

*Sous la direction scientifique de
Raphaël MAUREL*

TRANSPARENCE, ÉTHIQUE ET GOUVERNANCE DE L'INTERNET



2 0 2 6

Institut Francophone pour la Justice et la Démocratie

Quelques enjeux éthiques d'un éventuel « Internet quantique »

Raphaël MAUREL¹

L'« Internet quantique » est un projet de nouveau « réseau de réseaux » évoqué, en tant que tel, depuis au moins 2008² et occasionnellement présenté – parfois dans un certain souci communicationnel – comme le futur de l'Internet actuel³.

Cette idée repose sur l'exploitation de la mécanique quantique et tout particulièrement de certaines propriétés remarquables, telles que l'intrication et la superposition quantiques, dont l'on connaît l'existence théorique depuis les années 1930 mais qui n'ont fait l'objet de démonstrations empiriques – notamment concernant l'intrication – que dans les années 1980⁴.

¹ Cette contribution s'inscrit dans les travaux de la Chaire « Encadrement éthique et juridique des technologies quantiques » dont l'auteur est titulaire à l'Institut universitaire de France pour la période 2024-2029. Achevée en avril 2025, elle a bénéficié d'un travail bibliographique préalable de M. Dan Ibala, doctorant en droit public à l'Université Bourgogne Europe (CREDIMI), ainsi que de l'éclairage de M. Charles Babin, postdoctorant en physique quantique à l'Université Bourgogne Europe (Laboratoire ICB) et de M. Frédéric Holweck, maître de conférences en mathématiques à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (Laboratoire ICB). L'auteur déclare n'avoir aucun conflit d'intérêts avec aucune institution ou organisation mentionnée dans la présente contribution.

² H. J. KIMBLE, « The quantum internet », *Nature*, vol. 453, 2008 (doi:10.1038/nature07127), p. 1023-1030.

³ V. par exemple P. VERMAAS, D. NAS, L. VANDERSYPEN et D. ELKOUSS CORONAS, *Quantum internet. The internet's next big step*, Delft University of Technology, 2019, 61 p.

⁴ Pour davantage d'éléments sur les fondements physiques des technologies quantiques, voir les travaux de Julien Bobroff, notamment son site *La Physique Autrement* (<https://vulgarisation.fr/bobroff/> ; lien consulté le 3 juin 2025) et son ouvrage (J. BOBROFF, *Bienvenue dans la nouvelle*

Depuis lors, une véritable course mondiale aux technologies quantiques a débuté⁵. Depuis le milieu des années 2010, avec une accélération notable depuis le début de la décennie 2020⁶, les États qui disposent de la capacité économique et scientifique de le faire multiplient les investissements pour parvenir à une maîtrise des différentes technologies dérivées des connaissances actuelles en physique quantique : ordinateur quantique, capteurs quantiques et moyens de communication quantiques. Alors que ces technologies sont en cours de développement, les juristes se saisissent peu à peu des enjeux majeurs qui découleront de cette future révolution technologique. Plusieurs chercheurs insistent déjà sur la nécessité de développer des technologies quantiques de manière responsable, en intégrant des considérations éthiques, légales, sociales et politiques (soit un cadre conceptuel « ELSPI » pour une technologie quantique responsable) dans la recherche et le développement quantiques⁷.

Constatant que certaines de ces « innovations totales »⁸ sont en train de passer de la théorie à la réalité commerciale⁹, Mauritz Kop et plusieurs de ses collègues soulèvent ainsi un certain nombre d'interrogations éthiques, juridiques et sociales, notamment en matière de sécurité nationale, de double

révolution quantique. Ordinateurs, cryptographie, Internet, spatial : pourquoi le XXI^e siècle sera quantique, Champs, 2025, 336 p.) V. également R. MAUREL, « Transformations quantiques et transformations du droit. Premières pistes de réflexion », *Revue générale de droit*, 2024, n° 65119 (accessible en ligne) ; L. ADATTO, « Enjeux et perspectives du développement des technologies quantiques », *Technologie et innovation*, vol. 8, n° 1, 2023 (doi:10.21494/ISTE.OP.2023.0914) ou R. MAUREL, « Les technologies quantiques », in M. CARON et R. MAUREL (dir.), *Penser la transition numérique. Vers un monde digital durable*, Éditions de l'Atelier, 2023, p. 99-104.

- 5 V. par exemple A. PANNIER, « La course aux technologies numériques. Accélération après-Covid », in T. DE MONTBRIAL et D. DAVID, *Ramses 2022 : Au-delà du Covid*, Dunod, 2021 (doi:10.3917/dunod.colle.2022.01.0090), p. 90-95 ; M. JULIENNE, « La Chine en quête d'un saut quantique », IFRI, 2024 (coi:20.500.12592/2v7f06o).
- 6 Un aperçu des stratégies quantiques nationales de plusieurs États du monde peut être consulté sur le site du CevoteQ : <https://www.cevoteq.com/ressources-et-donnees/strategies-quantiques-nationales.html> (lien consulté le 3 juin 2025). V. Également R. MAUREL, « Les stratégies quantiques des États du monde », in O. BICHSEL, O. DELAS, M. MONDELICE et R. OUELLET (dir.), *L'Union européenne, puissance numérique globale*, Bruylant, à paraître en 2026.
- 7 M. KOP, M. ABOY, E. DE JONG, U. GASSER *et al.*, « Towards Responsible Quantum Technology: Safeguarding, Engaging and Advancing Quantum R&D », *UC Law Science and Technology Journal*, vol. 15, n° 1, 2024, p. 63-94 ; v. également M. KOP, « Establishing a Legal-Ethical Framework for Quantum Technology », *Yale Journal of Law & Technology (YJoLT)*, The Record, 2021, en ligne : <https://yjolt.org/blog/establishing-legal-ethical-framework-quantum-technology> (lien consulté le 3 juin 2025).
- 8 J. CHARPENET et M. TELLER, « La régulation des technologies quantiques : un cas d'école pour la régulation des innovations 'totales' », *Dalloz IP/IT*, n° 9, 2024, p. 459.
- 9 On pense notamment aux entreprises françaises comme Pasqal, *startup* spécialisée dans la construction d'ordinateurs quantiques à atomes neutres, Alice & Bob, *startup* spécialisée dans la conception de qubits, ou encore Quandela, spécialisée dans la photonique quantique ; et à l'étranger à de nombreuses sociétés comme IBM, Google ou Meta qui investissent massivement dans la recherche quantique.

