

ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES EN SCIENCES SOCIALES

Master en sciences sociales

Mention Savoirs en Sociétés

Parcours Histoire des Sciences, des Techniques et des Savoirs

Année universitaire 2024-2025

Les promesses de l'ordinateur quantique

Mémoire de master 2

par Antoine Sérandour

sous la direction de Sara Aguiton (CAK, EHESS)

encadré par Marie Alauzen (LAMSADE, Dauphine) et David Saulpic (IRIF, Paris Cité)

Septembre 2025

Membres du jury : Claude Rosenthal (CEMS, EHESS), Sara Aguiton, Marie Alauzen et David Saulpic

Remerciements

Je tiens à remercier infiniment Marie Alauzen et David Saulpic pour leur proposition d'encadrement. Ils m'ont aidé à me projeter dans ce master, ont toujours été à l'écoute de mes questions et m'ont accompagné tout au long de l'année, malgré les diverses difficultés rencontrées. Merci pour leur temps, leurs attentions et leurs mots toujours enthousiastes.

Je tiens également à remercier Sara Aguiton pour sa confiance, qui m'a permis d'entreprendre ce projet de réorientation, et qui s'est montrée toujours disponible, m'apportant de précieux conseils.

Je remercie aussi Claude Rosental d'avoir accepté de siéger au jury de ce mémoire et de l'éclairer de ses perspectives.

Je souhaite exprimer ma gratitude à l'équipe de recherche qui m'a accueilli à l'IRIF pour son intérêt, ses nombreuses suggestions et l'environnement de travail stimulant. L'ancrage empirique de ce mémoire a été un réel plaisir. Je remercie encore David Saulpic d'avoir organisé ce terrain en amont. Merci également à toutes les personnes que j'ai interviewées pour l'enquête et qui se sont montrées curieuses et impliquées.

Je remercie l'ensemble des personnes avec qui j'ai discuté de ces résultats. En particulier, Clément Marquet (CSI, Mines PSL) et Liliana Doganova (CSI, Mines PSL), dont les remarques ont ouvert de nouvelles perspectives à ma réflexion sur le sujet. Merci également aux doctorants Thibault Ponchon (PACTE, UGA) et Delphine Blanchard (CAK, EHESS) pour leur écoute et conseils avisés sur mon sujet. Je tiens aussi à remercier les professeurs de l'EHESS du parcours Histoire de Sciences, des Techniques et des Savoirs avec qui j'ai eu plaisir à discuter et qui ont étendus intensément mes perspectives sur les sciences sociales.

Ma gratitude va aussi à mes camarades de l'EHESS, en particulier César, Pierre, Emma, Laura, Hugo et Lucie. Merci à tous et à toutes pour des discussions toujours motivantes et bienveillantes. Un immense merci à mes amis et à ma famille, qu'ils soient ou non familiers des sciences sociales, mais toujours attentifs à mes réflexions et présents dans les moments difficiles : Anouk, Léo, Juliette, Angelina, Samuel, Jérémy, Lola, Albert et Madeleine. Un mot particulier pour mes parents et Anouk qui ont eu la générosité de m'éclairer de leur relecture du manuscrit et de leurs chaleureux encouragements.

Sommaire

Introduction	5
Chapitre 1 : L'émergence des promesses d'applications de l'ordinateur quantique	20
Chapitre 2 : La promesse d'un marché des technologies quantiques comme horizon d'attente de l'administration française	68
Chapitre 3 : La mise en œuvre d'une politique techno-scientifique centrée sur les start-ups	93
Conclusion générale.....	122
Annexes.....	125
Liste des figures et tables	132
Abréviations	133
Bibliographie	135
Table des matières	146

Introduction

« Un pic de pollution dans l'eau de la Seine menace la santé des habitants et la faune locale. D'après vos renseignements, une molécule toxique inconnue aurait été relâchée en de grandes quantités dans le fleuve par un industriel peu scrupuleux. Les membres d'un laboratoire se sont penchés sur le problème en mettant au point une technologie à l'efficacité révolutionnaire pour tenter de calculer la molécule qui permettrait de neutraliser l'agent dangereux. Ils ont tous mystérieusement disparu avant de partager leurs résultats. Vous êtes des agents secrets du QICS, Qualified Intelligence Center of Secrets, infiltrés dans les locaux du laboratoire. Votre objectif, trouver et utiliser la technologie développée par les scientifiques. »

Voici l'amorce d'une activité de vulgarisation qui se jouera en septembre 2025 au Palais de la Découverte pour fêter à la fois l'année 2025 dédiées aux technologies quantiques déclarée par l'UNESCO¹ et la réouverture du palais. Cette amorce, que j'ai entendue à l'occasion d'une réunion entre les deux organisatrices de l'activité et une chercheuse en informatique quantique pour discuter de son déroulé et de sa validité scientifique, entraîne le public dans un jeu appelé *escape game*, jeu d'évasion en anglais. Cette activité invite les joueuses et les joueurs à incarner des personnages qui doivent résoudre des énigmes pour sortir du jeu.

Ce paragraphe de mise en situation pourrait désigner de nombreuses technologies, seule la mention de « calcul » suggère une technologie numérique. Ce narratif d'une technologie qui peut sauver le monde nous est familier, du fait de la diffusion des promesses technologiques dans les médias ou dans les lieux de médiation scientifiques. Ce mémoire cherche à prendre au sérieux ces promesses concernant l'ordinateur quantique pour identifier comment leur formulation, circulation et évolution dans divers espaces administratifs, scientifiques, industriels et culturels orientent le développement technologique.

L'exemple que constitue l'amorce offre un bon point d'entrée vers un certain nombre des caractéristiques des promesses formulées au sujet de l'ordinateur quantique. D'abord, celui-ci est présenté comme une machine qui calcule de manière « efficace » et il est donc

¹ L'Unesco a inauguré le 4 février 2025 « Année internationale des sciences et technologies quantiques », voir UNESCO, « 100 ans de quantique, ça n'est qu'un début », <https://quantum2025.org/fr/>, 2025, consulté le 28/08/2025.

caractérisé par ses performances. Ces performances sont qualifiées de « révolutionnaires », expression qui rappelle le concept de *révolution scientifique* de Kuhn (1962)² qui peut éclairer l'image que souhaite donner ce texte de l'ordinateur quantique. Chez Kuhn, une *révolution scientifique* représente le moment de passage d'un *paradigme* scientifique qui fait consensus dans la communauté académique à un autre. L'ordinateur quantique enclencherait donc un changement de *paradigme*, une nouvelle théorie du calcul qui en supplanterait une autre, mise en crise par les résultats de l'ordinateur quantique. Cet autre *paradigme* est explicité dans la suite du jeu qui montre des ordinateurs classiques, comme nos ordinateurs portables ou d'imposants centres de calcul, qui cherchent en vain à résoudre le problème, mais n'y parviennent pas. Cette amorce présente la promesse d'une technologie plus performante que les ordinateurs classiques.

Mais plus encore qu'un résultat scientifique, l'intérêt de cette performance réside dans le bénéfice social immense qu'elle permet. L'ordinateur quantique s'attaque, visiblement en un temps record, à une crise de santé publique que son homologue classique ne pourrait résoudre. Cette technologie apparaît comme une solution prête à l'emploi, qu'il suffit de trouver et d'utiliser pour résoudre le défi sanitaire qui inquiète Paris. Cet *escape game* présente l'ordinateur quantique comme une technologie transformant la manière de calculer, qui lui permet d'être particulièrement performante pour résoudre, entre autres, des crises sanitaires. Cette vision très positive, d'une technologie pas encore existante pour réaliser ces attentes, véhicule avec force les promesses de l'ordinateur quantique.

Cet *escape game* illustre la manière dont les promesses de l'ordinateur quantique sont façonnées et voyagent de la sphère scientifique vers d'autres arènes, qu'il s'agisse de la médiation culturelle, de la mise en récit autour de la santé publique ou des discours d'État. Par l'emploi de la promesse comme ressort du jeu, la promesse est motrice et engage les joueurs et les joueuses : ils doivent coordonner leurs actions, investir du temps et mobiliser des ressources pour concrétiser cette « révolution », ce qui illustre la force de ces énoncés. En même temps, l'*escape game* est lui-même forgé par les promesses du quantique. Résultat d'un discours qui présente l'ordinateur quantique comme un objet futuriste aux applications multiples, il diffuse ces représentations auprès du public au même titre que les promesses

² Kuhn, Thomas S., et Laure Meyer, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Editions Flammarion, 1983 (première édition 1962).

circulant entre start-ups, acteurs financiers, services de l'État et grand public. Cette double perspective sur l'*escape game* permet de saisir le rôle que jouent les promesses du quantique, à la fois moteur d'engagement et principe d'orientation du développement technologique.

Comprendre la formulation et la circulation de ces questions constitue l'*escape game* dans lequel j'ai été pris cette année sur l'invitation de David Saulpic, informaticien à l'Institut de Recherche en Informatique Fondamentale (IRIF), et Marie Alauzen, sociologue au Laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision (LAMSADE). Ces deux chercheurs se sont étonnés du registre de la croyance mobilisés dans les discours scientifiques sur l'ordinateur quantique et de ses ambivalences : certains chercheurs ne l'imaginent pas advenir de sitôt et, pourtant, candidatent à des appels à projets, bénéficient de financements ou font des communications scientifiques sur cet objet. Dans le cadre d'un stage, j'ai travaillé, avec leur aide, sur le rôle des attentes dans le développement de l'ordinateur quantique, et la manière dont les anticipations des bénéfices sont utilisées par les promoteurs de l'innovation scientifique pour former une rhétorique de la « révolution ». Comme les joueurs de l'*escape game*, il m'a fallu m'immerger dans un laboratoire d'informatique quantique et d'autres espaces fréquentés par les scientifiques de mon enquête pour voir comment les promesses se formulent, circulent et orientent les développements technologiques.

Cadre théorique pour analyser les promesses du quantique

Dans l'avant-propos de *L'innovation technique* (1995)³, Patrice Flichy présente les travaux en sciences sociales sur l'innovation comme le dépassement de l'opposition entre déterminisme technologique et déterminisme social. Il rappelle que « les machines sont le fruit d'une double construction, technique et sociale »⁴.

Pour décrire ces dynamiques d'innovation, j'ai identifié trois cadres d'analyse présentés dans la littérature comme complémentaires. Ils constituent des grilles de lecture de l'organisation de l'innovation : les *imaginaires sociotechniques*, la *sociologie des attentes* et l'*économie*

³ Flichy, Patrice, *L'innovation technique*, Paris, Editions La Découverte, 1995, 9-12.

⁴ *Ibid.* p. 10.

des promesses technoscientifiques. Je précise dans la suite ces concepts pour justifier ma grille de lecture analytique des promesses et les utiliser tout au long de mon développement.

