

LES STRATÉGIES QUANTIQUES DES ÉTATS DU MONDE

Raphaël MAUREL

*Maître de conférences HDR en droit public
à l'Université Bourgogne Europe
Membre de l'Institut universitaire de France*

Alors que le débat public lié aux enjeux de l'innovation est largement phagocyté par l'intelligence artificielle (IA), une révolution technologique – l'émergence de l'IA générative dans l'agenda politique, depuis le milieu des années 2010 mais essentiellement depuis la mise sur le marché de ChatGPT en novembre 2022, constituant davantage une révolution commerciale qu'autre chose – est en cours : les technologies quantiques pourraient bien, dans les années futures, modifier structurellement notre rapport à l'informatique, aux communications, et aux activités numériques de manière générale(1).

Une première révolution quantique a débuté au début du ^{xx}^e siècle sur la base des travaux de Max Planck qui furent poursuivis par Albert Einstein, Louis de Broglie et d'autres brillants physiciens. Elle repose sur une découverte fondamentale : la dualité onde-particule, concept désignant le fait que la lumière peut se comporter à la fois comme une onde et comme une série de particules, comme le résume Alain Aspect :

« [S]elon Einstein, le rayonnement est formé de grains élémentaires d'énergie, des sortes de particules appelées photons. On ne peut cependant pas oublier les acquis précédents, en particulier ceux du ^{xix}^e siècle. Des physiciens géniaux, Thomas Young en Angleterre et Augustin Fresnel en France, ont démontré de façon irréfutable que les nombreuses propriétés de la lumière ne s'expliquent que si la lumière est une onde. Il existe notamment des phénomènes d'interférences et de diffraction, qui ne peuvent être interprétés qu'ainsi. Et voilà qu'Einstein prétend qu'elle est faite de particules.

(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 de la relecture de M. DAN IBALA, doctorant en droit public à l'Université Bourgogne Europe.

Comment concilier les deux ? C'est cela, la fameuse dualité onde-particule, proposée par Einstein pour la lumière dès 1909, et énoncée par Louis de Broglie pour les particules matérielles dans les années 1920 »(2).

Cette découverte a conduit à des inventions majeures, notamment les transistors qui ont permis l'émergence de l'électronique moderne et la miniaturisation des appareils numériques, les lasers utilisés pour développer les lecteurs de disques, la fibre optique ou encore les circuits intégrés indispensables au développement des ordinateurs et des dispositifs électroniques. Dans le même temps, le principe de superposition, qui établit qu'une particule peut se trouver dans plusieurs états simultanément, intègre les fondements de la mécanique quantique.

Une seconde révolution quantique a toutefois débuté, à tout le moins d'un point de vue théorique, presque au même moment. Albert Einstein, désireux de démontrer l'insuffisance des cadres conceptuels probabilistes post-1925 – pour lui, « une théorie physique fondamentale doit prédire un résultat précis pour chaque situation »(3), de sorte que l'impossibilité de le déterminer révèle « les limites de la théorie [et] qu'il doit exister une théorie plus profonde décrivant le détail des phénomènes »(4) – s'ingénie à imaginer des expériences alors impossibles à réaliser et dont les résultats, en l'état de la science, donneraient des résultats aberrants. Il s'agit ainsi de montrer l'incohérence et l'incomplétude de la mécanique quantique classique, fondée sur la première révolution quantique. Contrarié par les démonstrations de ses collègues, tels que Niels Bohr, Einstein persévère et découvre en 1935 une propriété surprenante de la physique quantique :

« En 1935, Einstein écrit avec ses collaborateurs Boris Podolsky et Nathan Rosen un article resté célèbre où il explique que le formalisme de la mécanique quantique permet d'imaginer une paire de particules dans un état étrange, un état intriqué (le terme "intrication" étant inventé par Schrödinger, qui réfléchit au même problème au même moment). Ce qui est étrange, ce sont les corrélations anormalement fortes entre ces deux particules, même très éloignées l'une de l'autre. Il existe des grandeurs physiques, par exemple la polarisation d'un photon, dont la mesure suivant une direction a deux résultats possibles, chacun de ces résultats pouvant se produire avec la même probabilité. Le résultat semble donc aléatoire pour chacune des deux particules intriquées. Mais si l'on compare les résultats pour les deux particules d'une même paire, on constate qu'ils sont identiques dans le cas où les directions de mesure de polarisation sont les mêmes. On dit qu'ils sont totalement corrélés. C'est comme si deux joueurs de pile ou face obtenaient des résultats identiques pour des tirages au même instant, chacun

(2) A. ASPECT, *Einstein et les révolutions quantiques*, Paris, CNRS Éditions/De vive voix, coll. Les grandes voix de la recherche, 2019, p. 11.

(3) *Ibid.*, p. 14.

(4) *Ibid.*

d'entre eux ayant pourtant l'impression que son résultat est aléatoire. Face à cette prédiction, Einstein conclut qu'il avait raison quand il disait qu'il fallait compléter le formalisme quantique [...]. Einstein estime donc que, pour comprendre cette corrélation très forte, on est obligé d'admettre que les particules possèdent des propriétés supplémentaires qui ne sont pas prises en compte par le formalisme quantique, mais qui déterminent le fait que l'on obtient l'un ou l'autre des deux résultats également probables. Cela obligerait donc à compléter le formalisme quantique, qui ne serait pas une description ultime des choses »(5).