usage civil et militaire¹⁰, de protection de la vie privée, de sécurité des produits, de propriété intellectuelle, de concurrence (dé)loyale ou encore d'égalité entre les États et les populations¹¹. Ces sujets émergent peu à peu dans l'agenda politique international, comme en témoigne la proclamation de 2025 comme « Année internationale des sciences et technologies quantiques » par l'Assemblée générale des Nations Unies¹². Des chercheurs plaident notamment pour une intégration des enjeux quantiques au sein des débats du G7 organisé au Canada en 2025¹³.

Il paraît donc pertinent, dans le cadre d'une réflexion sur la gouvernance de l'Internet « classique », de s'interroger quant aux formes futures qu'il pourrait prendre ou, en l'espèce, quant à la manière par laquelle un autre modèle d'Internet pourrait être envisagé et, peut-être un jour, régulé. Pour ce faire, et au regard du caractère tant technique que prospectif du sujet, il est souhaitable de tenter de définir, concrètement, l'Internet quantique (I). Celui-ci étant un objectif scientifique, et donc un objet en développement, il est encore temps de déployer à son égard une réflexion éthique complète, ce qui est parfois souhaités par les chercheurs identifiant la nécessité d'un Internet quantique « responsable »¹⁴ (II).

I. ESSAI DE CARACTÉRISATION D'UN INTERNET QUANTIQUE

Pour comprendre les contours du futur « Internet quantique » (B), il faut comprendre en quoi il nécessite la maîtrise des communications quantiques et en quoi celles-ci se différencient de la cryptographie quantique (A).

¹⁰ Sur ce sujet spécifique, voir la conférence d'Anne Millet-Devalle donnée le 17 février 2025 dans le cadre du cycle de webinaires *Lundi Quantique* sur « Le contrôle des technologies quantiques dans le cadre du Règlement 2021/821 de l'Union européenne sur le contrôle des biens à double usage », disponible en rediffusion : <https://www.cevoteq.com/le-media/2025/lundi-quantique-5.html> (lien consulté le 3 juin 2025).

¹¹ M. KOP, M. ABOY, E. DE JONG, U. GASSER *et al.*, art. cit. (n. 7).

¹² AGNU, Résolution 78/287 du 7 juin 2024 « 2025, Année internationale des sciences et technologies quantiques », A/RES/78/287.

¹³ T. DEKKER, L. LAMBERT et F. MARTIN-BARITEAU, « Enabling Quantum Technology Cooperation: A Strategic Priority for the G7 Ecosystem in the Global Race », *Think 7 Canada*, Policy Paper, avril 2025, p. 1-12.

¹⁴ Parexemple K.L. VANDERENDEN, G. PROFITILLOTIS et D. CROESE, « Advancing a Responsible Future Quantum Internet », *IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering*, 2024 (doi:10.1109/QCE60285.2024.10254).

A. De la cryptographie quantique aux communications quantiques

Actuellement, les technologies quantiques sont déjà utilisées pour sécuriser les communications classiques, sur les réseaux existants. À cet égard, la distribution quantique de clés (« QKD ») est l'application la plus connue de sécurisation quantique des échanges, bien que d'autres applications puissent émerger. Le principe fondamental de la QKD consiste à utiliser les états quantiques de plusieurs photons pour partager des clés secrètes entre deux parties distantes souhaitant communiquer¹⁵. L'encodage des informations dans la QKD se fait lui-même en utilisant les propriétés quantiques des photons, comme leur polarisation ou leur phase : chaque bit d'information de la clé secrète est encodé sur un photon en utilisant différentes orientations de polarisation pour représenter les valeurs binaires classiques 0 et 1¹⁶. L'information classique (en bits) est donc traduite en une série de photons polarisés, qui est ensuite envoyée d'un émetteur à un récepteur *via* un canal classique comme la fibre optique. Grâce à une propriété quantique remarquable, les deux parties communicantes peuvent détecter toute tentative d'espionnage visant à intercepter le message ou des connaissances sur la clé ; la mesure de l'état (ici la polarisation du photon) par un éventuel espion modifierait en effet l'état de la particule, rendant la présence de l'espion détectable – par ailleurs, le théorème de « non-clonage » prescrit que l'espion ne peut pas copier simplement le qubit intercepté¹⁷. La sécurité de la QKD repose donc sur les lois de la physique quantique plutôt que sur la complexité computationnelle¹⁸, ce qui en fait une solution prisée pour répondre aux enjeux de chiffrement des communications. Des sociétés telles qu'IDQ, entreprise suisse, proposent déjà des solutions de cryptographie quantique pour sécuriser les communications classiques de gouvernements¹⁹.

¹⁵ Une clé secrète est une séquence de bits utilisée pour chiffrer et déchiffrer des messages. La sécurité de la communication dépend de la confidentialité et de l'intégrité de cette clé.

¹⁶ Ch. H. BENNETT et G. BRASSARD, « Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing », *Theoretical Computer Science*, vol. 560-1, 2014 (doi:10.1016/j.tcs.2014.05.025), p. 7-11.