Les *imaginaires sociotechniques*, tel que défini par Jasanoff et Kim (2009)⁵, désignent les visions collectives qui structurent le développement, l'appropriation et le soutien étatique d'une technologie. Leur étude de l'énergie nucléaire montre comment les États-Unis et la Corée du Sud façonnent différemment une même technologie à travers financement et régulation. Sans être central dans mon analyse, ce concept éclaire en arrière-plan la manière dont l'État français s'approprie et oriente les promesses du quantique.

La *sociologie des attentes*, développée par Borup et al. (2006)⁶, analyse comment l'innovation est issue d'opérations de projection vers le futur *via* des visions qui légitiment et structurent les technologies à venir. Ces attentes, incarnées par des artefacts (mesures, prototypes, projets pilotes), dépassent le cadre scientifique pour mobiliser acteurs et ressources, et se transforment selon les contextes et le temps, sous la forme de cycles d'engouement et de désaveu. Elles incitent à agir et varient en intensité et en crédibilité selon les groupes d'acteurs.

Un troisième concept, plus étroitement lié à la notion d'*attente*, est celui de *promesse*, qui souligne encore davantage le caractère à la fois performatif et normatif des énoncés prospectifs et engage la responsabilité de l'émetteur vis-à-vis de ses récepteurs. Le concept de *promesse technoscientifique* est théorisé par Joly (2010)⁷, qui déplace la focale de l'analyse vers un *régime économique* fondé sur ces promesses technoscientifiques pour exposer leurs effets. Le *régime* y est défini comme un « ensemble stabilisé de règles et de routines, formelles et informelles, associé à un ordre historique produit par des conflits entre des éléments hétérogènes et antagonistes qui caractérisent le domaine économique et

⁵ Jasanoff, Sheila, et Sang-Hyun Kim, « Containing the Atom: Sociotechnical Imaginaries and Nuclear Power in the United States and South Korea ». *Minerva*, 2009, 47(2): 119-46. <https://doi.org/10.1007/s11024-009-9124-4>.

⁶ Borup, Mads, Brown, Nik, Konrad, Kornelia, et Harro and Van Lente, « The sociology of expectations in science and technology ». *Technology Analysis & Strategic Management*, 2006, 18(3-4): 285-98. <https://doi.org/10.1080/09537320600777002>.

⁷ Joly, Pierre-Benoît, « On the Economics of Techno-Scientific Promises ». *Débordements : Mélanges Offerts à Michel Callon*, édité par Madeleine Akrich, Yannick Barthe, Fabian Muniesa, et Philippe Mustar, Paris, Editions Presses des Mines, 2010, 203-222. <https://doi.org/10.4000/books.pressesmines.747>.

légal »⁸. La mise en mouvement des promesses au sein de ce régime permet d'identifier deux objectifs principaux : la production de *légitimité* et la production de *crédibilité*.

La *légitimation* d'une promesse repose sur son caractère de futur désirable. Elle s'appuie sur l'idée de progrès technique et d'urgence à atteindre ce futur. La dimension temporelle d'anticipation est au cœur des promesses « négatives », c'est-à-dire des catastrophes à éviter. Les promesses créent ainsi un *horizon d'attente*, que Joly (2015)⁹ décrit comme un espace où des individus fondent leur espoir ou leur crainte qu'une découverte scientifique puisse changer le monde, identifiant les promesses comme génératrices de telles attentes.

La *crédibilisation* des promesses ne repose pas sur les mécanismes classiques de crédibilité scientifique étudiés en *Science and Technology Studies*, car une promesse reste spéculative. Néanmoins, elle s'appuie sur un petit cercle de spécialistes capable d'écartier les oppositions dans les arènes scientifiques ou publiques. La circulation des promesses tient à la conversion de la crédibilité scientifique en d'autres formes de crédibilité, comme le crédit financier.

L'ouvrage *Pourquoi tant de promesses ?* (2015)¹⁰, dirigé par Audébat, rassemble un ensemble de contributions académiques, dont celle de Joly sur le régime des promesses technoscientifiques. Les promesses y sont analysées comme des instruments stratégiques permettant aux chercheurs, ingénieurs, agences de financement, décideurs politiques, investisseurs ou industriels de mobiliser des ressources dans un contexte de concurrence économique et scientifique. Elles réduisent l'incertitude en rendant certains choix irréversibles et en inscrivant l'innovation dans l'idéologie du progrès technique, où les mécanismes du marché déterminent les innovations jugées souhaitables à court terme.

Cette analyse, critique à l'égard d'un système centré sur la valeur économique et dominé par quelques acteurs, dénonce l'inflation des promesses et appelle à reconstruire des horizons plus adaptés, en s'appuyant notamment sur les critiques internes au monde scientifique. Joly

⁸ *Ibid.* p. 204 traduction personnelle de « Regimes can be seen as stabilised sets of formal and informal rules and routines, associated with an historicised order produced by the conflicts between heterogeneous and antagonistic elements that characterise the economic and legal domain. ».

⁹ Joly, Pierre-Benoît, « Le régime des promesses technoscientifiques » in Audébat, Marc, *Sciences et technologies émergentes : pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Editions Hermann, 2015, 31-47.

¹⁰ Audébat, Marc, *Sciences et technologies émergentes : pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Editions Hermann, 2015.

(2015) propose de ne pas juger la véracité des promesses, mais de « considérer la façon dont sont créés les horizons d’attente », de « prendre au sérieux l’activité créatrice et de saisir comment de nouvelles technologies sont pensées avant même d’exister » et « d’examiner les modes de coordination des activités orientées vers le futur »¹¹. C’est dans cette perspective que s’inscrit ce mémoire, en adoptant toutefois une posture moins critique. Comme l’écrit Rosental dans ses travaux de 2019, « Il ne s’agit pas de dénoncer de fausses promesses ou des annonces intenables, mais d’analyser comment sont formulés des engagements pour l’avenir », en soulignant les incertitudes et les contraintes qu’elles font peser sur les acteurs.

Plusieurs publications affinent ensuite le concept d’économie des promesses. En particulier, l’introduction d’*Attentes et promesses technoscientifiques* (2022)¹² synthétise les connaissances sur les promesses en six principes fondamentaux soulignant leur caractère normatif, hétérogène, oscillant entre déception et engouement, performatif et évolutif.

J’utiliserai le terme de *promesse* pour tout énoncé portant sur l’ordinateur quantique et suscitant une *attente* chez les acteurs, dans ce que j’appelle un *rapport d’adhésion à la promesse* ou, selon Joly, « l’instauration d’une relation, la création d’un horizon d’attente »¹³. Néanmoins, je n’en resterai pas à l’analyse des régimes d’énonciation. Puisque les *promesses* engagent et créent de l’irréversibilité, il s’agira également d’examiner comment elles mobilisent des objets et pratiques, circulent et se modifient. Je chercherai ainsi à analyser leur normativité et leur performativité, en suivant leur évolution dans le temps, tant sur leur contenu que sur leur rapport d’adhésion, à travers leur circulation hétérogène selon les espaces et les acteurs.

¹¹ *Ibid.* p. 32.

¹² Dandurand, Guillaume, Florence Lussier-Lejeune, Daniel Letendre, et Marie-Jean Meurs, *Attentes et promesses technoscientifiques*. Edition Les Presses de l’Université de Montréal, 2022, 7-23. <https://doi.org/10.1515/9782760645028>.

¹³ Joly, Pierre-Benoît, « Le régime des promesses technoscientifiques » in Audétat, Marc, *Sciences et technologies émergentes: pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Editions Hermann, 2015, 35.

Traitement des promesses dans la littérature sur les « technologies quantiques »

Robertson (2021)¹⁴ étudie l'émergence de la notion de « technologies quantiques » et l'influence des attentes dans les candidatures aux appels à projets de l'agence nationale de recherche de l'Australie entre 2002 et 2020. S'inscrivant par son introduction dans la lignée de Borup et *al.* (2006) au sujet des attentes et de Joly (2010) au sujet des promesses, Robertson dévoile la prédominance d'un vocabulaire centré sur les « technologies quantiques » dans 700 candidatures intégrant le terme « quantum ». Elle montre comment ces projets de recherche véhiculent des promesses, pour mobiliser des ressources matérielles et sociales, telles que financements et réseaux de recherche. Son travail met en évidence la pertinence du cadre de l'économie des promesses pour analyser le développement du secteur.

Pour approfondir ce travail, je centrerai l'analyse sur les ordinateurs quantiques qui s'inscrivent dans une temporalité intermédiaire : plus avancée que les communications quantiques encore au laboratoire, mais pas encore industrialisée comme certains capteurs quantiques. Leur horizon à moyen terme accroît l'incertitude et les rend sensibles aux promesses, qui en font une vitrine des technologies quantiques, assez lointains pour incarner la rupture, mais déjà présents pour orienter les anticipations.

Cependant, délimiter l'objet *ordinateur quantique* pour cette étude est difficile. Plusieurs machines reposant sur des développements de recherche différents revendiquent le nom d'ordinateur quantique. Parfois, cette dénomination est contestée par la communauté académique qui publie des critères pour en stabiliser les frontières (DiVicenzo, 1996)¹⁵. Par ailleurs, cette délimitation ne prend pas en compte la généralisation de certaines promesses à toutes les technologies quantiques. Il s'agira alors de se concentrer sur les promesses et mécanismes qui agissent en s'autorisant un flou constitutif des promesses.

Par ailleurs, l'objet *ordinateur quantique* n'est pas unique, il se décline différemment selon les technologies et les usages. Je conserverai le singulier dans l'ensemble du mémoire pour

¹⁴ Roberson, Tara M., « On the Social Shaping of Quantum Technologies: An Analysis of Emerging Expectations Through Grant Proposals from 2002–2020 ». *Minerva*, 2021, 59(3) : 379-97. <https://doi.org/10.1007/s11024-021-09438-5>.

¹⁵ DiVincenzo d'IBM présente cinq critère pour stabiliser la notion d'ordinateur quantique dans DiVincenzo, David P., « TOPICS IN QUANTUM COMPUTERS. », *arXiv: Mesoscale and Nanoscale Physics*, 1996, 657-677. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/9612126>.

suivre les promesses dans leurs circulations, caractérisé par un usage au singulier du terme « ordinateur quantique ».