Bohr maintient que cela est impossible et que le formalisme quantique est suffisant, mais ne peut le démontrer. Dans les années 1960, le physicien John Bell établira un nouveau palier dans la réflexion. Il démontre que si Einstein a raison et qu'il existe une propriété commune inconnue entre les particules en question, alors on peut établir une limite mathématique au-delà de laquelle ces corrélations prédites ne fonctionnent pas. Or, selon Bell, le formalisme quantique classique peut permettre des corrélations plus fortes que cette limite, appelée « inégalités de Bell ». Seule l'expérience a pu établir, dans les années 1980 sous la direction d'Alain Aspect, qui d'Einstein ou de Bohr avait raison. Comme il l'écrit, « [n]ous avons observé la violation des inégalités de Bell, ce qui signifie que nous avons d'une part observé la corrélation, et d'autre part qu'elle ne peut s'expliquer par le fait que les particules porteraient en elles des propriétés qui la déterminent. [...] Il semble y avoir un échange instantané entre deux particules qui, au moment de la mesure, sont séparées de douze mètres »(6). Ainsi, « quelle que soit la distance entre les particules, elles se comportent comme un tout indivisible, inséparable, tellement inséparable que le lien entre elles semble défier la relativité »(7). Autrement dit, Einstein avait raison dans ses calculs, mais tort quant à sa conclusion : la mécanique quantique permet ce phénomène qu'il est le premier à avoir identifié mais qui était à son époque indémontrable en pratique, et sans que les particules partagent une propriété commune inconnue.

Ce n'est qu'une fois cette démonstration effectuée que s'est ouverte la seconde (ou peut-être deuxième) révolution quantique, dont l'objectif est de développer des usages concrets de cette découverte physique. Les technologies quantiques, qu'elles se fondent sur deux des caractéristiques de la mécanique quantique que sont la superposition et l'intrication, font depuis les années 2010 l'objet d'une course

(5) *Ibid.*, pp. 29-31.

(6) *Ibid.*, p. 40.

(7) *Ibid.*, p. 41.

technologique internationale effrénée⁽⁸⁾. Leur maîtrise devrait permettre aux États qui y parviendront en premier de démultiplier de manière incommensurable leurs capacités de calcul informatique, de renseignement et de communication. Informatique quantique, détection quantique et communications quantiques sont en effet les trois grandes directions que prennent les recherches et financements actuels, par l'intermédiaire de sous-domaines comme la cryptographie quantique (utilisation de la mécanique quantique pour chiffrer des communications) ou la cryptographie post-quantique (tentative d'anticipation des attaques conduites par l'intermédiaire d'ordinateurs quantiques en utilisant des moyens de calcul et de protection traditionnels, non quantiques).

Pour développer leurs capacités technologiques, les États du monde développent des « stratégies quantiques » qu'ils formalisent parfois par des documents. À cet égard, est adoptée, pour les besoins de cette contribution, une définition institutionnelle, et non matérielle, de la notion de « stratégie ». Il s'agira donc de se référer aux documents officiels intitulés « plans », « stratégies » ou encore « agendas » et portant sur le développement et l'usage des technologies quantiques, dans l'objectif de porter un regard sur les politiques annoncées et mises en œuvre par les États du monde en matière de technologies quantiques.

Cette recherche se fonde sur un corpus constitué d'une quarantaine de stratégies quantiques nationales. Un corpus de stratégies a d'abord été analysé sur la base des ressources mises en ligne par le CevoteQ⁽⁹⁾ concernant un certain nombre de pays : Afrique du Sud, Allemagne, Australie, Brésil, Canada, Chine, Danemark, Japon, Sénégal. À ces éléments a été adjointe l'étude de divers documents officiels relatifs à l'Autriche, au Danemark, aux États-Unis, à la France, aux Pays-Bas, à la Finlande et au Royaume-Uni. Enfin, ces recherches ont été complétées par l'état des lieux *Quantum Technologies. Public Policies in Europe* réalisé en 2023 par le programme QuantERA financé par

(8) Voy. à ce sujet les exemples et éléments in R. MAUREL et E. PETIT-PREVOST-WEYGAND, *Numérique. L'enjeu juridique du siècle*, « La révolution quantique is coming », Paris, Éditions de l'Atelier, 2024, pp. 177-187.

(9) Centre d'étude des évolutions des technologies quantiques, créé dans le cadre de la Chaire « Encadrement éthique et juridique des technologies quantiques » précitée, disponible en ligne à l'adresse : <www.cevoteq.com/ressources-et-donnees/strategies-quantiques-nationales.html>, [14 avril 2025]. L'établissement de la page « ressources » bénéficie du précieux concours de Fabrice Amougou et Morgane Violot, doctorant et doctorante en droit international à l'Université Bourgogne Europe.

Horizon Europe, qui présente un corpus de 31 plans étatiques – essentiellement au sein de l'Union européenne mais incluant d'autres États comme Israël, la Suisse ou la Turquie⁽¹⁰⁾.

En examinant ces documents, il est possible de dégager les éléments communs et les spécificités des approches étatiques, tout en identifiant les priorités et les orientations stratégiques qui guident le développement et l'usage des technologies quantiques. Cette analyse vise ainsi à éclairer les dynamiques sous-jacentes aux politiques publiques dans le domaine émergent et hautement concurrentiel des technologies quantiques, où la course à l'innovation est intense et, plus que tout, où les enjeux géopolitiques sont considérables. Cet éclairage ne se borne toutefois pas à une description de l'existant et se veut critique, en particulier du point de vue juridique. Il s'agit alors de s'interroger sur ce que contiennent ces stratégies (I), avant d'identifier des zones grises, voire des zones d'ombre, de la réflexion contemporaine en la matière (II).