¹⁷ Grâce aux propriétés de la physique quantique, il est donc impossible d'intercepter une communication quantique sans que le destinataire du message en soit informé.

¹⁸ Actuellement, la cryptographie des communications repose sur la difficulté théorique et pratique qu'il y a, pour un ordinateur, à déchiffrer un code complexe. Toutefois, l'émergence du calcul quantique remet en cause fondamentalement les méthodes de cryptographie actuelles, de sorte que deux disciplines ont émergé pour y faire face : d'une part la cryptographie quantique, qui consiste à utiliser des technologies quantiques pour crypter l'information et la sécurité ; d'autre part la cryptographie post-quantique, qui consiste à lutter, avec des moyens conventionnels, contre l'utilisation du calcul quantique en exploitant certaines failles rendant difficile voire impossible, même avec un ordinateur quantique, le décryptage de l'information.

¹⁹ L'entreprise explique par exemple avoir, dès 2007, sécurisé les transferts de données du canton de Genève lors de leurs élections (voir en ligne : <https://marketing.idquantique.com/acton/>

ou des entreprises, sur des distances allant jusqu'à 150 km²⁰. Ces solutions sont généralement interopérables avec les réseaux classiques, dans la mesure où il s'agit de sécuriser des données conventionnelles, et non de transmettre des données quantiques.

Contrairement aux réseaux classiques qui utilisent des « bits », les réseaux de communication quantiques utilisent en effet des « qubits », qui peuvent exister dans une superposition de deux états différents, permettant ainsi des calculs quantiques fondamentalement différents des calculs classiques. Dit autrement, il ne s'agit plus de transmettre des informations classiques (bits) en assurant leur sécurité *via* des techniques quantiques, mais de transmettre des informations quantiques (qubits), permettant des communications et des calculs quantiques distribués. La communication quantique utilise ainsi certains principes de la mécanique quantique (superposition, intrication) pour sécuriser les données mais ouvre aussi et surtout la voie vers des fonctionnalités inédites – par exemple le calcul quantique distribué entre plusieurs ordinateurs quantiques « connectés » par cette voie de communication elle-même quantique. Les futurs réseaux quantiques devront ainsi permettre de générer une intrication quantique à longue distance, ce qui constitue actuellement un défi technique. Si la théorie est connue de longue date, son champ d'application est peu à peu vérifié, avec des communications réussies sur des distances de plus en plus longues. Elles sont ainsi passées de quelques centaines de mètres en 1998²¹ à 2 km en 2004²², à 1 200 km en 2017²³ et à plus de 2 000 km en espace libre en 2019²⁴.

Ces communications quantiques réussies ouvrent dorénavant la voie à l'émergence d'un « Internet quantique ».

attachment/11868/f-020f/1/-/-/-/Geneva%20Govt_%20DCI%20QKD%20Use%20Case.pdf, lien consulté le 3 juin 2025).

- ²⁰ Tel est la portée annoncée du système Clavis XG QKD System, bien qu'il soit précisé que le taux de distribution de clés soit plus élevé à courte distance : <https://www.idquantique.com/quantum-safe-security/products/clavis-xg-qkd-system/> (lien consulté le 3 juin 2025).
- ²¹ J.-W. PAN, D. BOUWMEESTER, H. WEINFURTER et A. ZEILINGER, « Experimental Entanglement Swapping: Entangling Photons That Never Interacted », *Physical Review Letters*, vol. 80, n° 18, 1998 (doi:10.1103/PhysRevLett.80.3891), p. 3891-3894.
- ²² H. DE RIEDMATTEN, I. MARCIKIC, J. A. W. VAN HOUWELINGEN, W. TITTEL, H. ZBINDEN et N. GISISIN, « Long-distance entanglement swapping with photons from separated sources », *Physical Review A*, vol. 71, n° 5, 2005 (doi:10.1103/PhysRevA.71.050302).
- ²³ J. YIN, Y. CUAO *et al.*, « Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers », *Science*, vol. 356, n° 6343, 2017 (doi:10.1126/science.aan321), p. 1140-1144.
- ²⁴ Y.-A. CHEN *et al.*, « An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres », *Nature*, vol. 589, 2021 (doi:10.1038/s41586-020-03093-8), p. 214-219.

B. Vers un Internet quantique

Au-delà du principe des communications quantiques, l'idée d'un « Internet quantique » implique que plusieurs machines quantiques soient reliées entre elles.

La première étape consiste, une fois la technique des communications quantiques maîtrisée, à créer un réseau local ou « intranet quantique » au sein duquel plusieurs machines quantiques pourraient communiquer des informations en circuit fermé. Un tel réseau repose sur des « nœuds », éléments fondamentaux de l'Internet quantique : chaque nœud serait un petit ordinateur quantique capable de stocker, traiter et transmettre des informations quantiques. Ce sont ces nœuds qui doivent, *in fine*, être interconnectés *via* des fibres optiques, un espace libre ou d'autres systèmes permettant la transmission d'informations quantiques sur de longues distances²⁵. Un exemple peut être trouvé dans le réseau quantique développé aux États-Unis récemment : en 2023, les physiciens de l'Université de Harvard sont parvenus, en utilisant la fibre de télécommunication existante dans la métropole de Boston, à intriquer deux nœuds quantiques, situés concrètement dans deux étages voisins du Laboratoire de science et d'ingénierie de Harvard. Ces deux nœuds, consistant en deux petits ordinateurs quantiques de deux qubits (l'un utilisé pour la communication et l'autre pour le stockage), étaient reliés par une boucle de fibre optique d'environ 35 kilomètres à travers plusieurs villes entre Boston et Cambridge²⁶.