L'ordinateur quantique a déjà été spécifiquement étudié dans le travail de master de Delphine Blanchard (2020)¹⁶, qui retrace l'histoire de ce qu'elle nomme « calculateurs quantiques » à partir des publications académiques publiées entre 1980 et 2000. Elle montre comment, après une phase initialement très conceptuelle, les publications deviennent progressivement cosignées par théoriciens et expérimentateurs et enrôlent de plus en plus d'acteurs. Ces collaborations sont motivées par la publication d'algorithmes accompagnés de projections sur les performances attendues des ordinateurs et par un afflux de financements (notamment de l'armée américaine et de programmes européens) rappelant le cadre d'analyse des promesses. Son travail souligne le rôle central des publications et des réseaux d'acteurs dans la structuration du champ et je m'appuie sur cette profondeur historique pour analyser aujourd'hui la production et circulation des promesses autour de l'ordinateur quantique.

Les autres articles scientifiques que j'ai identifiés dans ma revue de littérature sont orientés vers un objectif de soutien à l'innovation, lié à l'acceptation et à la diffusion de cette technologie. Ils ont été réalisés dans des centres de recherche d'écoles d'ingénierie, proches des communautés académiques en physique et informatique qui la développent. Je mobilise ces productions comme des sources qui me paraissent utiles pour donner à voir la place des promesses du quantique et les questionnements de leurs formulations.

La « hype » autour des technologies quantiques se manifeste dans la manière dont les acteurs les mettent en récit. Suter et al. (2024)¹⁷ montrent, à partir d'une analyse quantitative de discours et rapports d'entreprises, de médias et d'États, que ceux-ci s'articulent autour de quatre thèmes : potentiels techniques et commerciaux, conflits internationaux, stratégies nationales et enjeux sociaux. Si les registres varient selon les acteurs, les promesses restent centrées sur des applications futures censées dépasser les performances classiques. Les auteurs soulignent également que tous les acteurs ne mobilisent pas les mêmes registres : les

¹⁶ Blanchard, Delphine, *Les calculateurs quantiques de 1980 à 2000, des débuts télescopiques entre calcul et physique*, mémoire de master, EHESS, sous la direction d'Emmanuel Bertand, 2020.

¹⁷ Suter, Viktor, Charles Ma, Gina Poehlmann, Miriam Meckel, et Lea Steinacker, « An integrated view of Quantum Technology? Mapping Media, Business, and Policy Narratives », arXiv, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02236>.

entreprises et les États communiqueraient plus sobrement sur les implications sociales que les médias, par exemple. Ce constat invite à examiner qualitativement, dans le cas français, non seulement le contenu des promesses, mais aussi les contextes et les publics auxquels elles sont adressées. Le cas de la France est d'autant plus intéressant que les promesses, portées par des laboratoires reconnus dans les réseaux académiques et bénéficiant d'une position d'influence dans les sphères industrielles et politiques européennes, alimentent une stratégie nationale ambitieuse et structurent une filière jugée « bien placée » pour construire rapidement un ordinateur quantique.

L'engouement médiatique et politique pour le quantique, perçu comme une opportunité à la fois pour inscrire la technologie à l'agenda et pour encourager la réflexivité sur le progrès technique (Robertson, 2020)¹⁸, est entretenu par les acteurs de la filière à travers diverses activités. Par exemple, Meinsma et al. (2023)¹⁹ observent que la vulgarisation du quantique, notamment via des formats grand public comme les TED Talks, tend à renforcer le caractère énigmatique de la technologie, à privilégier l'ordinateur quantique au détriment d'autres applications et à négliger les enjeux publics. Ils plaident pour un discours plus clair et plus diversifié. Seskir et al. (2022)²⁰ documentent quant à eux les efforts de « démocratisation » (éducation, accès aux machines via le cloud, stages en entreprise) tout en pointant leurs limites et en appelant à davantage de réflexivité. Dans le même sens, Robertson et al. (2021)²¹ analysent la « hype » médiatique autour de la « Seconde Révolution Quantique » dans les stratégies nationales et mettent en évidence une « crise de légitimité » : les bénéfices publics et les usages concrets restent difficiles à démontrer, tandis que des controverses

¹⁸ Roberson, Tara, “Can hype be a force for good? Inviting unexpected engagement with science and technology futures”, *Public understanding of science*, 2020, 29(5): 544–552. <https://doi.org/10.1177/0963662520923109>.

¹⁹ Meinsma, Aletta Lucia, Sanne Willemijn Kristensen, W Gudrun Reijnerse, Ionica Smeets, et Julia Cramer, « Is Everything Quantum ‘Spooky and Weird’? An Exploration of Popular Communication about Quantum Science and Technology in TEDx Talks », *Quantum Science and Technology*, 2023, 8(3): 035004. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/acc968>.

²⁰ Seskir, Zeki C, Steven Umbrello, Christopher Coenen, et Pieter E Vermaas, « Democratization of Quantum Technologies », *Quantum Science and Technology*, 2023, 8(2): 024005. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/acb6ae>.

²¹ Roberson, Tara, Joan Leach, et Sujatha Raman, « Talking about Public Good for the Second Quantum Revolution: Analysing Quantum Technology Narratives in the Context of National Strategies », *Quantum Science and Technology*, 2021, 6(2): 025001. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/abc5ab>.

scientifiques, comme celle sur la « suprématie quantique » de Google (2019), fragilisent la crédibilité académique. Les autrices soulignent ainsi la nécessité de dépasser un cadrage centré sur la compétition internationale, la sécurité nationale et les intérêts économiques, afin d'ouvrir la réflexion à un éventail plus large d'usages et de finalités sociales.

L'ensemble de ces travaux interroge les technologies quantiques à l'international. Ces approches généralistes ne permettent cependant pas d'identifier des nœuds de réseaux et de débats pour suivre les promesses et leur formulation. Thibault Ponchon, doctorant à l'Université Grenoble-Alpes, étudie²² les espaces de collaboration entre science et industrie dans le cas des technologies quantiques à Grenoble. Il s'intéresse aux dynamiques de coopération et de compétition entre acteurs proches géographiquement, et à leurs effets sur l'orientation de l'innovation, avec une approche sociologique et épistémologique. En me plaçant dans le cas français, et en concentrant mes terrains à Paris, je compte apporter l'éclairage d'un contexte plus dense en acteurs. Je m'intéresserai donc aux sphères scientifique, administrative, industrielle, financière et culturelle pour suivre les promesses.

Travaux pour l'analyse des promesses dans le cas de l'ordinateur quantique

L'étude des promesses de l'ordinateur quantiques demande de mobiliser diverses approches pour saisir leurs mécanismes dans les processus d'innovation. En premier lieu, les études de laboratoires se sont rapidement intéressées au processus de stabilisation des « faits scientifiques » (Latour et Woolgar, 1979)²³ : les croyances formulées dans un contexte, après une succession de médiations concrètes et matérielles, accumulent de manière structurée des résultats scientifiques vérifiables, transmissibles et qui pourront convaincre les scientifiques qui les consultent. Cette *crédibilité scientifique*, qui alimente la crédibilité des promesses, naît d'un processus cyclique intégrant dans un même réseau articles, financements, prototypes, reconnaissance par les pairs et ressources de recherche. Étudier la crédibilité des promesses quantiques impose d'entrer dans ces laboratoires et d'y repérer les énonciations de promesses pour comprendre comment elles y sont crédibilisées et mobilisées.

²² Ponchon, Thibault, « Les enjeux des coopérations science/industrie : le cas des technologies quantiques », thèse de doctorat, en cours.

²³ Latour, Bruno et Steve Woolgar, *La Vie de laboratoire*, Editions de La découverte, 1996, première édition 1979).

Les promesses circulent et sont façonnées également en dehors du périmètre du laboratoire. L'émergence d'espaces intermédiaires, notamment les start-ups qui « valorisent » leurs résultats, constitue un terrain privilégié pour la circulation de promesses, offrant des cadres d'expérimentation, de coordination et de valorisation (Doganova, 2013)²⁴. Certaines start-ups naissent précisément d'une promesse, la transforment, la diffusent et mobilisent les ressources financières et humaines. Les dispositifs de valorisation, qui mesurent la valeur (évaluation) et la construisent (valorisation), révèlent le travail d'intéressement (Akrich et al., 1988)²⁵ et de traduction (Akrich et al., 2006)²⁶ au sein et autour des start-ups. Étudier ces espaces, tant à travers leurs énoncés qu'à travers leurs dispositifs de valuation, permet d'analyser les promesses dans leur énonciation et leurs effets.

Rimbault (2023)²⁷ montre comment ces *espaces-frontières* génèrent de nouveaux processus de crédibilité pour les scientifiques. Au cours de mon enquête, j'ai cherché à relier ces espaces de crédibilité aux usages stratégiques des promesses quantiques : déploiement, modification, légitimation, extension à d'autres acteurs. Les mécanismes de valorisation incluent des preuves de concept et des compléments à des publications scientifiques, renforçant la crédibilité tant dans le domaine académique qu'industriel. Selon Rimbault, l'industrie et la science articulent les étapes de crédibilité identifiées par Latour et Woolgar (financement, dispositif expérimental, recrutement, argumentation, publication, reconnaissance) pour produire de nouvelles preuves de concept. Ces dispositifs cristallisent les promesses et crédibilisent à la fois les promesses et les acteurs qui les portent.

Pour analyser le rôle des preuves de concept dans la crédibilisation des promesses, je m'appuie sur les travaux de Rosental (2019)²⁸ sur la *démonstration*, entendue comme à la

²⁴ Doganova, Liliana, *Valoriser la science: les partenariats des start-up technologiques*, Edition Presses des Mines, 2012.

²⁵ Akrich, Madeleine, Michel Callon et Bruno Latour, « À quoi tient le succès des innovations? 1 : L'art de l'intéressement », *Gérer et comprendre, Annales des Mines*, 1988, 11: 4-17.

²⁶ Akrich, Madeleine, Michel Callon, et Bruno Latour, *Sociologie de la traduction : Textes fondateurs. Sociologie de la traduction : Textes fondateurs*. Sciences sociales, Paris, Editions Presses des Mines, 2006. <https://books.openedition.org/pressesmines/1181>.

²⁷ Rimbault, Benjamin, « Faire avec l'industrie », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2023, 17(2). <https://doi.org/10.4000/rac.30114>.

²⁸ Rosental, Claude. *La société de démonstration*. Vulaines-sur-Seine: Éditions du Croquant, 2019.

fois preuve, outil de persuasion, instrument pédagogique, joute ou divertissement. Cette approche est particulièrement pertinente pour le quantique, où les promesses reposent sur des preuves mathématiques et des prototypes matériels, pouvant viser à expliquer, convaincre, émouvoir ou affirmer une position politique. Espaces privilégiés de production et de légitimation des promesses, elles sont performatives et mobilisent dispositifs matériels, argumentaires et mises en scène, dans un cadre public identifié. Elles influent directement sur le développement des prototypes et incarnent la matérialité des promesses.