I. – Les éléments de similitude des stratégies quantiques nationales

Sans se livrer à une analyse **précise**[Exhaustive ?] de l'ensemble des éléments présentés par les stratégies des différents États, des objectifs généraux ressortent avec évidence. Sur le fond, chaque État cherche à affirmer un *leadership* mondial dans l'un ou l'autre des secteurs technologiques quantiques – et parfois de manière générale (A). Quant à la méthode, l'objectif de création « d'écosystèmes quantiques » est également commun, et soulève des questions juridiques pertinentes (B).

A. – LA RECHERCHE D'UN *LEADERSHIP* MONDIAL GÉNÉRAL OU SECTORIEL

Pour résumer, chaque État développant une stratégie quantique désire devenir ou se positionner en tant que « *leader* » dans les trois domaines suivants : le calcul, ou informatique quantique, la détection quantique et la communication quantique. La raison principale réside dans l'avantage stratégique majeur qui sera conféré à l'État *leader*, en termes d'abord militaires puis dans un deuxième temps commerciaux. Tous les acteurs cherchent ainsi un *leadership* mondial général sur

(10) W. CASTEILEIN, S. KOSTKA et J. MITAN-PILAT, *Quantum Technologies. Public Policies in Europe*, QuantERA Report, 2023, disponible en ligne à l'adresse : <<https://quantera.eu/quantum-technologies-public-policies-report-2023/>>, [14 avril 2025].

ces technologies. La stratégie australienne affiche ainsi une « *vision* » des plus claires : « *[I]n 2030, Australia is recognised as a leader of the global quantum industry, and quantum technologies are integral to a prosperous, fair and inclusive Australia* »(11). La France est, à cet égard, particulièrement bien placée. Comme le relève l'Institut Montaigne, « la France et l'Europe, depuis près de 5 ans, développent des ordinateurs et des capteurs quantiques mondialement reconnus. Ils ont conquis un avantage concurrentiel et une position de *leader* technique sur ce marché, au même titre que les États-Unis et la Chine. En outre, la France a fait émerger trois prix Nobel en mécanique quantique en 25 ans : Claude Cohen-Tannoudji en 1997, Serge Haroche en 2012 et Alain Aspect en 2022 »(12).

Toutefois, certains États sont plus avancés que d'autres dans certains secteurs, en fonction des orientations stratégiques choisies. L'État qui maîtrisera par exemple les communications quantiques en premier pourra communiquer de manière parfaitement sécurisée, sans crainte de l'interception de ses messages diplomatiques, et pourra développer une infrastructure civile – donc un modèle économique des communications quantiques – novatrice et d'une célérité possiblement inégalable. La Chine est à ce jour en tête en matière de communications quantiques, ayant pris une « avance considérable dans ce domaine »(13), comme en témoigne le lancement d'un satellite de démonstration en 2016(14). Elle dispose également d'un réseau terrestre étendu, sécurisé par voie quantique, et continue d'investir dans ces technologies. Sur les réseaux d'information quantique (RIQ), la Chine aurait même « une décennie d'avance sur l'Europe »(15), tandis que les États-Unis investissent massivement, depuis 2024, sur le sujet.

En ce qui concerne le calcul quantique, qui ouvre la voie vers l'ordinateur quantique et notamment vers des capacités d'attaque et de défense informatiques inédites, la France se situe parmi les *leaders* mondiaux, même si les progrès des États-Unis sont majeurs. Les

(11) Australian Government, *National Quantum Strategy. Building a thriving future with Australia's quantum advantage*, 2023, p. 6.

(12) Institut Montaigne, *Quantique : vers une logique de marché*, note d'action, octobre 2024, pp. 23-24.

(13) GIFAS, *Rapport sur les technologies quantiques pour les applications Aéronautique-Spatial-Défense*, Groupe de Travail Technologies Quantiques, 2024, GIFAS/R&D/5004/2024, p. 31.

(14) R. MAUREL, « Technologies quantiques et transformations du droit. Premières pistes de réflexion », *Revue générale du droit*, 2024, n° 65119, disponible en ligne à l'adresse : <www.revuegeneraledudroit.eu/?p=65119>, [14 avril 2025].

(15) GIFAS, *Rapport sur les technologies quantiques pour les applications Aéronautique-Spatial-Défense*, op. cit., p. 35.

recommandations convergent ainsi pour « [f]avoriser le développement de l’algorithmie quantique orientée vers les besoins industriels et l’étude de nouveaux algorithmes en ruptures pour reprendre le leadership sur les USA »(16). En revanche, la France « enregistre un réel retard sur la commercialisation de logiciels quantiques »(17). Alors que le Canada peut se prévaloir de 20 % du nombre total de *start-ups* commercialisant des logiciels quantiques en août 2024, au même niveau que les États-Unis, la France se situe comme les Pays-Bas autour de 6 % de ce barème mondial, derrière les deux leaders du marché (20 % chacun), l’Allemagne (11 %), le Royaume-Uni (7 %) et le Japon (7 %)(18).