Un « Internet quantique » va cependant bien plus loin que les seules communications quantiques entre deux nœuds, puisqu'il s'agit de concevoir un système permettant à des ordinateurs quantiques de fonctionner en réseau et donc de coopérer pour résoudre, potentiellement, des difficultés qu'un unique ordinateur quantique ne serait pas nécessairement en mesure de résoudre. Dit autrement, il s'agit de parvenir à créer une sorte de « superordinateur quantique », sans même avoir à développer de puissants ordinateurs quantiques : la connexion de plusieurs dizaines, centaines ou milliers de petits ordinateurs quantiques pourrait, selon ce modèle, permettre d'effectuer des calculs vertigineux. La désignation exacte de « l'Internet quantique » est donc sujette à caution : il ne s'agit pas vraiment d'une projection de

25 W. LUO, L. CAO *et al.*, « Recent progress in quantum photonic chips for quantum communication and internet », *Light: Science & Applications*, vol. 12, n° 175n, 2023 (doi:10.1038/s41377-023-01173-8), p. 2.

26 C. M. KNAUT, A. SULEYMANZADE, Y.-C. WEI *et al.*, « Entanglement of nanophotonic quantum memory nodes in a telecom network », *Nature*, vol. 629, 2024 (doi:10.1038/s41586-024-07252-z), p. 573-578. V. également la version vulgarisée : B. MONGNE, « Des physiciens de Harvard présentent le premier réseau quantique métropolitain à Boston », *Issues.fr*, 2024, en ligne : <https://issues.fr/des-physiciens-de-harvard-presentent-le-premier-reseau-quantique-metropolitain-a-boston/> (lien consulté le 3 juin 2025).

l'Internet classique à l'ère quantique, mais plutôt d'un système de distribution de l'intrication quantique entre nœuds dans l'objectif de constituer, par accumulation, une certaine forme d'ordinateur quantique. La terminologie joue ici un rôle *marketing* certain, « Internet quantique » étant plus parlant – mais moins clair – que l'expression plus juste d'« informatique quantique distribuée ». Les attentes restent pour autant considérables, comme le relève un auteur dont on ne peut s'empêcher de relever le prisme technosolutionniste du propos :

It is expected that once the quantum internet almost becomes the global reality then its speed would be so astonishingly fast that far-flung clocks could be synchronized about a thousand times more precisely than the best atomic clocks available today. This would make GPS navigation much more precise than it is today (accuracy would increase from metres to millimetres) and map earth's gravitational field in such great details that scientists could spot the ripple of gravitational waves. In addition, the existence of such system would make it possible to teleport photons from distant visible-light telescopes all over the earth and link them into a giant virtual observatory. Thus, it would be possible to build ultra-sharp telescopes using widely separated observatories. Then there is a possibility for networking of super-powerful quantum computers across the globe to work together and create incredibly complex simulations. This could enable researchers to better understand the behaviour of molecules and proteins.²⁷

91

Un certain nombre de difficultés restent à résoudre pour permettre d'imaginer le déploiement d'un Internet quantique. D'abord, même si les communications quantiques entre nœuds peuvent reposer sur l'utilisation de fibres optiques existantes, similaires à celles utilisées dans les télécommunications classiques, les signaux quantiques restent fragiles et ne peuvent être ni copiés ni amplifiés, ce qui implique le développement de solutions spécifiques telles que les « répéteurs quantiques » pour permettre la transmission de qubits sur de longues distances. Celle-ci soulevant un certain nombre de difficultés, d'autres travaux proposent déjà des alternatives, comme l'utilisation d'une constellation de satellites en orbite basse équipés de liaisons laser intersatellites : les satellites transporteraient des sources de photons intriqués et/ou disposeraient d'un système de relais à miroir pour rediriger le trajet des photons dans l'espace, réduisant ainsi la dépendance à l'égard des répéteurs²⁸.

²⁷ A. LELE, *Quantum Technologies and Military Strategy*, Springer, 2021 (doi:10.1007/978-3-030-72721-5), p. 68.

²⁸ A. SCHABANI, « Building a global quantum internet using a satellite constellation with inter-satellite links », *Quantum Physics*, 2025 (doi:10.48550/arXiv.2505.08075).

Les limites classiques de l'utilisation des qubits doivent par ailleurs être surmontées. En particulier, les qubits sont très sensibles au « bruit », c'est-à-dire aux interactions avec leur environnement, sont générateurs d'erreurs (notamment l'inversion de bits) et « sortent » aisément de leur état quantique face à ces interférences – on parle de « décohérence ». Ces difficultés, qui constituent également autant de freins au développement des ordinateurs quantiques, font l'objet de nombreux travaux, qui ont par exemple conduit à l'émergence de la notion de « qubit logique », c'est-à-dire un ensemble de plusieurs qubits « physiques » stockant les mêmes informations afin de garantir la continuité de l'opération de calcul. L'objectif affiché par certaines sociétés particulièrement avancées, comme Alice & Bob, est de parvenir à un ordinateur universel et tolérant aux erreurs, comprenant 100 qubits logiques fiables et intriqués, d'ici 2030²⁹.

L'enjeu consiste, ensuite, à permettre l'interopérabilité des différents mini-réseaux quantiques qui émergent, afin de constituer un véritable Internet quantique. Le projet de l'Alliance pour l'Internet Quantique vise, en ce sens, à développer des répéteurs quantiques basés sur l'intrication annoncée pour distribuer efficacement l'intrication et intriquer des qubits à longue durée de vie dans un futur Internet quantique à l'échelle européenne³⁰. Un Internet quantique européen, et donc local, pourrait ainsi voir le jour dès 2030 – si l'on en croit la communication enthousiaste de l'Alliance³¹. Or, l'interopérabilité, à l'échelle européenne comme mondiale, ne peut être garantie que par l'existence d'une coopération internationale. Dit autrement, la construction d'un Internet quantique nécessite une collaboration internationale pour le développement de technologies, de standards et d'infrastructures communes, ce qui fait entrer le sujet dans le champ disciplinaire du droit.