Dans le domaine quantique, exposer un véritable prototype devant un large public reste rare. Comme le note Doganova (2012)²⁹, certains secteurs comme les biotechnologies, ont recours à des formats hybrides de démonstration entre la conférence scientifique, le salon industriel et le *speed-dating*. Les mécanismes de la démonstration sont alors travaillés et déplacés mais toujours utilisés pour crédibiliser les promesses. Les espaces de démonstration ont donc un intérêt analytique dans l'étude de la formulation et la circulation des promesses.

La filière quantique est aussi bénéficiaire de nombreux *instruments d'action publique* soutenant l'innovation qui participent à la circulation et la consolidation des promesses. Comme le soulignent Lascoumes et Le Galès (2004)³⁰, ils incarnent des choix politiques et produisent leurs propres effets, tout en affichant une technicité qui tend à dépolitisier les arbitrages. En conférant ressources et visibilité à certains projets, ils traduisent une adhésion implicite aux promesses qu'ils contribuent à crédibiliser et à légitimer.

Les promesses de l'ordinateur quantique engagent un large panel d'acteurs et constituent un régime d'économie des promesses que l'on retrouve pour les biotechnologies, les nanotechnologies ou encore l'intelligence artificielle. Comment l'ordinateur quantique constitue-t-il un projet commun à partir des promesses qu'il inspire à ses promoteurs ? Comment les spécificités théoriques et pratiques de sa faisabilité et de son avantage influencent-elles sur les formulations, les rapports d'adhésion à ces promesses et l'organisation du réseau d'acteurs qui les fait circuler ? Comment les controverses scientifiques influencent-elles sur les promesses ? Toutes ces questions m'amènent à formuler la problématique de cette enquête : Comment les promesses de l'ordinateur quantique structurent-elles les réseaux d'acteurs

²⁹ Op. cit. p. 165-169.

³⁰ Lascoumes, Pierre et Patrick Le Gales, *Gouverner par les instruments*, Editions La découverte, 2004.

scientifiques, administratifs et industriels par les attentes d'avantages sociaux et économiques pour orienter la trajectoire de cette technologie en France ?

Terrains et méthodes

Ce travail de recherche a été mené au cours d'un stage de recherche encadré par David Saulpic et Marie Alauzen. Ce dispositif de collaboration a permis de combiner des apports en informatique quantique et en sociologie au sein d'une même enquête. Ce travail, la méthode et les réflexions qu'il y déploie, reposent largement sur nos discussions hebdomadaires, qui ont orienté le choix des terrains, mis en lumière des angles d'analyse et corrigé mes incompréhensions, notamment en physique et en informatique quantique.

Afin d'analyser les promesses et les effets qu'elles produisent dans le développement de l'ordinateur quantique, j'ai cherché à les replacer dans les contextes où elles sont formulées, et à saisir les formes d'adhésion qu'elles suscitent. Pour ce faire, j'ai mené deux types de terrains complémentaires entre octobre 2024 et mai 2025 : des observations ethnographiques de scientifiques en situation, et une série d'entretiens semi-directifs avec des acteurs impliqués dans l'écosystème quantique dont le détail est présenté en *annexe I*.

Les observations ont été facilitées par le soutien de David Saulpic auprès de collègues de l'IRIF spécialisés en informatique quantique. J'ai participé à neuf séances d'observation : une réunion de laboratoire, un forum de recrutement d'étudiants, un séminaire devant des étudiants, deux sessions de travail au tableau, une réunion d'experts à l'Académie des technologies et trois réunions autour de projets de vulgarisation scientifique. Six observations ont été enregistrées, représentant au total 13 heures et 45 minutes d'observations. Quatre séances ont eu lieu hors laboratoire et une en visioconférence.

Pour compléter ces observations, j'ai réalisé quatorze entretiens semi-directifs (12 heures enregistrées, 2 non enregistrées). J'ai choisi les enquêtés selon le rôle de leurs organisations dans le réseau d'acteurs du quantique, en intégrant diverses arènes administratives, scientifiques et industrielles. J'ai ainsi rencontré quatre chercheurs, un doctorant d'une start-up, deux dirigeants de start-ups (dont l'un issu du milieu académique), trois agents publics (dont deux en lien avec la Défense), un consultant en technologies quantiques d'une grande entreprise française, un *partner* de fonds d'investissement, l'ancienne ministre de la

recherche Frédérique Vidal ayant travaillé sur la stratégie nationale quantique et l'un de ses anciens conseillers désormais en poste dans un organisme de recherche national.

Tous les acteurs rencontrés ont accueilli favorablement mes questions, et près de la moitié m'ont invité à travailler dans leurs locaux (administrations, laboratoires, *open spaces* de start-ups), et j'ai essuyé trois de refus lors des contacts. J'attribue cette accessibilité à leur intérêt pour le sujet de l'étude, pour les promesses du quantique qu'ils sont intéressés de partager, et à ma formation en physique, qui a pu contribuer à intriguer, faciliter ou rassurer certains acteurs et m'ouvrir des portes empiriques. Chaque enquêté a signé un formulaire de consentement (*Annexe II*) précisant les modalités de captation (prise de note, de photos, et enregistrement), de stockage (local et serveur EHESS) et d'utilisation des données. L'enquête a par ailleurs été déclarée aux délégués de la protection des données de l'EHESS et du CNRS. Faute de temps, je n'ai pas fait relire chaque extrait mobilisé dans ce mémoire par les enquêtés concernés dont l'anonymat doit être protégé, excepté les figures publiques. Toute citation individuelle sera relue et validée par les participants concernés avant une éventuelle publication de cette enquête.

Les deux volets de terrain se sont déroulés de novembre 2024 à avril 2025. Les enregistrements ont d'abord été transcrits automatiquement via l'infrastructure Huma-Num (CNRS, Campus Condorcet, AMU), puis corrigés manuellement. J'ai ensuite importé les fichiers corrigés dans QDA Miner Lite, mis à disposition gratuitement par Provalis Research, pour conduire une analyse de *théorie ancrée* (*grounded theory* en anglais) selon Glaser et Strauss (1967)³¹. La théorie ancrée est une démarche inductive visant à construire des analyses directement à partir des données de terrain, sans formuler d'hypothèses préalables. Elle se déploie en trois étapes principales : d'abord un codage ouvert, où l'on identifie et nomme des unités de sens récurrentes dans les données. Ensuite, un codage axial permet de regrouper ces codes en concepts et à explorer leurs relations. Enfin, un codage sélectif articule les catégories centrales pour formuler une explication cohérente. Sur mon terrain, cette méthode permet de faire émerger les logiques d'action et de croire à partir des discours et pratiques, plutôt que d'imposer un cadre théorique a priori.

³¹ Glaser, Barney G. et Anselm L. Strauss, *The Discovery of Grounded Theory : Strategies for Qualitative Research*, Chicago, Editions Aldine Pub., 1967.

Un codage ouvert initial m'a permis de générer 329 codes, que j'ai ensuite reconfigurés en catégories lors du codage axial. Si j'ai manqué de temps pour poursuivre le codage sélectif et aboutir à une théorie autonome, la méthode de théorie ancrée m'aura grandement aidé à manipuler un grand volume de données empiriques de manière systématique, ce qui pour un novice de l'analyse en sciences sociales fut d'une grande aide, d'autant plus sur une thématique encore peu explorée par la littérature. Elle m'a également permis de valoriser les données empiriques, tout en étant plus éloigné de la littérature avec laquelle j'étais moins familière et qui est intervenue à la fin du processus. La littérature est donc mobilisée pour problématiser et accompagner une analyse inductive des données empiriques.

J'ai mené cette enquête après un master de physique à l'ENS de Lyon et une année de formation aux Mines de Paris. Si ce parcours m'a sans doute facilité l'accès aux entretiens et aux observations, il a aussi influencé mon regard. Ayant déjà suivi des cours de physique quantique, j'ai appréhendé sereinement certains concepts qui auraient pu déconcerter un étudiant sans formation préalable. À l'inverse, cette familiarité m'a également empêché de remettre en question certaines conceptions scientifiques que j'aurais pu interroger plus avant.

Annonce de plan

Je cherche à déployer dans cette enquête le concept de régime économique des promesses technoscientifiques de Joly (2010, 2015), déjà identifié comme pertinent dans la littérature, pour le développement de l'ordinateur quantique. J'adopterai donc cette question tout au long de ce mémoire : Comment les promesses de l'ordinateur quantique structurent-elles les réseaux d'acteurs scientifiques, administratifs et industriels par les attentes d'avantages sociaux et économiques pour orienter la trajectoire de cette technologie en France ?

Pour répondre, j'explorerais en premier lieu les promesses d'applications de l'ordinateur quantique par l'analyse des activités de divers acteurs pour montrer comment leur projection dans le futur façonne le développement technologique avant même sa réalisation. Ensuite, à travers l'émergence d'une promesse de marché, je m'intéresserai à saisir comment sont créés les horizons d'attente et comment ils s'incarnent, dans le cas de l'État français par l'étude de l'élaboration d'une politique techno-scientifique. Enfin, je m'intéresserai aux modes de coordination des acteurs dans des activités orientées vers le futur à travers les instruments d'action publique, et leurs effets sur le réseau d'acteurs.

Chapitre 1 : L'émergence des promesses d'applications de l'ordinateur quantique

Par ce premier chapitre, je propose de m'interroger sur l'émergence de promesses autour de l'ordinateur quantique. Par quelles activités les acteurs développant cette technologie créent-ils des promesses ? Quelles sont ces promesses et comment sont-elles formulées par ces acteurs ? Comment orientent-elles le développement de l'ordinateur quantique ? Ce chapitre cherche ainsi à saisir la naissance et la structuration des promesses, en se concentrant sur ce que j'ai appelé les *promesses d'applications* de l'ordinateur quantique, c'est-à-dire les usages anticipés de l'ordinateur quantique qui structurent les horizons d'attente. Ce processus de formulation des promesses fait intervenir des activités scientifiques qui élaborent des anticipations théoriques, et sont mises en circulation jusqu'à d'autres espaces par diverses activités de *traduction* et de *démonstration*. L'objectif de ce chapitre est d'aborder ces différentes activités formulant et faisant circuler les promesses. Ces activités, caractérisées par leur anticipation et projection dans le futur, orientent le développement de l'ordinateur quantique tout en cherchant l'adhésion d'autres acteurs.