L’État qui maîtrisera, enfin, la détection quantique en premier aura une avance militaire considérable par exemple du fait de ses applications en navigation et en aéronautique. Le Canada est en avance sur ce sujet, le Gouvernement cherchant d’ailleurs à « faire du Canada un chef de file mondial dans le développement et l’utilisation de capteurs quantiques »(19) – mais également en informatique quantique : « le déploiement de capteurs quantiques devrait contribuer à résoudre de nombreux problèmes urgents pour le Canada en permettant des avancées majeures dans les domaines de la défense et de la sécurité, de l’exploration et de l’extraction minières stratégiques, de la surveillance des infrastructures et de l’environnement, de la sécurité de la navigation et des transports ainsi que des soins de santé »(20).

Si les velléités de *leadership* semblent partagées par la plupart des acteurs étatiques, elles se heurtent ainsi à des réalités économiques – il est complexe de se positionner en tant que chef de file mondial de chaque technologie quantique – et stratégiques. Certains développements nécessitent en effet des ressources publiques considérables, à l’instar des infrastructures de communication quantiques dont les acteurs privés ne sont pas susceptibles, en l’état de la recherche, de se saisir, tandis que d’autres peuvent être aisément commercialisés et faire l’objet d’un marché mondial, comme l’ordinateur quantique.

(16) *Ibid.*, p. 49.

(17) Institut Montaigne, *Quantique : vers une logique de marché*, op. cit., p. 49.

(18) *Ibid.*, p. 50.

(19) Gouvernement du Canada, *Stratégie quantique nationale du Canada*, 2022, p. 17.

(20) *Idem.*

B. – LA VOLONTÉ D'ÉTABLIR DES « ÉCOSYSTÈMES » QUANTIQUES

Une autre constante, qui règne surtout en Europe est qu'il convient de créer et de renforcer des « écosystèmes » favorables au développement et à l'usage futur des différentes technologies quantiques. Au-delà de la course et de la recherche du *leadership*, les États cherchent à adapter leurs industries et secteurs de la recherche pour permettre un « saut quantique » national. Deux leviers principaux ressortent des stratégies des États : le développement industriel d'une part, qui renvoie notamment à la délicate question des chaînes d'approvisionnement, et le développement de compétences d'autre part. Par exemple, l'Irlande et le Canada insistent particulièrement, dans leurs stratégies nationales, sur l'importance d'attirer des talents et de soutenir la recherche pour maintenir ou établir leur *leadership*. La stratégie irlandaise indique que « *[t]o derive maximum benefit from the second quantum revolution, and to realise its vision of being an innovation leader, it is critical that Ireland cultivates a rich and diverse quantum technologies ecosystem* »(21). La stratégie canadienne, qui inclut dix-neuf occurrences du terme « écosystème », note à cet égard qu'un certain nombre d'investissements ont déjà « permis de créer un écosystème en pleine croissance qui comprend des centres d'expertise quantique de calibre mondial dans les universités du pays et des entreprises pionnières au premier plan de l'industrie »(22) ; il est plus généralement question de renforcer ou de « créer un écosystème de talents inclusif »(23) au Canada. La France dispose pour sa part « d'un écosystème quantique exceptionnel avec des laboratoires académiques de pointe, des *start-ups* couvrant quasiment l'ensemble des technologies quantiques et un réseau d'industriels prêts à développer et à mettre en œuvre ces technologies, le tout avec un soutien étatique fort »(24).

La notion d'« écosystème » employée par les différentes stratégies quantiques consultées est présentée comme holistique : elle vise à traiter de l'ensemble des sujets relatifs au développement des technologies quantiques. Pour autant, l'approche écosystémique reste essentiellement une approche de politique économique nationale. Il s'agit de soutenir la recherche publique et privée, en s'appuyant sur les ressources

(21) Government of Ireland, *Quantum 2030. A National Quantum Technologies Strategy for Ireland. Putting Ireland in a Quantum Super Position*, 2023, p. 9.

(22) *Ibid.*, p. 5.

(23) *Ibid.*, p. 24.

(24) GIFAS, *Rapport sur les technologies quantiques pour les applications Aéronautique-Spatial-Défense*, op. cit., p. 6.

nationales et l'attractivité éventuelle du territoire pour des chercheurs, entrepreneurs et investisseurs, en vue d'une évolution nationale vers une ère quantique. Ces stratégies peuvent s'avérer coûteuses, dans la mesure où certaines technologies nécessitent des investissements publics majeurs qu'il s'agit d'anticiper ; aussi est-il essentiel de pouvoir s'appuyer sur un secteur privé innovant qui aura été soutenu par l'État. Ainsi, le gouvernement étatsunien « a bien compris qu'autant les ordinateurs quantiques seraient des objets qui se vendraient à l'unité et donc pouvaient être confiés à des acteurs privés qui ont une ambition à long terme, autant les réseaux de communication quantiques sont une infrastructure d'équipement du pays et ne trouveraient pas le même type d'acteurs financiers pour les porter » (25).

Cette approche « écosystémique » évite, enfin, un certain nombre de sujets qui sont passés sous silence, alors même que l'idée d'un « écosystème », désignant littéralement des relations complexes entre des individus et leur environnement, implique à première vue d'intégrer l'ensemble des données en jeu. La seconde partie de cet article montrera ainsi que le droit, en tant qu'instrument d'encadrement des relations sociales, est soit absent de ces « écosystèmes », soit conçu comme un seul instrument de facilitation du développement des technologies. Il ressort ainsi de la lecture de ces stratégies que leurs rédacteurs conçoivent le droit comme un élément externe qu'il n'est pas nécessaire, ni peut-être souhaitable, d'invoquer, de peur qu'il se mue en obstacle au développement des technologies quantiques.