Avant toutefois d'aborder les aspects juridiques du développement d'un futur Internet quantique, il est souhaitable d'évoquer certains questionnements éthiques sous-jacents – étant entendu que, dans notre conception, le raisonnement éthique n'est pas nécessairement un préalable obligatoire à la création de la règle de droit, dans le sens où il devrait continuer à exister une

²⁹ N. COPPOLA, R. LESCANNE, L. PROST et M. ZESKO, *Think Inside the Box. Quantum computing with cat qubits. An Introduction to Useful Quantum Computing by Alice & Bob*, Alice & Bob, décembre 2024, en ligne : <https://alice-bob.com/wp-content/uploads/2024/12/Think-Inside-The-Box-Alice-Bob-Whitepaper.pdf> (lien consulté le 3 juin 2025).

³⁰ Le projet est particulièrement ambitieux : « *We are pushing the frontier of technology in both end nodes (trapped ion qubits, diamond NV qubits, neutral atom qubits) and quantum repeaters (rare-earth-based memories, atomic gases, quantum dots), and is set to demonstrate the first integration of both subsystems. Our world-leading and multidisciplinary team of academic, industrial and research technology organisations puts us in a strong position to make this a reality by 2030* » (page d'accueil de la Quantum Internet Alliance : <https://quantuminternetalliance.org/>, lien consulté le 3 juin 2025).

³¹ *Ibid.*

fois la norme juridique adoptée, mais qu'il reste souhaitable à tous les stades du développement technologique.

II. QUELQUES ENJEUX ÉTHIQUES PROPRES AU DÉVELOPPEMENT D'UN INTERNET QUANTIQUE

La définition de l'éthique est à peu près aussi complexe que celle du droit et ne sera ici pas discutée. On se bornera à la distinguer de la morale³² en postulant son caractère contingent et relatif : alors que, dans notre conception, la morale est un ordre normatif universel et absolu, l'éthique est contextuelle, conjoncturelle et évolutive³³. Plus encore, on se limitera ici à l'envisager sous l'angle exclusif du « questionnement éthique » proposé par Ricoeur³⁴, en posant deux questions : celle, précise, de la nécessité du développement d'un Internet quantique (A) et celle, plus générale, de son bornage existentiel par un cadre éthique (B).

A. La question de la nécessité du développement d'un Internet quantique

93

L'émergence d'un Internet quantique soulève des questions similaires à, ou à tout le moins pas totalement différentes de celles posées, la plupart du temps seulement *a posteriori*, par le développement de l'intelligence artificielle générative (IAG³⁵). La première d'entre elles est la question de l'intérêt concret, pour l'Humanité, de cette technologie – c'est-à-dire un questionnement strictement utilitariste.

Dans nos sociétés contemporaines, la recherche constante de l'innovation repose sur une aspiration héritée du capitalisme : « [c']est la promesse de la société de consommation : le bonheur lié à l'achat d'un nouveau produit. [...] Le

³² Cette position n'est pas unanime. V. par exemple, *contra*, R. BRAGUE, *La morale remise à sa place*, Gallimard, 2024.

³³ Pour davantage d'éléments, on renvoie à R. MAUREL, *Introduction au droit international de l'éthique des affaires*, Mare & Martin, coll. « Droit international », 2025, 184 p., spéc. l'introduction générale.

³⁴ P. RICOEUR, *Soi-même comme un autre*, Éd. du Seuil, 1990, 448 p.

³⁵ Nous utilisons l'abréviation « IAg » et non « IAG », cette dernière désignant plus communément l'intelligence artificielle à usage général au sens du Règlement (UE) 2024/1689 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle et modifiant les règlements (CE) n° 300/2008, (UE) n° 167/2013, (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1139 et (UE) 2019/2144 et les directives 2014/90/UE, (UE) 2016/797 et (UE) 2020/1828 (règlement sur l'intelligence artificielle. V. spécifiquement le chapitre V du Règlement.

progrès, c'est un désir et ça peut devenir une certitude »³⁶. Dans ce contexte³⁷, il faut « *se méfier du solutionnisme scientifique et technique. C'est le vieil adage : la science trouve toujours les réponses aux problèmes qu'elle pose. Cela marche plutôt, mais pas toujours, ce qui pousse à être prudent. On sait aujourd'hui, avec une petite manipulation génétique, faire pousser des ailes à un bébé, mais ce n'est pas parce qu'on sait le faire qu'on peut le faire, qu'on doit le faire* »³⁸. Dit autrement, nos modèles sociaux nous incitent à désirer de nouvelles technologies, l'éventuelle conscience, individuelle ou collective, de la fragilité du besoin ressenti étant compensée par un discours technosolutionniste fournissant une assise utilitariste solide : l'innovation entraînera l'enrichissement économique de ses auteurs, promoteurs et plus largement du groupe social collatéral (une entreprise, une région, un État, une organisation internationale, un continent...), et apportera des solutions aux problèmes contemporains qui affectent ledit groupe ou l'Humanité dans son ensemble (faiblesse stratégique et militaire ; indisponibilité de ressources naturelles ; changement climatique, etc.).