Pour répondre à cette question, j'ai combiné plusieurs sources : d'une part, j'ai retracé dans la littérature scientifique et historique, à partir des années 1980, certains concepts (*qubit*, *complexité algorithmique*, *correction d'erreurs*) et expériences (*prototypes* d'ordinateur) fondateurs, et j'ai cherché à articuler le rôle qu'ils ont joué dans la formulation de l'avantage quantique. D'autre part, mon enquête de terrain en laboratoires d'informatique quantique (observations de séminaires, de sessions de travail de recherche et de conseils pour des activités de médiation scientifique) m'a permis de décrire en contexte la manière dont ces concepts sont maniés par les chercheurs et comment ils s'incarnent dans des démonstrations au tableau ou dans des discussions autour d'articles scientifiques. Enfin, j'ai analysé les dispositifs de médiation et de communication (articles scientifiques, panneaux d'exposition, rapports institutionnels, communiqués de presse) pour saisir les opérations d'inscription, de traduction et de circulation des promesses vers des publics non-spécialistes et identifier leurs objectifs d'intéressement, d'enrôlement et d'acquisition de ressources.

Le chapitre est structuré en deux temps. Je présenterai d'abord comment les activités théoriques anticipent et orientent, par les concepts qu'elles mobilisent, la formulation de futures applications pour l'ordinateur quantique. Puis, je discuterai des démonstrations de

ces anticipations à travers deux cas d'étude (un article scientifique publié par la start-up française Pasqal sur l'utilité de l'ordinateur quantique pour le secteur bancaire et un article de Google sur la suprématie de son ordinateur quantique sur les autres ordinateurs classiques), ce qui me permettra d'analyser comment ces espaces crédibilisent et légitiment les promesses d'applications. Ce parcours met en évidence une tension entre le registre théorique, centré sur la formalisation de l'avantage quantique, et le registre expérimental. J'ai cherché, en rejouant cette dichotomie dans la structure du chapitre, à établir des parallèles tant sur les gestes de projection et d'anticipation que sur les opérations de communication et de traduction des concepts scientifiques vers d'autres arènes, ou encore sur l'articulation de l'empirie dans les questionnements théoriques et inversement.

L'anticipation théorique de l'avantage de l'ordinateur quantique comme la promesse d'applications multiples

Le projet de développer un ordinateur quantique naît de l'anticipation théorique de ses bénéfices. La recherche en informatique quantique formalise ces gains potentiels et propose des exemples d'application illustrant l'intérêt d'un tel ordinateur. Cette section s'intéresse à la manière dont l'anticipation et la formalisation des gains théoriques configurent l'avenir de l'ordinateur quantique, permettent de formuler des *promesses d'applications* et orientent les pratiques ainsi que les débats au sein de la communauté scientifique.

Pour y répondre, je présenterai d'abord les outils conceptuels de l'informatique quantique (qubits, algorithmes et complexité algorithmique) qui permettent de formuler formellement un « avantage quantique ». J'expliquerai ensuite comment la quête de cet avantage structure les activités de recherche que j'ai observées et comment ce formalisme, par un processus de traduction, circule dans d'autres sphères, illustré par l'exemple d'une réunion de médiation scientifique. Enfin, j'analyserai les débats qui émergent autour de l'ampleur de cet avantage et montrerai comment l'incertitude pousse à s'appuyer sur des résultats empiriques pour valider les anticipations théoriques.

L'algorithme comme élément théorique d'appui pour les promesses

De premiers physiciens quantiques, aujourd’hui identifiés par la communauté académique comme des fondateurs du champ, énonçaient le projet de construction d’un calculateur quantique dans les années 1980. Leur objectif était de dépasser une limite structurelle aux méthodes de calcul de l’époque pour simuler des systèmes régis par la mécanique quantique, théorie décrivant la dynamique de particules microscopiques comme des gaz d’atomes ou de molécules. Le physicien Richard Feynman (professeur à Caltech, lauréat du prix Nobel de physique en 1965) remarquait en 1981³² qu’il devenait extrêmement difficile pour un ordinateur classique de simuler les comportements d’électrons ou de molécules complexes. Le nombre de données à prendre en compte et leur précision rendaient les calculs trop longs à établir. Leurs réflexions convergeaient vers une idée : s’il faut décrire la matière quantique, alors pourquoi ne pas employer directement un « véritable système quantique » pour réaliser le calcul lui-même ?

Cette démarche nouvelle, que l’on appellera *calcul quantique*, s’appuie donc sur un « système quantique », c'est-à-dire avec des propriétés spécifiques qui permettent d’effectuer d’autres opérations que celles des ordinateurs classiques³³. Ce système quantique, sur lequel est effectué le calcul, est appelé *qubit* et constitue le support de l’information lors du calcul. Cette dénomination force le parallèle avec les *ordinateurs classiques* qui traitent l’information sous la forme de *bit* d’information. La comparaison entre le calcul quantique et classique est essentielle dans le développement du champ car elle motive la raison d’être du calcul quantique, à savoir réaliser certaines opérations non permises en classique pour calculer plus rapidement. Un ordinateur quantique est donc, comme un ordinateur classique, un calculateur, s’appuyant sur un support de l’information, des qubits, et capable d’exécuter des algorithmes. Pour discuter la formulation de promesses à partir de ce projet de recherche, il convient de préciser les différents concepts qui les motivent.

³² Feynman, Richard P., « Simulating Physics with Computers », *International Journal of Theoretical Physics*, 1981, 21: 467–88. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>.

³³ Le terme « ordinateur classique » renvoie aux instruments réalisant des calculs en utilisant l’électronique silicium, dont l’unité élémentaire est le transistor, comme les ordinateurs portables, ou les centres de calcul haute performance.

Le dictionnaire Larousse définit un algorithme comme l’« ensemble de règles opératoires dont l’application permet de résoudre un problème énoncé au moyen d’un nombre fini d’opérations »³⁴. Il peut donc être écrit sous la forme d’un article de recherche, mais aussi être mis en route par un calculateur qui « exécute » l’algorithme, c’est-à-dire réalise l’ensemble des opérations qu’il décrit. Le résultat fourni répond à une question, un *problème*, auquel l’algorithme se présente comme la description de l’ensemble des étapes pour y répondre. Plusieurs algorithmes peuvent ainsi répondre à un même problème, ce qui constitue une discipline de l’informatique fondamentale en elle-même : *l’algorithmique*. Une chercheuse présente en entretien cette discipline en ces termes :

« *En algorithmique, nous essayons de trouver des solutions algorithmiques à des problèmes.* [...] *Nous étudions des modèles de calcul et nous essayons de trouver des stratégies de calcul efficaces. Nous avons différentes mesures de ce que veut dire efficace. Ça peut être le temps [de calcul] qui est la mesure la plus naturelle.* »

Chercheuse en informatique fondamentale, spécialisée en informatique quantique
(Entretien du 08/01/2025)

Les algorithmes qui répondent à un même problème sont donc mis en comparaison selon des critères d’efficacité, tels que le temps de calcul. Ces critères modélisent des propriétés de l’algorithme, et ne sont donc pas directement reliés à une mesure empirique sur une machine. Par exemple, la *complexité algorithmique* estime le nombre d’étapes de calcul nécessaire dans un algorithme pour résoudre un problème. Le temps réel du calcul dépend du nombre d’étapes, mais aussi de la rapidité de l’ordinateur pour exécuter chacune d’entre elles et de sa capacité à exécuter plusieurs étapes simultanément. La *complexité* est ainsi une propriété de l’algorithme, elle reste plus ou moins indépendante des caractéristiques physiques des ordinateurs quantiques qui l’exécutent.

La notion de complexité algorithmique, conçue pour les ordinateurs classiques, a été étendue pour être adaptée à l’ordinateur quantique. En 1985, David Deutsch, alors chercheur à l’Université d’Oxford, publia un article³⁵ fondateur posant le cadre conceptuel d’une

³⁴ Larousse, « Algorithme », <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/algorithme/2238>, consulté le 09/06/2025.

³⁵ Deutsch, David, « Quantum Theory, the Church–Turing Principle and the Universal Quantum Computer. » *Proceedings of the Royal Society of London A. Mathematical and Physical Sciences*, 1985, 400(1818): 97–117. <https://doi.org/10.1098/rspa.1985.0070>.

« machine de Turing quantique ». La machine de Turing, introduite par Alan Turing en 1937³⁶, est un modèle abstrait d'ordinateur capable d'exécuter des algorithmes en manipulant des symboles sur un ruban infini selon un ensemble fini de règles. Elle sert de fondement pour définir la notion de calculabilité. Deutsch introduit l'idée qu'un tel modèle peut être reformulé dans le cadre de la physique quantique, en considérant une machine de Turing fonctionnant selon les principes de la mécanique quantique. Cette « machine de Turing quantique » posait les bases de l'informatique quantique comme discipline de recherche académique : elle permettait de concevoir certains phénomènes quantiques non plus seulement comme des objets de mesure ou d'observation physique, mais comme des processus de calcul. Il devenait alors possible de penser l'exécution d'un algorithme sur des supports d'information aux propriétés quantiques et cela permettait aux informaticiens, pour un même problème, de comparer les propriétés d'*algorithmes classiques* exécutables sur des ordinateurs classiques avec celles d'*algorithmes quantiques*, exécutables sur des ordinateurs quantiques.

Cette comparaison est au cœur de la formulation des promesses de l'ordinateur quantique, comme le montre ce *verbatim* d'un *Chief Executive Officer* (CEO, c'est-à-dire directeur) d'une start-up travaillant sur des technologies quantiques :

« *Le process de fabrication de puces informatiques fonctionne comme cela aujourd'hui : des algorithmes d'optimisation qui vont chercher à agencer le mieux possible les transistors dans la puce. Je ne sais pas combien il y a de millions de transistors aujourd'hui dans une puce, mais c'est un problème complexe, essentiellement pour minimiser la consommation de la puce. Des algorithmes de recherche vont donc tourner en continu pendant un certain temps. Ce temps, il est guidé par le cycle de développement de l'entreprise. C'est-à-dire que l'entreprise a besoin de mettre sur le marché régulièrement des nouveaux produits pour alimenter son cycle de vente. Si on a un algorithme qui permet, par exemple, d'être 30% plus proche de la solution optimale dans le même temps, et donc de baisser de 30% la consommation électrique de la puce, c'est immense.* »

CEO d'une start-up française dans la communication quantique, titulaire d'un doctorat en informatique quantique (Entretien du 31/01/2025)

³⁶ Turing, Alan, « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », *Proc. London Math. Soc.*, 2(42), 1937, pp. 230-265. <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>.

Ce CEO présente l'intérêt de l'ordinateur quantique en parlant de « précision », entendue comme la capacité à s'approcher davantage d'une solution optimale dans un temps donné. Si cette précision ne correspond pas exactement au concept de complexité, les deux renvoient à la même dimension du temps de calcul nécessaire pour obtenir un résultat. En informatique théorique, la complexité mesure la croissance de ce temps de calcul en fonction de la taille du problème. Cet indicateur fonde l'avantage théorique de l'ordinateur quantique qui apparaît plus efficace qu'un ordinateur classique. Je m'appuierai donc principalement sur la notion de complexité, qui occupe une place centrale dans les représentations et les discours des acteurs, tout en gardant à l'esprit que d'autres indicateurs (précision, mémoire nécessaire ou encore efficacité énergétique) sont mobilisés par les chercheurs pour caractériser les performances des algorithmes. C'est dans cette pluralité de métriques que naissent des frictions et des débats, sur lesquels je reviendrai plus loin.