II. – À propos des zones d'ombre des stratégies quantiques nationales

Il est essentiel, à ce stade, d'admettre que les technologies dont les stratégies cherchent à assurer le développement rapide vont bouleverser l'ordre des choses. Alors qu'à l'échelle de la physique, l'IA n'est pas une révolution, ces technologies le seront. Elles constituent, à cet égard, des technologies de rupture que l'on peut qualifier avec Julie Charpenet et Marina Teller, d'« innovations totales » :

« Au regard des révolutions antérieures de type industriel, les innovations de rupture contemporaines ne se limitent pas à l'industrie, mais affectent l'ensemble des activités humaines, bien au-delà de l'économie. Par ailleurs, elles réunissent trois caractéristiques particulières : la rapidité (évolution exponentielle et non pas linéaire), l'amplitude (de multiples techniques sont en œuvre), enfin, l'influence systémique (sur les entreprises,

(25) *Ibid.*, p. 31.

des sociétés et les pays). En cela, elles nous rappellent en tout point le concept de “fait social total” théorisé il y a un siècle par Marcel Mauss et c’est pourquoi nous les qualifions à dessein “d’innovations totales” »(26).

Les autrices appellent d’ailleurs, face à l’absence de cadre théorique général en droit des innovations, à « un effort de réflexion, car il [leur] semble indispensable de proposer un cadre de régulation horizontal, permettant de poser les jalons d’une régulation adaptée à ces innovations d’un genre particulier »(27). Sans chercher, dans le cadre de cette contribution, à proposer des éléments en ce sens, il est possible de relever à la lecture des stratégies quantiques nationales que l’enca-drement des technologies quantiques est le grand absent de la réflexion mondiale. Les documents et communications des États font en effet très peu de cas de la question des règles et principes applicables aux technologies quantiques, qu’il s’agisse de cadres juridiques (A) ou dans une moindre mesure de cadres éthiques (B).

A. – L’ABSENCE DE PRÉFIGURATION DE CADRES JURIDIQUES PRÉCIS

Il faut d’abord constater, à la lecture des stratégies quantiques étudiées, une double absence de référence au cadre juridique international comme national. Les rares mentions des cadres juridiques s’insèrent dans une logique de compétition diplomatique internationale. Ainsi le Royaume-Uni se distingue-t-il en exprimant une volonté de jouer un rôle de *leader* dans la régulation internationale des technologies quantiques, sur le plan du droit comme de l’éthique :

« As the quantum sector evolves both nationally and internationally, we must anticipate and prepare for future regulatory challenges. We will ensure that regulatory frameworks drive responsible innovation and the delivery of benefits for the UK, as well as protecting and growing the economy and the UK’s quantum capabilities. [...] There is an important opportunity for the UK to be at the forefront of quantum regulation and lead the way in trialling quantum technologies. We also have a key role to play in leading the international ethical and regulatory debate to ensure that regulation supports growth, the ethical use of quantum technologies and the UK’s wider interests »(28).

La même logique peut être identifiée dans la stratégie Australienne, qui formalise également, et de manière remarquable, des éléments liés au cadre juridique des technologies quantiques. L’action 5.1 du

(26) J. CHARPENET et M. TELLER, « La régulation des technologies quantiques : un cas d’école pour la régulation des innovations “totales” », *Dalloz IP/IT*, 2024, p. 459, citant M. MAUSS, « Essai sur le don. Forme et raison de l’échange dans les sociétés archaïques », *L’année sociologique*, 1923-1924, in *Sociologie et anthropologie*, Paris, PUF, 1950.

(27) *Ibid.*

(28) UK Government, *National Quantum Strategy*, *op. cit.*

plan australien prévoit ainsi de « *Work with industry, academia and states and territories to develop principles to support the responsible and inclusive development and use of quantum technologies* »(29), tandis que la suivante (6.1) est d'« *Ensure that Australia is actively represented in international quantum standards-setting bodies. Continue to work with industry to boost participation in international quantum standards development* »(30). Si l'objectif premier est d'« *ensuring the growth of Australia's quantum ecosystem aligns with and protects Australian values, human rights and national wellbeing* »(31), les droits en question ne sont pas exposés. La logique compétitive est intrinsèque à la démarche, puisqu'il s'agit également de « *championing responsible innovation by designing frameworks for the responsible development and use of quantum technologies* » et de « *positioning Australia as a destination for talent and capital investment* »(32). Dans la plupart des autres stratégies nationales consultées, la mention d'un cadre juridique est absente, réduite à une mention strictement utilitariste (Canada(33), Danemark(34)) ou à une formule accessoire parfois énigmatique (Allemagne(35), Irlande(36)).

(29) Australian Government, *National Quantum Strategy. Building a thriving future with Australia's quantum advantage*, op. cit., p. 41.

(30) *Ibid.*

(31) *Ibid.*

(32) *Ibid.*

(33) P. ex. : « 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 » (Gouvernement du Canada, *Stratégie quantique nationale du Canada*, op. cit., p. 12).

(34) Government of Denmark, *Danish Strategy for Quantum Technology*, part. 2. Commercialisation, Security and International Cooperation, September 2023, p. 18 : « *It will be important to strike the right balance between regulation, protection, and innovation. Denmark would like to help set the rules of the game, so that regulation can support innovation and commercialisation and, at the same time, protect citizens, companies, and public authorities* ». Une section du plan danois est bien consacrée à la régulation et la protection des technologies quantiques ; elle indique que « *An important framework condition for the development of quantum technology in Denmark is effective regulation and protection of those parts of quantum technology where the risk of misuse is greatest if the technologies end up in the wrong place* ». Toutefois, rien de concret n'est indiqué.