Ceci connu, il est pertinent de faire un « pas de côté » et d'interroger clairement l'intérêt d'une nouvelle technologie telle que l'Internet quantique. Quels sont les usages concrets qu'il pourrait offrir ? Ces avantages justifient-ils les investissements massifs et les efforts nécessaires pour son déploiement, au détriment d'autres avancées technologiques ou de la résolution de situations nécessitant des investissements publics et privés (faim dans le monde, conflits, accès à l'eau...) ? Si cette innovation est destinée à une commercialisation mondiale, il est également souhaitable de se demander si elle répond à un besoin des sociétés, ou à un imaginaire politique et social la rendant souhaitable, dans un groupe humain donné. Ces questions ne peuvent pas trouver réponse sous la plume d'un juriste, mais pourraient, voire devraient, être posées. On peut pour ce faire s'appuyer sur les acquis de la philosophie. Ainsi, Thierry Ménissier écrit de manière éclairante :

[...] la démarche d'évaluation éthique de l'innovation retrouve l'exigence typique des aspirations utopiques, dans lesquelles il s'agit pour un collectif de se redonner à lui-même et par ses propres ressources imaginaires des options d'avenir ouvertes. Plusieurs critères

³⁶ P.-H. TAVOILLOT, « La ligne de fracture entre ceux qui pensent que c'était mieux avant et ceux qui sont convaincus du contraire imprègne encore tous nos débats d'aujourd'hui », in N. BOUZOU, C. FLEURY, É. KLEIN, K. SAFA, C. SENIK, P.-H. TAVOILLOT, J. VIARD, *Peut-on encore croire au progrès*, L'aube, 2023, p. 24.

³⁷ On ne distinguera pas ici « progrès » d'« innovation ». Le même auteur les distingue toutefois et écrit que « [i]nnovation et progrès, c'est comme abaissement et décadence. La décadence d'un pays, c'est très difficile à démontrer et cela contient une dimension morale. Alors que l'abaissement du PIB, on sait le mesurer. [...] Pour le progrès, c'est pareil, alors que l'innovation, on sait l'évaluer. Toute innovation n'est pas un progrès, mais le progrès ne saurait se passer d'innovation » (*ibid.*, p. 41).

³⁸ *Ibid.*, p. 35.

pour des usages et des pratiques éclairées apparaissent alors – en voici quatre possibles. D'abord, un méta-critère valant pour toute innovation recevable au sein de nos sociétés dites de l'information et de la connaissance peut être trouvé dans la « publicité » au sens où la démocratie repose sur l'espace de publicité décrit par Kant [...] : selon ce critère, une innovation peut être dite recevable si et seulement si, dans ses conditions d'émergence, de diffusion et d'usage, sont mises à disposition les informations concernant son « coût social et environnemental ». [...] Voici ensuite trois critères particuliers possibles : l'affordance, la convivialité et l'inclusivité. En premier lieu, à partir des travaux en psychologie de la perception, la notion d'« affordance » peut être employée, en tant qu'elle désigne selon son promoteur James J. Gibson une qualité de l'objet ou du dispositif qui constitue une « invite » à les utiliser. Deuxièmement, une innovation peut être dite recevable du fait de son caractère convivial, par référence à une thématique qui fut caractérisée par Ivan Illich comme la triple capacité d'un dispositif à être ouvert au contrôle des usagers, à permettre leur autonomie et à les relier dans une interdépendance non contrainte. Troisièmement, un critère peut être trouvé dans l'inclusivité, à savoir, par référence aux travaux d'Iris Marions Young, dans la capacité d'une innovation à contrer efficacement un des défauts des sociétés contemporaines, le double repli individualiste et communautaire.³⁹

L'impact environnemental d'un Internet quantique constitue, à la lumière de ce qui précède, un autre point pertinent de la discussion quant à sa nécessité, et donc un enjeu de la réflexion éthique concernant le développement de cette innovation. La question est d'autant plus importante qu'il ressort des éléments précédents que l'Internet quantique ne remplacera pas l'Internet classique, mais s'y superposera, ajoutant une couche supplémentaire de consommation énergétique et de complexité technologique à l'environnement numérique contemporain. À l'heure où le poids du secteur du numérique dans la consommation de ressources énergétiques et naturelles fait l'objet d'une attention particulière partout dans le monde⁴⁰, il est à craindre que cette superposition accroisse encore la pression sur ces ressources.

³⁹ Th. MÉNISSIER, *Innovations. Une enquête philosophique*, Hermann, 2021, p. 204-205, citant E. KANT, *Réponse à la question « Qu'est-ce que les Lumières »* [1784], trad. J.-F. POITIER et F. PROUST, Flammarion, 1991, p. 45-47 ; J.-J. GIBSON, *Approche écologique de la perception visuelle* [1979], trad. O. PUTOIS, Éd. Dehors, 2014 ; I. ILLICH, *La Convivialité*, Éd. du Seuil, 1973 ; I. M. YOUNG, *Inclusion and Democracy*, OUP, 2002.

⁴⁰ V. à ce sujet l'édifiante mise à jour du rapport de l'ADEME-ARCEP de 2022 : ADEME-ARCEP, *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France. Mise à jour de l'étude ADEME-Arcep*, Rapport final, 2025, 35 p.

Deux remarques peuvent être formulées à cet égard. D'une part, il est remarquable que la question de la consommation énergétique du calcul quantique fasse partie intégrante des recherches en cours sur ce sujet. Par exemple, dans une thèse récente soutenue à Grenoble, on peut lire que le coût énergétique du calcul quantique devrait être un critère d'évaluation du potentiel de mise à l'échelle des ordinateurs quantiques⁴¹. L'objectif du travail effectué était de déterminer la quantité minimale de ressources (par exemple, la puissance énergétique) nécessaire pour effectuer un calcul quantique, en tenant compte de la contrainte selon laquelle l'algorithme quantique doit fournir une réponse correcte avec une probabilité ciblée. Ce type de recherche, promu par des appels à ne pas reproduire certaines erreurs du passé – par exemple pris parmi d'autres, des chercheurs ont proposé en 2024 un cadre de calcul quantique conscient du carbone (CQC)⁴² – permet d'optimiser *by design* l'architecture globale de l'ordinateur quantique fonctionnel dans l'objectif assumé de minimiser les ressources utilisées. Des réflexions pluridisciplinaires s'inscrivent dans la même dynamique⁴³. D'autre part, des recherches récentes tendent à démontrer que le calcul quantique présenterait un avantage exponentiel, en termes de consommation d'énergie, par rapport au calcul classique pour résoudre un certain nombre de problèmes⁴⁴ ; des techniques concrètes pour déterminer la consommation d'énergie du calcul émergent également⁴⁵.