Ce *verbatim* présente également les algorithmes comme des « algorithmes d'optimisation ». Cette dénomination fait référence à une *classe* d'algorithme, qui répond à une *classe* de problème. L'algorithme regroupe les problèmes en *classes*, associant ainsi un ensemble de situations semblables aux algorithmes qui y apportent une solution, selon des critères théoriques. Ces classes identifient des régularités et généralisent les algorithmes comme solutions à de multiples problèmes. Le même CEO précise ensuite :

« *C'est tellement général que même ces petites choses [petits gains de 10% ou 30%] sont extrêmement pertinentes en pratique. Et, disons, avec un impact potentiellement énorme sur beaucoup de choses.* »

CEO d'une start-up française dans la communication quantique, titulaire d'un doctorat en informatique quantique (Entretien du 31/01/2025)

Cette généralisation des bénéfices permet de formuler de multiples promesses fondées sur la complexité algorithmique. Par exemple, l'État français expose les promesses technoscientifiques de l'ordinateur quantique dans un rapport de 2021³⁷, qui définit la stratégie nationale des technologies quantiques, un dispositif de soutien à la filière quantique que j'examinerai plus en détail au chapitre 2. Dans la première section de ce rapport, intitulée

³⁷ État français, « Stratégie nationale sur les technologies quantiques », https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/content_migration/document/Dossier_de_Presse_Presentation_de_la_strategie_nationale_sur_les_technologies_quantiques_1372307.pdf, 2021, consulté le 02/06/2025.

« Les impacts socio-économiques », huit secteurs d’activité sont identifiés comme concernés par les technologies quantiques. Parmi ceux-ci, six renvoient explicitement à l’ordinateur quantique :

« *Mieux se soigner ; Mieux se nourrir ; Mieux combattre le changement climatique et ses effets ; Mieux se déplacer ; Mieux produire ; Mieux se préparer aux conflits de demain* ».

Extrait du sommaire du rapport présentant la stratégie nationale
sur les technologies quantiques (2021)³⁸

J’ai retrouvé cette diversité d’applications lors d’entretiens où plusieurs acteurs abordent les nombreux usages potentiels de l’ordinateur quantique. Par exemple, lors d’un entretien avec un ingénieur de la Direction Générale de l’Armement (DGA), direction administrative chargée de développer une expertise technique sur les technologies à utilité militaire, celui-ci me présente les nombreuses applications de l’ordinateur :

« *[Après l’avoir interrogé sur les clients des start-ups que la DGA accompagne, comme EDF] La vocation de l’ordinateur quantique est de servir un nombre finalement incalculable d’applications et donc le militaire c’est une petite partie. Donc vous avez amplement raison de citer notamment EDF, ou plus généralement l’industrie qui va avoir, par exemple, pouvoir bénéficier peut-être des premiers usages des ordinateurs quantiques avec pas beaucoup de qubits logiques [c’est-à-dire fiables, avec peu d’erreurs], qui fonctionnent et qui sont bien intriqués, mais qui permettent de résoudre des problèmes d’allocation de ressources [problèmes d’optimisation], comme peut se poser EDF ou d’autres secteurs industriels, pour aider à la conception de grands systèmes. Déjà, l’ordinateur quantique jouera un rôle. Et si ce n’est pas des usages spécifiquement défense, c’est tout le monde en fait.* »

Ingénieur DGA responsable du suivi de la filière industrielle quantique, dont fait partie le programme d’accompagnement de start-up développant un ordinateur quantique ProqCima

(Entretien du 27/03/2025)

Par les algorithmes et leurs propriétés comme la complexité, l’ordinateur quantique se voit attribuer de potentiels usages pour l’ensemble des secteurs industriels. Cette généralisation génère une multitude de promesses d’applications. Je vise par ce concept l’ensemble des

³⁸ Ibid. p. 2.

usages qui sont anticipés par les acteurs de l'ordinateur et forment des horizons d'attente. Je montre ensuite comment ces promesses sont crédibilisées par la communauté scientifique.

La recherche d'algorithmes quantiques présentant un avantage

La recherche de nouveaux algorithmes quantiques prend une grande place dans les pratiques de recherche que j'ai observées. Lors d'un séminaire devant des étudiants en master de physique quantique, un informaticien présente les enjeux de l'informatique quantique. Après avoir commencé à présenter les enjeux de l'informatique quantique avec l'algorithme de Shor qui pose une menace, il fait la transition suivante :

« Mais [l'algorithme de Shor] n'est pas le seul algorithme quantique qui intéresse les gens. Et la grande question est : « Peut-on trouver des algorithmes quantiques intéressants ? » Intéressant signifie que l'on veut une accélération par rapport aux algorithmes classiques, par exemple. »³⁹

Chercheur en informatique quantique lors d'un séminaire devant des étudiants
en master de physique (Observation du 28/11/2024)

Le chercheur passe ensuite à son transparent suivant que je présente en *figure I*. Il poursuit : *« En général, nous voulons une accélération exponentielle par rapport à l'algorithme classique, car lorsque vous passez de l'algorithme classique à l'algorithme quantique, le matériel est plus compliqué, ce qui entraîne un grand nombre de frais généraux. Ainsi, si vous souhaitez obtenir une accélération considérable en principe, il est probable qu'en pratique vous n'obtiendrez pas d'accélération du tout. »*⁴⁰

Chercheur en informatique quantique lors d'un séminaire devant des étudiants
en master en physique (Observation du 28/11/2024)

Le chercheur évoque explicitement les enjeux de l'informatique quantique : identifier des problèmes pour lesquels les algorithmes quantiques de résolution surpassent leurs

³⁹ Traduction personnelle depuis « But this is not the only quantum algorithm that people care about. And the big question is: “can we find interesting quantum algorithms?” And interesting means that you want a speedup compared to classical algorithms for example. ».

⁴⁰ Traduction personnelle depuis « And usually, we want an exponential speedup compared to the classical algorithm because when you go from classical to quantum, the hardware is more complicated, so you have a lot of large overheads. So if you want to have a huge speedup in principle, probably in practice you won't have a speedup at all. ».

homologues classiques. Il met l'accent sur le gain temporel, qualifié d'« accélération » (ou *speed up* en anglais), ce qui renvoie directement à une amélioration de la complexité algorithmique.

When can we get a quantum speedup?

ideally, we want an *exponential speedup* compared to classical algorithms (because large overheads, and quantum hardware slower than classical one)

- ▶ *search in database* (Grover's algorithm): requires time \sqrt{n} compared to n classically, but overheads are prohibitive in practice
- ▶ *factoring and discrete log* (Shor's algorithm): exponential speedup compared to best-known classical
 - ⇒ breaks most of currently deployed public-key cryptography
- ▶ *simulation of quantum systems* (materials/molecules): exponential speedup?
 - ⇒ medicine (drug discovery), chemistry, materials (high-T superconductivity)

28 November 2024 5 / 24

Figure I : Transparent lors d'un séminaire devant des étudiants en master de physique

J'ai observé cet intérêt pour un avantage de complexité lors de mes deux observations de sessions scientifiques au travail au tableau⁴¹. Lors d'une première observation, une chercheuse est invitée par un collègue du laboratoire afin de confronter leurs réflexions. Ils cherchent à dégager des pistes susceptibles de déboucher sur une future collaboration pour une publication scientifique, comme me l'a précisé le chercheur organisateur de la session. La chercheuse présente une modélisation selon laquelle l'algorithme se déplace le long d'une ligne dont chaque point correspond à une étape, et où le paramètre d représente le nombre d'étapes parcourues. Alors qu'elle formalise sa démonstration, elle fait une digression pour

⁴¹ La pratique du travail au tableau est omniprésente dans les laboratoires de mathématiques et d'informatique, où elle constitue un espace de médiation pour l'élaboration et la communication des résultats entre scientifiques. Cette modalité n'est pas qu'un support et a été étudiée en sociologie, par exemple par Barany, Michael J., et Donald MacKenzie, « Chalk: Materials and Concepts in Mathematics Research », *Representation in Scientific Practice Revisited*, The MIT Press, 2014. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262525381.003.0006>. Ils montrent comment le tableau intervient comme un artefact cognitif dynamique où les inscriptions (symboles, annotations, effacements, reformulations) peuvent être rapidement modifiées, superposées ou éliminées. Ce procédé rend visibles les opérations conceptuelles, participe à la formalisation progressive des concepts et constitue un lieu privilégié où s'observent la fabrique de promesses technoscientifiques, formulées et formalisées par les scientifiques.

signaler qu'une accélération apparaît dans le cas quantique. Son collègue l'interrompt pour en discuter, comme le présente le dialogue qui suit :

« Chercheuse : *En fait, il y a une petite accélération ici, parce que dans une ligne, le quantique prend d mais classique il prend d au carré.*

Chercheur : *[quand la marche aléatoire va] vers l'avant, mais pas pour l'algorithme complet.*

Chercheuse : *Oh, parce que tu veux dire qu'ils envoient [le pointeur de l'algorithme] dans les deux sens [sur la ligne, soit à gauche soit à droite]. Oui, je vois ce que tu veux dire.* »⁴²

Un chercheur résident de l'IRIF et une chercheuse invitée, tous deux spécialisés en informatique quantique lors d'une session de travail au tableau dans le bureau du chercheur
(Observation du 05/12/2025)

Sans chercher à saisir le résultat dans lequel cette réflexion s'inscrit, cette scène met en évidence la notion *d'accélération*, mesurée par le paramètre d (le nombre d'étapes parcourues), dont la progression est comparée au comportement classique. La comparaison avec le modèle classique est spontanée, car c'est précisément cette mise en rapport qui fonde la valeur scientifique du résultat. Bien que, dans ce cas particulier, la comparaison entre classique et quantique paraisse accidentelle, elle illustre néanmoins un réflexe fondamental dans la recherche en informatique quantique.

Lors d'une autre séance, un chercheur et son doctorant échangent au tableau sur la manière d'approfondir les pistes de recherche proposées par ce dernier.

« Chercheur : *Dans l'article [scientifique dont ils ont parlé précédemment], il semble qu'ils considèrent également cette sorte de poids de Hamming [une propriété combinatoire]*
[...]