(35) L. LACROIX, *Technologies quantiques. Stratégie et recherche en Allemagne*, Rapport du Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France en Allemagne, 2021 (mis à jour en 2024 par Samuel Pujade-Renaud) ; le rapport qui traduit et résume le plan allemand précise qu'il évoque l'intérêt d'échanger avec les partenaires européens en vue du « développement de normes communes pour une utilisation responsable et une infrastructure de qualité » p. 11.

(36) À l'exception de la troisième et peu claire « *Key action* » : « *Develop mechanisms to facilitate the flow of people, knowledge, skills and innovation between academia, enterprise and Government, nationally and internationally. This will build Ireland's reputation internationally as well as researchers' networks and increase Ireland's competitiveness in international funding schemes. It will also provide opportunities for Ireland to learn from international best practice,*

Peuvent également être identifiées quelques références à la standardisation internationale, conçue est un objectif stratégique parmi d'autres. Tel est par exemple le cas de la page gouvernementale britannique consacrée à la stratégie quantique nationale, qui indique à titre de « 2033 target » : « [T]he UK will be a global leader in establishing global standards for quantum »(37).

Ainsi, les stratégies nationales étudiées n'insèrent à aucun moment le développement des technologies quantiques dans le cadre conceptuel du droit international, et particulièrement du droit du maintien de la paix et de la sécurité internationales. Les seules mentions sérieuses du droit – c'est-à-dire au-delà des poncifs et citations évanescents de « droits de l'homme » indéfinis dont le respect serait important – consistent à le présenter comme un outil au service de l'innovation et de la protection de l'innovation nationale. Ces éléments timides contrastent avec les possibilités ouvertes par ces technologies. Le monde est en effet à la veille d'une série d'innovations qui devraient permettre à un État de décrypter l'ensemble des communications chiffrées qu'il a pu stocker depuis des années sur des serveurs en attendant de pouvoir les lire, permettre des cyberattaques d'une ampleur inédite, d'ouvrir la voie à de nouvelles armes encore inconnues ou encore permettre des capacités de surveillance encore inconcevables jusqu'à aujourd'hui. Le développement de la défense quantique, placé parmi les priorités militaires des puissances nucléaires(38), montre que ces dernières ont intégré, ou sont en passe d'intégrer, l'ampleur des enjeux. Ceux-ci pourraient conduire les grandes puissances militaires à souhaiter positionner le développement et l'usage de ces technologies dans le champ conceptuel et juridique du maintien de la paix et de la sécurité internationales, ne serait-ce que pour réaffirmer, dans un premier temps, l'importance que ces innovations ne soient pas utilisées à des fins contraires à la Charte des Nations Unies. Pour l'instant, tel n'est pas encore le cas, au profit d'une course militaire et économique mondiale.

for example in ethics and regulation, without focusing significant resources nationally in these areas » (Government of Ireland, *Quantum 2030. A National Quantum Technologies Strategy for Ireland*, *op. cit.*, p. 20).

(37) UK Government, *National Quantum Strategy*, Policy paper updated 14 December 2023, disponible en ligne à l'adresse : <<https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-accessible-webpage>>, [16 avril 2025].

(38) Ce sujet, et notamment l'évolution du droit français par la loi n° 2023-703 du 1^{er} août 2023 relative à la programmation militaire pour les années 2024 à 2030 et portant diverses dispositions intéressant la défense, a été analysé dans un autre contexte : R. MAUREL, « Technologies quantiques et transformations du droit. Premières pistes de réflexion », *op. cit.*

Quelques besoins émergent toutefois, à la lecture des stratégies étudiées. Ainsi, le GIFAS indique le « [b]esoin d'une conférence internationale (type IEEE Quantum Week) orientée ingénierie via la SEE pour afficher la position de la France dans le domaine et disposer d'une place d'échanges techniques entre académiques et industriels »(39), relevant même que « [l]es événements type Q2B sont parfois jugés trop "commerciaux" en raison du manque de présentations académiques »(40). Là encore, le Royaume-Uni se distingue, en indiquant souhaiter :

« [p]lay an active role in the World Trade Organisation, the World Economic Forum, the G7, the G20, OECD, NATO, the Council of Europe, the Commonwealth and the UN, including utilising the UK seat on the International Telecommunications Union (ITU) to ensure that quantum regulation supports UK business and innovation, that the UK's wider prosperity, security and defence interests are represented and that we continue to uphold the UK's values including those on human rights »(41).

Si la citation d'enceintes internationales – l'Organisation des Nations Unies figurant, toutefois, en dernière position – peut démontrer un attachement aux cadres multilatéraux, il faut relever qu'il s'agit essentiellement, car premièrement, d'œuvrer en faveur du « business » britannique. En outre, il est notable, à l'instar du cas du Danemark(42), que la mention des droits de la personne humaine ne soit pas suivie d'éléments concrets. La mention du Conseil de l'Europe parmi les institutions internationales citées dénote toutefois une conscience de l'impact potentiel du développement et de l'usage des technologies quantiques sur les droits et libertés fondamentales. Celle de l'OTAN démontre que le Royaume-Uni n'ignore pas, en tant que puissance nucléaire, le grand intérêt qu'il y a à aborder mondialement le sujet des cyberattaques quantiques. Néanmoins, l'émergence de doctrines nationales et de propositions de discussions concrètes se fait, pour l'instant, attendre.

