement	« Il y a aussi la question de l'impact environnemental de cette technologie. Par exemple, comment fabrique-t-on ces ordinateurs ? On parle beaucoup de la manière dont on va les utiliser, mais beaucoup moins de leur fabrication. Allons-nous recycler les matériaux nécessaires ou continuer à extraire davantage de ressources dans d'autres pays, en poursuivant ainsi leur exploitation ? » (traduction libre)
Ressources	« Il y a aussi la question des ressources et de l'environnement. Si Sherbrooke devenait une nouvelle Silicon Valley du quantique, cela nécessiterait énormément de ressources. Il faudrait peut-être alors établir des priorités dans l'allocation de ces ressources, qu'il s'agisse de l'eau, de l'électricité ou d'autres infrastructures essentielles. » (traduction libre)

Tableau 3. Exemples de citations tirées du dialogue national selon les mots recherchés

de ce terme porte parfois l'espoir d'une réduction marquée de la consommation énergétique due aux futures technologies quantiques et parfois une crainte que ces technologies puissent au contraire faire croître encore davantage cette consommation déjà élevée. Le mot *environnement* a surtout été mentionné lors de la rencontre locale portant sur ce même thème et lors de celle portant sur la revalorisation du quartier de la ZIQ. Le mot *humain* fait référence aux ressources humaines, sauf en de rares occasions. La préoccupation centrale de l'écosystème quant au recrutement des talents est bien représentée ici par l'espace occupé par ce terme et éclipse en partie l'aspect environnemental de la gestion des ressources naturelles. Le mot *ressources* fait généralement référence à la chaîne d'approvisionnement et aux matériaux nécessaires pour réaliser les technologies quantiques ou aux ressources humaines et à l'énergie nécessaires pour les utiliser.

Au-delà du contexte immédiat entourant ces mots, le thème de la rencontre où ils ont été exprimés est aussi révélateur. Sans surprise, ces mots ont surtout été mentionnés lors des rencontres locales portant sur les thèmes de l'environnement et de la revitalisation de la ZIQ. Précisons que, dans ce cas, l'environnement a été proposé comme thème de discussion par les personnes participantes elles-mêmes.

Sur le plan national, l'environnement a été davantage mentionné lors de la première rencontre portant plus globalement sur les conséquences potentielles des avancées technologiques et de l'importance de la réactivité de l'écosystème face à ces avancées. Cet enjeu a été moins présent lors des rencontres suivantes, pendant lesquelles les personnes participantes se sont concentrées sur des enjeux plus directement associés à l'état actuel du développement des technologies quantiques.

Mot analysé	Dialogue local	Dialogue national
Climat	31	23
Énergie	25	36
Environnement	37	41
Humain	58	42
Ressource	56	105

Tableau 4. Nombre total d'occurrences des mots analysés pour les dialogues au niveau local et national

Conclusion

Somme toute, les enjeux environnementaux ont été peu présents dans l'ensemble des discussions lors des dialogues local et national. Cet état de fait est possiblement dû au stade de développement de l'écosystème, faisant en sorte que d'autres enjeux prennent davantage de place dans les discussions des personnes participantes, comme les questions de manque de ressources humaines, de cybersécurité, de vie privée, ou les défis liés à la géopolitique actuelle.

Il est raisonnable de croire que l'espoir de réduction de l'empreinte énergétique mis de l'avant par certaines personnes expertes du domaine quantique comme étant un argument justifiant l'importance du développement de ces technologies (Berger, et al., 2021 ; Auffèves, 2022 ; Cordier, Thibault, Arpin et Amor, 2025 ; Meier et Yamasaki, 2025) explique en partie la présence de cet enjeu dans les discussions. Cet espoir proviendrait d'une plus grande efficacité des technologies quantiques par rapport aux technologies de l'information actuelles, en particulier les superordinateurs. Toutefois, historiquement, une augmentation de l'efficacité technologique a souvent mené à une augmentation de leur utilisation, ce qui, dans ce cas-ci, pourrait paradoxalement mener à une augmentation de l'empreinte énergétique, soit le résultat contraire de celui souhaité et envisagé (Sorrell, 2009 ; Arpin, Leclerc et Lonca, 2024). Les perceptions des personnes participantes allaient aussi dans ce sens par la présence de la préoccupation de l'augmentation globale de la consommation énergétique, conforme à ce qui est présent dans la littérature à cet égard.

En somme, selon l'expérience des Dialogues quantiques, la capacité des personnes mobilisées d'anticiper les conséquences sociétales de technologies à venir serait potentiellement contrainte par le niveau de développement actuel de son écosystème, y compris ses industries, et les préoccupations liées à ce niveau devanceraient les autres préoccupations sociétales dans la réflexion des personnes participantes, du moins quant aux enjeux environnementaux. Sans être généralisable, ce constat serait éventuellement transférable de l'état actuel du développement de la quantique vers d'autres situations de futures technologies de rupture.

Le projet de recherche Dialogues quantiques est rendu possible grâce à la subvention n° 340778 du programme STIMuleS du FRQ.

RÉFÉRENCES

- Arpin, M.-L., Leclerc, S. H., et Lonca, G. (2024).** The Circular Economy (CE) Rebound as a Paradox of Knowledge: Forecasting the Future of the CE-IoT Nexus through the Global E-Waste Crisis. *Sustainability*, 16(15), 6364.
- Auffèves, A. (2022).** Quantum Technologies Need a Quantum Energy Initiative. *PRX Quantum*, 3, 020101. doi:10.1103/PRXQuantum.3.020101
- Berger, C., Di Paolo, A., Forrest, T., Hadfield, S., Sawaya, N., Stéchy, M., et Thibault, K. (2021).** Quantum technologies for climate change: Preliminary assessment. *arXiv*, 2107.05362.
- Cordier, S., Thibault, K., Arpin, M.-L., et Amor, B. (2025).** Scaling up to problem sizes: an environmental life cycle assessment of quantum computing. *Quantum Science and Technology*, 10, 025058. doi:10.1088/2058-9565/adc0ba
- Kahane, A. (2012).** *Transformative scenario planning: working together to change the future*. San Francisco, California, USA: Berret-Koehler Press.
- Meier, F. et Yamasaki, H. (2025).** Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation. *PRX Energy*, 4, 023008. doi:10.1103/PRX-Energy.4.023008
- Sorrell, S. (2009).** Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy*, 37(4), 1456-1469.
- von Schomberg, R. (2011).** *Towards Responsible Research and Innovation in the Information and Communication Technologies and Security Technologies Fields. A report from the European Commission Services*. Luxembourg: Publication Office of the European Union.



© Auteur(s), 2026. [Le Climatoscope dispose d'une licence non exclusive de publication et de diffusion. Article publié sous licence CC BY 4.0.](#)