Doctorant : *Et parviennent-ils à... ?*

Chercheur : *On obtient des accélérations quantiques. Il pourrait être intéressant d'utiliser [un type d'algorithme quantique], mais je pense qu'on pourrait aussi utiliser [un autre type d'algorithme].*

⁴² Traduction personnelle depuis : « Chercheuse : so actually there is a bit of a speedup here, because in a line so quantum takes d but classical it takes d squared. - Chercheur : forward but not for the all algorithm. - Chercheuse : Oh because you mean they send by both directions. Yeah I see what you mean. ».

Doctorant : *Oui, je suis peut-être trop optimiste. [...] mais je dirais que le sens quantique devrait se comporter mieux en fait.*

Chercheur : *Donc nous pourrions peut-être examiner cette piste. »*⁴³

Discussion au tableau entre un doctorant et son directeur de thèse en informatique
quantique (Observation du 03/12/2024)

Dans cette scène, le chercheur propose explicitement de s'inspirer des méthodes utilisées dans un article scientifique où ils obtiennent une accélération par rapport au classique. Le doctorant insiste pour connaître l'avantage concret par rapport au classique. Étant donné que son propre système diffère de celui présenté dans l'article, il émet une réserve, mais estime que *l'accélération* devrait se manifester. Cette hypothèse oriente dès lors son travail vers les méthodes décrites dans la publication recommandée. Ces deux observations et ce séminaire illustrent la place centrale qu'occupe l'avantage théorique des algorithmes quantiques dans le domaine. Les scientifiques semblent conscients de ce ressort, comme j'ai pu le constater lors de mes entretiens où plusieurs ont évoqué explicitement leur objectif de démontrer une supériorité théorique sur les algorithmes classiques. Par exemple, l'un des chercheurs de l'IRIF a notamment décrit cette dynamique comme un « jeu du chat et de la souris », où les avancées en informatique quantique suscitent en retour des optimisations d'algorithmes classiques, relançant ainsi la course à l'avantage quantique :

« *Il y a eu un jeu du chat et de la souris qui continue maintenant : chaque fois que quelqu'un dit « il y a un avantage quantique », il y a une autre personne qui dit « en fait non, je sais faire et l'avantage n'était pas aussi élevé que tu le pensais ». »*

Chercheur informatique quantique à l'IRIF pour décrire le fonctionnement de
recherche en informatique quantique (Entretien du 28/11/2024)

L'avantage offert par certains algorithmes quantiques constitue le cœur des promesses associées à l'ordinateur quantique lorsqu'elles sont diffusées. Toutefois, traduire cet avantage en termes de complexité algorithmique pour des publics non scientifiques n'est pas

⁴³ Traduction personnelle depuis « Chercheur : Here in the Montanaro Zoo paper apparently they also consider this sort of sublet Hamming weight. [...] - Doctorant : And do they manage to...? - Chercheur: you got some... quantum speedups. it might be interesting to use QAOA but I guess you could probably use adiabatique as well. – Doctorant : yeah okay maybe I'm being too optimistic [...] but I would say that quantum meaning should behave better actually. – Chercheur : so we could maybe look at that ».

une tâche aisée. J'ai observé cette difficulté lors d'une séance de travail au Palais de la Découverte, où une chercheuse en informatique quantique collaborait avec deux médiatrices pour concevoir un *escape game*, le dispositif que j'ai présenté en ouverture du mémoire. Les médiatrices souhaitaient immerger le public dans l'univers de l'informatique et de la physique quantique à travers un jeu d'énigmes, invitant les participants à lire des panneaux, manipuler des objets et échanger entre eux.

Au cours de cette réunion, elles cherchaient à valider certaines formulations auprès de la chercheuse, un processus révélateur des opérations de traduction de l'avantage quantique. La discussion s'est concentrée sur un « panneau », une grande affiche intitulée « Ordinateur quantique » (voir *figure II*) qui serait placée au cœur de la salle de jeu. Ce panneau expose explicitement la question de la possible « disparition de l'ordinateur classique », laissant ainsi entendre que l'ordinateur quantique pourrait rendre obsolète le calcul traditionnel. Il précise, dans le texte qui suit, la question que l'avantage quantique ne se manifeste que dans certains cas et que l'ordinateur classique n'est pas menacé de disparition en général.

L'objectif, comme l'a souligné l'une des médiatrices pendant la réunion, était de faire comprendre au public les types de problèmes que les ordinateurs quantiques peuvent résoudre. Cette médiation traduit les promesses scientifiques pour les visiteurs et visiteuses du palais. La chercheuse a alors émis des réserves sur le libellé initial, ce qui a conduit la médiatrice à annoter le panneau en direct, cherchant une formulation qui satisferait l'exigence de validité scientifique et l'exigence de clarté nécessaire pour captiver un public. Cette interaction illustre la négociation entre exactitude scientifique et simplification pédagogique, et renseigne sur l'objet de l'avantage quantique lorsqu'il est envisagé comme une activité de dissémination.

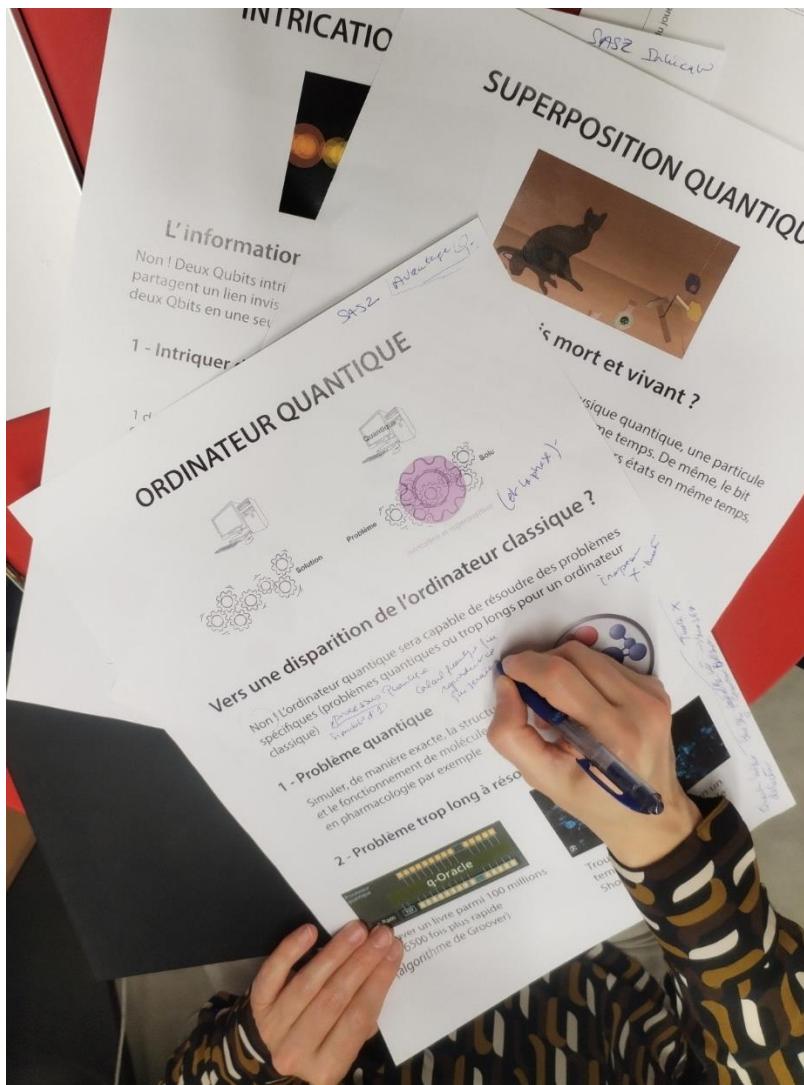


Figure II : photo prise pendant l'observation d'une réunion entre deux médiatrices et une chercheuse en informatique fondamentale pour la construction d'un escape game. La médiatrice présente et annote le panneau introduisant l'ordinateur quantique au public.

Les problèmes spécifiques de l'ordinateur quantique précisés par le panneau sont de deux types : des « problèmes quantiques » et des problèmes trop longs à résoudre pour un ordinateur classique. La discussion qui suit vise à préciser ces deux thématiques :

« Chercheuse : *Est-ce que je peux lire pour valider ? Je ne sais pas si c'est qu'un problème quantique.*

Médiatrice : *Moi non plus.*

Chercheuse : *En fait, ça, moi, je ne valide pas. »*

Une chercheuse en informatique fondamentale et deux médiatrices affiliées au Palais de la Découverte, dont une seule prend la parole lors de cette séquence, en réunion dans le

bureau de la chercheuse pour discuter d'un atelier de médiation
(Observation du 06/12/2024)

La chercheuse commence par remettre en question la formulation « problème quantique », qui ne renvoie à aucune notion académique précise. La médiatrice reconnaît qu'elle cherche une formulation adéquate et elles vont alors collaborer pour trouver une formulation plus précise :

« Chercheuse : *Du moment que c'est un processus qui est naturellement quantique ?*

Médiatrice : *Oui, c'est ça. Alors, à la base de problèmes quantiques, un processus naturellement quantique ?*

Chercheuse : *Un processus quantique, oui. Simulation de processus quantique.*

Médiatrice : *Oui.*

Chercheuse : *Plutôt que de le simuler dans ta molécule, tu fais un calcul quantique qui reproduise ce qui serait passé sur ta molécule. Mais tu ne peux pas dire que ça va résoudre des problèmes trop longs pour un ordinateur classique. Ce n'est pas forcément vrai. »*

Une chercheuse en informatique fondamentale et deux médiatrices affiliées au Palais de la Découverte, dont une seule prend la parole lors de cette séquence, en réunion dans le bureau de la chercheuse pour discuter d'un atelier de médiation

(Observation du 06/12/2024)

La chercheuse propose des formulations (« processus naturellement quantique », « simulation de processus quantique ») qui sont répétées par la médiatrice et inscrites à la main sur le panneau pour conserver une trace de ces propositions et pouvoir les reprendre plus tard. Cette séquence de validation mutuelle constitue typiquement un échange en *paires adjacentes*, concept introduit par Sacks et ses collègues (1974)⁴⁴ pour l'analyse conversationnelle, où chaque *tour de parole* (c'est-à-dire de prise de parole d'un locuteur) est à la fois réponse à l'énoncé précédent et amorce du suivant. Chaque *tour de parole* répond en deux parties à deux objectifs distincts : il constitue d'abord une *seconde partie de paire* en apportant une réponse à l'intervention précédente, puis agit comme une *première partie*

⁴⁴ Sacks, Harvey, Emanuel Schegloff, et Gail Jefferson, « A Simple Systematic for the Organisation of Turn Taking in Conversation ». *Language*, 1974, 50: 696-735. <https://doi.org/10.2307/412243>.

de paire en ouvrant un nouvel échange qui appelle une réponse. Ici, la chercheuse amorce une première paire en posant la question « processus qui est naturellement quantique ? ». Elle propose une formulation susceptible de figurer sur le panneau, à laquelle la médiatrice répond en deuxième partie de paire « oui, c'est ça », validant l'expression. Pour vérifier, la médiatrice inaugure une nouvelle paire en répétant la formulation auprès de la chercheuse, qui valide à son tour en deuxième partie de paire. Ces paires adjacentes de validation jalonnent toute cette discussion et ce travail de réunion : elles constituent le processus de traduction que je soulignais plus tôt. Cette traduction dépasse le cadre de la réunion car la médiatrice avait déjà amorcé cette transformation en rédigeant un panneau préliminaire.