B. – L'ABSENCE RELATIVE DE PRÉFIGURATION D'UN CADRE ÉTHIQUE

Le Canada, l'Australie et le Royaume-Uni, en particulier(43) montrent une attention spécifique à la création d'un cadre éthique pour les technologies quantiques, tandis que les autres plans n'intègrent pas

(39) GIFAS, *Rapport sur les technologies quantiques pour les applications Aéronautique-Spatial-Défense*, op. cit., p. 47.

(40) *Ibid.*

(41) UK Government, *National Quantum Strategy*, op. cit.

(42) *Voy. supra.*

(43) *Voy. les références précédentes[à préciser svp ? ou remplacer par Ibid. ?].*

explicitement cette dimension. Les stratégies de ces trois États, ainsi que d'autres, évoquent également les futures implications sociales de ces technologies pour justifier les investissements réalisés, que ce soit de manière générale (Australie(44), Royaume-Uni(45)) ou s'agissant de certaines d'entre elles en particulier. La stratégie irlandaise précise ainsi qu'en matière de communications quantiques, « *[o]ne of the ultimate aims in this area is to develop an ultra-fast global quantum internet, based on entangled qubits and separated by large distances, to future-proof critical communications infrastructure, data assets and encryption systems that have the potential to become more vulnerable to future cyberattacks* »(46). S'agissant des capteurs quantiques, la même stratégie expose que « *[p]otential applications in this area include ultrasensitive sensing for improved medical diagnostics, greenhouse-gas monitoring, precise measurement of pollution in urban areas, and highly precise global positioning systems* »(47). On peut ici comme ailleurs(48) identifier les éléments d'un raisonnement éthique, au-delà des enjeux économiques, qui conduisent à se questionner sur la pertinence du développement d'une innovation et à arbitrer en sa faveur en mettant en avant certains buts d'intérêt général : la lutte contre la pollution, les cyberattaques, la sécurité des communications, ou encore l'amélioration de la santé publique.

La nécessité d'une approche des technologies quantiques conforme à certaines « valeurs », en marge de la fonction utilitariste du droit et rejoignant ainsi une démarche d'éthique axiologique(49), transparaît dans certaines stratégies. Ainsi en est-il de la stratégie danoise : « *[h]ere, it is important that we, from the Danish side, are part of a community that is aligned with our values. In addition to the security consequences, it will be harmful to Danish growth and exports if, for example, Danish quantum technology is linked to military use*

(44) Australian Government, *National Quantum Strategy. Building a thriving future with Australia's quantum advantage*, op. cit., p. 6 : « *With the right policy, regulatory and economic framework, this transformation will : modernise our economy, improve our society, support national interests, create high-paying jobs for future generations* ».

(45) Voy. la section « *Quantum Technologies for Societal Good* » de la stratégie précitée.

(46) Government of Ireland, *Quantum 2030. A National Quantum Technologies Strategy for Ireland. Putting Ireland in a Quantum Super Position*, op. cit., p. 6.

(47) *Ibid.*, p. 7.

(48) Par exemple dans la stratégie canadienne précitée, p. 21 : « Il est également nécessaire de développer des compétences complémentaires en sciences sociales et humaines pour que les avantages découlant de l'utilisation des technologies quantiques puissent profiter à tous les Canadiens de manière juste et équitable ».

(49) Voy. sur les différentes éthiques mobilisables en matière d'innovation Th. MÉNISSIER, « *Quelle éthique pour l'IA ?* », Naissance et développements de l'intelligence artificielle à Grenoble, Colloques de l'Académie Delphinale, octobre 2019.

in non-like-minded countries »(50). De manière plus claire encore, la stratégie australienne consacre un thème complet à l'enjeu d'un « *trusted, ethical and inclusive quantum ecosystem* »(51), lequel indique que « *[b]y building principles for responsible development and use, quantum researchers and developers can develop technologies that align to Australian values and expectations and protect human rights* »(52).

Pour l'heure, il est difficile d'aller au-delà du seul constat, par les stratégies quantiques nationales, de la nécessité d'inscrire les investissements massifs liés à leur développement dans une démarche d'intérêt général. Les premiers éléments de la réflexion éthique dont les États ne pourront faire l'économie s'annoncent sous le signe de celle menée, avec difficulté, en matière d'éthique de l'innovation et spécifiquement d'éthique de l'intelligence artificielle (IA). Alors que la rupture technologique matérielle (*hardware*) comme logicielle (*software*) que constitue la deuxième révolution quantique est incomparable avec la « révolution » essentiellement commerciale et logicielle qu'a constitué l'IA générative, il semble en effet que les mêmes sous-basement intellectuels soient, pour l'instant, privilégiés. En témoigne l'idée, pour l'instant exclusive dans les stratégies consultées, de faire émerger des « principes » en lien avec des « valeurs ». Le risque est ici grand de voir fleurir, comme s'agissant de l'IA, des listes de principes peu opérationnels(53), alors même qu'un questionnement éthique de fond s'impose. L'expérience de l'IA montre en effet que l'approche principielle ou « principiste », qui a montré ses limites dans d'autres domaines lorsqu'il est décidé de s'y borner notamment du fait des variabilités d'interprétation et de portée des principes dégagés(54), conduit globalement à la confusion(55). Comme l'écrit Thierry Ménissier, « pour

(50) Government of Denmark, *Danish Strategy for Quantum Technology*, part. 2. Commercialisation, Security and International Cooperation, *op. cit.*, p. 19.