Ces premiers éléments ne doivent pas conduire à considérer la question comme résolue. Bien au contraire, ils appellent à la réflexion collective, laquelle ne peut avoir lieu que dans la mesure où une information la plus large est diffusée à propos des technologies quantiques. Une fois le sujet diffusé dans la société civile, la question de la réaction sociale à d'éventuelles utilisations abusives ou problématiques de l'Internet quantique se posera vraisemblablement.

⁴¹ M. FELLOUS ASIANI, *The resource cost of large scale quantum computing*, Thèse soutenue publiquement le 9 novembre 2021, Université Grenoble Alpes. V. spécifiquement le chapitre 4.

⁴² N. ARORA et P. KUMAR, « Sustainable Quantum Computing: Opportunities and Challenges of Benchmarking Carbon in the Quantum Computing Lifecycle », *ArXiv abs/2408.05679*, 2024 (doi:10.48550/arXiv.2408.05679).

⁴³ V. notamment les ressources mises en place par le programme QuantAlps de l'Université Grenoble Alpes, lequel intègre les sciences humaines et sociales à la réflexion, et notamment les *Quantum Technologies and Sustainability Seminar Series*, en ligne : <https://quantalps.univ-grenoble-alpes.fr/tiqua/sustainable-quantum/quantum-technologies-and-sustainability-seminar-series-1475484.kjsp?RH=1680003510689> (lien consulté le 12 juin 2025).

⁴⁴ Par exemple F. MEIER et H. YAMASAKI, « Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation », *PRX Energy*, vol. 4, 2025, n° 023008 (doi:10.1103/PRXEnergy.4.023008).

⁴⁵ *Ibid.*

B. La question des modalités de l'encadrement éthique d'un Internet quantique

La réflexion qui suit se fonde sur le constat selon lequel le virage de l'éthique de l'intelligence artificielle (IA), spécifiquement générative, n'a été pris, en Europe comme ailleurs, essentiellement que sous l'angle discursif – ce qui a conduit à grande une confusion politique voire juridique dans le débat relatif à son l'encadrement⁴⁶.

Le risque lié à l'irruption de technologies quantiques sur les marchés civils est celui d'une valorisation économique rapide, menant à la généralisation de leurs usages sans que leurs impacts concrets aient pu être mesurés. Le raisonnement par analogie avec l'IA générative présente certes des limites que l'on ne peut ici ignorer. D'une part, l'IA générative n'est pas une « révolution technologique » comparable aux technologies quantiques. Si l'IA générative est essentiellement une déclinaison commerciale de modèles de langages probabilistes fondés, en sciences de l'informatique, sur des méthodes d'apprentissage automatique par ailleurs connues – c'est-à-dire une évolution logicielle – les technologies quantiques s'appuient sur les sciences physiques et entraînent un changement de paradigme matériel fondé sur la maîtrise de savoirs jusqu'ici théoriques en mécanique quantique. D'autre part, les technologies quantiques sont d'abord développées en matière militaire⁴⁷ et la submersion des marchés par leur commercialisation est pour le moins incertaine. Toutefois, on peut raisonnablement supposer que des usages commerciaux seront développés à l'avenir, ne serait-ce que pour permettre le financement des infrastructures quantiques nécessaires au saut technologique espéré.

Dans l'hypothèse, dont on assume donc le caractère prospectif, d'une commercialisation de l'accès à l'Internet quantique, d'outils permettant d'y accéder ou encore de plateformes permettant de développer des Internet quantiques privés, à usage personnel ou collectif, l'un des principaux risques identifiables est la régulation des usages dans l'urgence. Celle-ci pourrait se manifester, par analogie avec les réactions à l'émergence de l'IA générative depuis la commercialisation de ChatGPT par OpenAI en novembre 2022, sous la forme de listes de principes plus ou moins clairs destinés à encadrer ces usages. Si la réflexion autour de principes d'usages responsables,

⁴⁶ Sur ce point, v. R. MAUREL, « Démystifier l'IA et en dessiner une éthique pour sortir de la confusion ambiante », *The Conversation*, 11 février 2025, en ligne : <https://theconversation.com/demystifier-lia-et-en-dessiner-une-ethique-pour-sortir-de-la-confusion-ambiante-249299> (lien consulté le 10 juin 2025).

⁴⁷ En témoigne, encore, le discours « Plan quantique : une stratégie ambitieuse et souveraine » du ministre français des Armées Sébastien Lecornu en clôture du forum France Quantum le 11 juin 2025 : <https://www.defense.gouv.fr/actualites/plan-quantique-strategie-ambitieuse-souveraine> (lien consulté le 14 juin 2025).

c'est-à-dire une approche « *principiste* »⁴⁸, n'est par nature pas problématique – elle est par ailleurs déjà en cours de réflexion au sein de la doctrine⁴⁹ –, deux écueils au moins sont possibles. Le premier consiste à se borner à cette approche, sans développer de démarches éthiques alternatives et complémentaires – qu'elles soient axiologiques, déontologiques ou autres⁵⁰. Le second consiste à construire une ou plusieurs approches principistes en confondant l'origine et la nature des principes dégagés. Comme on a eu l'occasion de l'écrire par ailleurs, la volonté de réglementer les usages de l'IA, générative ou non, a mené à la juxtaposition, au sein de plusieurs listes officielles⁵¹ de principes parfois qualifiés d'éthiques, de principes techniques (la robustesse), sociologiques voire anthropologiques (la diversité), psychologiques (le contrôle humain, le bien-être sociétal), juridiques (le respect de la vie privée) ou encore transversaux (la « responsabilité », l'« action humaine »)⁵². Il en ressort une confusion massive et largement répandue entre le domaine de l'encadrement éthique et le droit de l'IA⁵³, laquelle porte dans l'ensemble préjudice à la société. Il s'agit donc, pour penser l'éthique de l'Internet quantique – et par extension de l'ordinateur quantique – de ne pas reproduire les erreurs, dues à une approche par trop principiste, commises s'agissant de l'encadrement de précédentes technologies comme Internet ou l'IA.