(51) Australian Government, *National Quantum Strategy. Building a thriving future with Australia's quantum advantage*, *op. cit.*, p. 41.

(52) *Ibid.*

(53) Voy. à ce sujet R. MAUREL, « Éléments pour une éthique de l'IA simplifiée », note n° 40 de L'Observatoire de l'éthique publique, février 2025, disponible en ligne à l'adresse : <<https://www.observatoireethiquepublique.com/nos-propositions/notes/elements-pour-une-ethique-de-lia-simplifiee.html>>, [16 avril 2025].

(54) J.-B. THIBERT, « Les limites d'une approche principiste dans l'éthique du don d'éléments et produits du corps humain. À propos d'exemples », *Transfusion Clinique et Biologique*, vol. 27-3, 2020, pp. 191-199.

(55) Dans le même sens, R. MAUREL, « Démystifier l'IA et en dessiner une éthique pour sortir de la confusion ambiante », *The Conversation*, 11 février 2025, disponible en ligne à l'adresse : <<https://theconversation.com/demystifier-lia-et-en-dessiner-une-ethique-pour-sortir-de-la-confusion-ambiante-249299>>.

être fondamentale, une telle approche par les principes gagne à être pondérée par la confrontation à des situations concrètes minutieusement étudiées »(56). Or, en la matière, les situations casuistiques manquent : la plupart des technologies quantiques ne sont pas encore opérationnelles. Toutefois, la préfiguration d'un cadre de réflexion qui ne serait pas que principal paraît importante dès maintenant, ne serait-ce que pour éviter de reproduire la confusion ambiante en matière d'éthique de l'IA.

Des démarches de recherche en sciences sociales appliquées à la révolution en cours pourraient viser le développement comme l'usage des technologies quantiques. Deux sujets particulièrement intéressants, à cet égard, sont la gouvernance des infrastructures quantiques d'une part, c'est-à-dire la manière dont les acteurs internationaux vont ou non s'accorder pour organiser l'accès aux infrastructures quantiques et leur fonctionnement concret ; l'éthique environnementale et sociale d'autre part. L'émergence de la notion de « technologies habilitantes »(57) pour désigner l'ensemble des composants non quantiques mais indispensables au bon fonctionnement de différentes branches des technologies quantiques montre que les États se saisissent de la question des chaînes de valeur des technologies quantiques en devenir, et qu'ils pourraient lui appliquer des logiques relevant de l'éthique des affaires – à l'instar de la vigilance(58). Par ailleurs, un sujet fondamental réside dans la future fracture sociale liée aux technologies quantiques : qui, dans la société mondiale, y aura accès ? À quel coût ? Selon quelles chaînes de dépendance technologique ? Autant de questions qui restent à la lecture des stratégies quantiques des États du monde, sans réponse.

(56) T. MÉNISSIER, « Peut-on penser une éthique de l'Internet ? », in R. MAUREL (dir.), *Transparence, éthique et gouvernance de l'Internet*, Bayonne, IFJD, à paraître en 2025.

(57) P. ex., voy. la page dédiée du site officiel français : <<https://quantique.france2030.gouv.fr/perimetre/technologies-habilitantes/>>, [16 avril 2025].

(58) Loi n° 2017-399 du 27 mars 2017 relative au devoir de vigilance des sociétés mères et des entreprises donneuses d'ordre ; voy. également la directive (UE) 2024/1760 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 sur le devoir de vigilance des entreprises en matière de durabilité et modifiant la directive (UE) 2019/1937 et le règlement (UE) 2023/2859 ainsi que le projet d'instrument international juridiquement contraignant visant à réglementer, en droit international des droits de l'Homme, les activités des sociétés transnationales et autres entreprises. Sur ces questions, voy. de manière générale les travaux en éthique des affaires et R. MAUREL, *Introduction au droit international de l'éthique des affaires*, Paris, Mare & Martin, 2025.

En conclusion, on ne peut que constater qu'il n'existe pas de droit spécifique *ex ante* des technologies quantiques, et que la réflexion éthique reste très limitée. Cela ne doit pas étonner : le droit est souvent fondé sur une réflexion éthique préalable, de sorte qu'il existe à ce jour un certain vide conceptuel – lequel sera inévitablement comblé. L'enjeu est celui du « moment » de la régulation, qui renvoie à des considérations politiques mais également philosophiques : faut-il prendre le temps d'anticiper, au risque de freiner l'innovation ? Quel État souhaitant affirmer son « *leadership* » accepterait ce qui s'apparenterait, dans un contexte de course technologique, à un sabotage national ? Faut-il, au contraire, attendre le dernier moment, voire que des dommages (environnementaux, sociaux, militaires...) surviennent pour réguler – dans ce cas dans l'urgence – et seulement les usages, le développement étant acquis ?

Sans pouvoir apporter de réponse simple – il n'en existe aucune – à ces interrogations, il est possible de promouvoir la démarche de questionnement. L'enjeu de l'encadrement des technologies quantiques peut et gagnerait ainsi à intégrer l'agenda des puissances quantiques et de l'Union européenne : initier la réflexion n'est jamais superflu, ne serait-ce que pour disposer demain des bases théoriques (des fondements éthiques solides) pour réaliser l'impossible aujourd'hui (un encadrement juridique cohérent). C'est, à tout le moins, en suivant cette méthode qu'a débuté la seconde révolution quantique.