Une autre approche, complémentaire bien que parfaitement distincte de toute approche principiste des usages, serait de se fonder sur l'idée de biens communs pour encadrer le développement de l'Internet quantique. L'idée consisterait à reconnaître cette technologie comme un patrimoine collectif, appartenant à l'ensemble de l'humanité, et à en garantir une gouvernance collective fondée sur des principes d'accès égal et libre. Elle repose d'ailleurs sur les fondements théoriques qui ont guidé la création de l'Internet libre, un « *commun 'by design'* »⁵⁴ où l'objectif premier était de fournir un accès universel et transparent au réseau tout en préservant des valeurs telles que la neutralité⁵⁵, l'ouverture ou la liberté d'usage. Penser d'emblée l'Internet

⁴⁸ Voir la contribution de Thierry MÉNISSIER dans cet ouvrage.

⁴⁹ M. KOP *et al.*, « Ten Principles for Responsible Quantum Innovation », *Quantum Science and Technology*, vol. 9, n° 035013, 2024 (doi:10.1088/2058-9565/ad3776).

⁵⁰ Voir la contribution de Thierry MÉNISSIER dans cet ouvrage.

⁵¹ Il peut s'agir de documents produits par des organisations internationales (UNESCO, Union européenne), par des autorités administratives indépendantes (CNIL, autorité de protection des données en France) ou encore par des juridictions (Conseil d'État ou Cour des comptes en France).

⁵² R. MAUREL, « Éléments pour une éthique de l'IA simplifiée », Note n° 40 de L'Observatoire de l'éthique publique, février 2025, spéc. p. 8.

⁵³ Voir, dans le même sens, la contribution d'Anne-Thida NORODOM dans le présent ouvrage.

⁵⁴ V. PEUGEOT, « Biens communs et numérique : l'alliance transformatrice », in L. CALDERAN, P. LAURENT, H. LOWINGE et J. MILLET, *Le document numérique à l'heure du web*, ADBS, 2012, p. 141-154, spéc. le 2.

⁵⁵ Voir la contribution d'Anne-Thida NORODOM dans l'ouvrage.

quantique dans cette optique permettrait d'éviter qu'il ne soit accaparé par de grands acteurs privés ou qu'il serve uniquement des intérêts économiques. En adoptant une telle approche, les États, les entreprises et les institutions internationales pourraient collaborer pour orienter le développement de ces technologies vers des usages moralement acceptables, collectivement définis et durables. Une telle démarche, certes empreinte d'un optimisme certain voire d'un idéalisme qui n'est au demeurant pas inconciliable avec une analyse juridique du droit positif de ces technologies, offrirait l'opportunité de créer un Internet quantique au service de l'Humanité, tout en préservant les biens communs pour les générations futures.

Les propos qui précèdent impliquent des choix politiques forts. Ce sont eux qui détermineront le droit qui sera applicable, le moment venu, à l'Internet quantique. Celui-ci devrait se décliner logiquement autour de deux axes majeurs. D'une part, un droit de la gouvernance des infrastructures de l'Internet quantique émergera, qu'il s'agisse, selon les technologies retenues, d'utiliser des infrastructures existantes ou nouvelles (câbles sous-marins, satellites quantiques) ou de définir un cadre international d'interopérabilité des systèmes quantiques. D'autre part, un droit des utilisations de l'objet « Internet quantique » devrait émerger, qu'il s'agisse des enjeux militaires ou civils afférents. Ceux-ci seront, comme on l'a dit, déterminés par les choix effectués au préalable, lesquels permettront, ou non, un accès du plus grand nombre à ces technologies – ou non.

Table des matières

MAUREL Raphaël	Avant-propos.....	7
----------------	-------------------	---

PREMIÈRE PARTIE

LES CONCEPTS

MÉNISSIER Thierry	Peut-on penser une éthique de l'Internet ?	13
NORODOM Anne-Thida	Neutralité, technologies et gouvernance : l'éthique n'est pas du droit	25
ARCHIMBAUD Martin	La structure technique d'Internet	45
GÉRY Aude et PETINIAUD Louis	L'emprise de l'État sur l'architecture d'Internet	57
MAUREL Raphaël	Quelques enjeux éthiques d'un éventuel « Internet quantique »	85

DEUXIÈME PARTIE

LES INSTITUTIONS

CHAPUIS Radmila	Éthique et transparence dans le contentieux des noms de domaine	103
DUPREZ Richard	Le rôle de L'ETSI	121

Table des matières

IBALA Dan	L'action de l' <i>European Dialogue on Internet Governance</i> (EuroDIG) 135
FORGUES Alicia	L'action du <i>Center for Democracy & Technology</i> 149

TROISIÈME PARTIE

LES ACTIVITÉS

GUILBERT Jules	Réguler Internet : discours ou réalité ? 163
JAMAL Sarah	L'émergence d'un corpus de droits de l'Internet 181
DARMOIS Basile	Lutter contre la désinformation en ligne par voie d'une politique relative à la qualité de l'information 201
GALLOIS Julie	La répression de la discrimination algorithmique existe-t-elle ? <i>Le regard du pénaliste</i> 217
BORDAIS Pierre	<i>Le darkweb</i> : entre opacité numérique et éclairage normatif 237
Les Auteurs	 257
Table des matières	 259