Dans son dernier tour de parole, la chercheuse aborde ensuite l'autre type de problème quantique offrant un avantage. La médiatrice réagit par surprise et invite la chercheuse à s'expliquer :

« Médiatrice : *Le truc du cryptage, ce n'est pas quand même là-dessus ?*

Chercheuse : *Il se trouve que le problème a une structure qu'on arrive à résoudre avec les outils quantiques. Mais ce n'est pas parce que c'est moins efficace classiquement qu'on va pouvoir le résoudre plus efficacement quantiquement. Mais c'est juste que c'est intéressant. Seulement, si ton ordinateur classique réussit à le résoudre efficacement, tu n'as aucun intérêt à construire une méga-machine qui coûte des millions et qui n'est pas stable et qu'il faut refroidir. Bref, autant le faire sur un ordinateur classique. Mais tu as des problèmes dont la nature est très particulière et qui ne se trouvent qu'après des décennies de recherche, on arrive à faire quelque chose qu'on ne sait pas faire classiquement.*

Médiatrice : *Certains disent qu'on ne sait pas encore faire classiquement. Et toi, tu dis qu'on ne saura jamais faire classiquement.*

Chercheuse : *Ça, ça reste à voir. »*

Une chercheuse en informatique fondamentale et deux médiatrices affiliées au Palais de la Découverte, dont une seule prend la parole lors de cette séquence, en réunion dans le bureau de la chercheuse pour discuter d'un atelier de médiation

(Observation du 06/12/2024)

La médiatrice propose l'exemple qu'elle a en tête, ce qui amène la chercheuse à expliquer en quoi la métrique du temps de calcul n'est pas suffisante. Ce type de discussion, où la chercheuse propose une explication à la médiatrice, est revenu plusieurs fois au cours de la

réunion. Il se caractérise par de longues prises de parole pendant lesquelles la chercheuse utilise ses propres concepts pour définir un phénomène. Ici, elle introduit la notion de « structure » ou de « nature » du problème. Ce terme fait référence aux classes de problèmes, qui permettent de généraliser des algorithmes et leurs propriétés, comme la complexité. Si un algorithme quantique affiche une complexité avantageuse par rapport à tous les algorithmes classiques résolvant un problème, alors il présente un avantage pour l'ensemble de cette classe de problèmes, ou pour tous les problèmes de même « structure ».

Ainsi, ce n'est pas simplement parce qu'un ordinateur classique est lent qu'un algorithme quantique peut être plus rapide. Seuls certains problèmes, qu'ils soient rapides ou lents à résoudre classiquement, peuvent être résolus rapidement en quantique. Parmi ces problèmes, seuls ceux qui sont lents à résoudre en classique sont intéressants en quantique, car si un problème est déjà rapide à traiter, un ordinateur quantique encore en développement n'apporte pas de bénéfices. En opérant cette distinction entre la vitesse de calcul et les problèmes spécifiques, la chercheuse replace la notion d'avantage comme un arbitrage entre vitesse de calcul et problèmes particuliers qui font exister l'avantage.

La formulation des promesses d'applications rend alors explicite que l'avantage quantique ne s'applique qu'à des problèmes spécifiques. Les promesses sont alors accordées aux attentes de la médiatrice, qui recherche des exemples concrets à présenter au public plutôt que des concepts théoriques abstraits. La chercheuse et la médiatrice explorent de nombreuses applications pour caractériser celles qui constituent ou non un avantage. Après plusieurs étapes de questionnements de la part de la médiatrice, elles parviennent enfin à une nouvelle formulation :

« Médiatrice : *Donc, problème de nature quantique. Et à la limite, je ne mettrais rien d'autre là.*

Chercheuse : *Parfait. Moi, je dirais ça.*

Médiatrice : *Mais du coup...*

Chercheuse : *Mais il y a d'autres choses qu'on sait faire, mais c'est toujours sous conditions... Ce sont des problèmes qui sont assez algébriques ou assez... Un problème de factorisation, par exemple, tu peux dire, plutôt que problème...*

Médiatrice : *Donc, ce n'est pas trop long, c'est mathématique.*

Chercheuse : *Avec une structure mathématique très particulière.*

Médiatrice : *Problème mathématique particulier.*

Chercheuse : *Oui, il y a des applications. Il y a beaucoup de gens qui font de l'optimisation, des applications type apprentissage, etc. Donc, il y a des applications véritables. »*

Une chercheuse en informatique fondamentale et deux médiatrices affiliées au Palais de la Découverte, dont une seule prend la parole lors de cette séquence, en réunion dans le bureau de la chercheuse pour discuter d'un atelier de médiation

(Observation du 06/12/2024)

La médiatrice reprend la formulation qu'elles avaient confirmée ensemble auparavant et qui avait à nouveau été confirmée par la chercheuse. Le mécanisme de formulation-validation reprend alors, où la chercheuse essaie de proposer le terme de « factorisation », qui est une application concrète de l'ordinateur quantique. La médiatrice énonce alors à nouveau le déplacement qu'a tenté d'opérer la chercheuse : « *ce n'est pas trop long, c'est mathématique* ». Dans la paire suivante, la chercheuse reformule à nouveau, ce qui est traduit par l'inscription sur l'affiche en « Problème mathématique particulier ». La chercheuse précise alors que ces problèmes renvoient à un ensemble d'applications. La médiatrice interroge ensuite la chercheuse sur ces applications pour travailler encore la formulation des promesses de l'ordinateur quantique. L'avantage quantique est mis en promesse en cherchant son opérationnalisation dans des applications, des problèmes concrets. À l'occasion d'une dernière discussion, l'inscription sera finalement traduite par la médiatrice en « *problèmes de recherche, voilà ! Ça, ça me plaît mieux, parce que c'est plus concret que "mathématique particulier"* ». »

Le résultat scientifique de l'avantage quantique est au centre des recherche en informatique quantique. Cet avantage porte sur des algorithmes et repose sur le critère de complexité algorithmique. Pourtant, il se transforme en promesse dès qu'il quitte la sphère scientifique. En analysant cet épisode de médiation, j'ai montré comment ces opérations de traduction étaient réalisées et s'appuyaient sur des mécanismes interactionnels faisant circuler des concepts et déplaçant les définitions. En se focalisant sur les applications, les participants articulent deux perspectives pour produire les énoncés sur le poster : d'un côté, la perspective théorique, qui lie l'avantage quantique à des classes spécifiques de problèmes ; de l'autre, une approche plus concrète, centrée sur la médiation par des exemples et des cas d'usage.

Débats scientifiques sur les algorithmes quantiques « réellement » avantageux dans le futur

Pour mieux saisir ce qui se joue dans ces applications, il convient d'étudier les algorithmes qui présentent cet avantage quantique. Deux algorithmes sont souvent mobilisés pour discuter des avantages de l'ordinateur quantique : l'algorithme de Shor et l'algorithme de Grover.

L'algorithme de Shor a été publié par Peter Shor en 1994⁴⁵ alors qu'il était aux Bell Labs, laboratoires de recherche appartenant à la firme AT&T. Cet algorithme donne les instructions pour factoriser⁴⁶ des nombres *exponentiellement plus vite* que ses homologues classiques. Plus le nombre à factoriser est grand, plus le nombre d'étapes nécessaires (donc la complexité) augmente. Cette croissance des étapes est exponentiellement moins rapide pour l'algorithme quantique que pour l'algorithme classique. L'algorithme de Shor répond au problème de factorisation qui est reconnu pour ses applications en cryptographie pour déchiffrer des messages codés et fut le premier algorithme établi avec un avantage exponentiel par rapport au classique. Il était historiquement le premier algorithme quantique à trouver une application directe et a participé à intéresser de nombreux acteurs industriels et étatiques.

Cet enrôlement des acteurs est également passé par la perception de cet algorithme comme une menace, présentant l'algorithme de Shor comme capable théoriquement, s'il est exécuté rapidement, de déchiffrer des messages cryptés. Dès 1994, Gilles Brassard (cryptographe à l'Université de Montréal) attira l'attention de la communauté sur cette rupture, notamment dans un article scientifique intitulé « Quantum computing: the end of classical cryptography? »⁴⁷, alors que l'article de Shor n'était pas encore formellement publié. En

⁴⁵ Shor, Peter W., « Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring. », *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 1994, 124–34. <https://doi.org/10.1109/SFCS.1994.365700>.

⁴⁶ La factorisation consiste à déterminer, pour un nombre entier, l'ensemble des nombres premiers dont la multiplication donne ce même nombre entier. Il s'agit d'un problème très utilisé en cryptographie. Voir Anonymes, *Décomposition en produit de facteurs premiers*, https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9composition_en_produit_de_facteurs_premiers, 2010, consulté le 01/06/2025.

⁴⁷ Brassard, Gilles, « Cryptology Column—Quantum Computing: The End of Classical Cryptography? » *SIGACT News*, 1994, 25 (4): 15–21.

2014, le Washington Post présente un document de la National Security Agency (NSA) dévoilant un projet de recherche de près de 79,7 millions de dollars pour développer un ordinateur quantique capable d'espionner des communications chiffrées des entreprises et des États par l'algorithme de Shor. Le National Institute of Standards and Technology (NIST), agence de standardisation des États-Unis, publie ensuite un rapport en 2016⁴⁸ présentant l'ordinateur quantique comme une menace effective à partir de 2030, et entame un concours pour définir des algorithmes capables de résister aux attaques d'ordinateurs quantiques. Plusieurs États considèrent l'algorithme de Shor comme une menace, comme l'agence de cybersécurité de l'Union Européenne qui publie elle aussi un rapport (2021)⁴⁹ pour préparer l'avènement de l'ordinateur quantique. La promesse d'application de l'algorithme de Shor est ici en partie négative. Comme le précise Joly (2010), ce type de promesse se fonde sur l'urgence et légitime leur objet par le risque qu'elle pose. Elle enrôle largement des acteurs et parvient à atteindre et engager l'État américain ou l'Union Européenne.

Le deuxième algorithme, dit algorithme de Grover, a été identifié en 1996⁵⁰. Il permet de chercher dans une liste un ou plusieurs éléments qui vérifient une condition spécifique. Le gain correspond à une amélioration quadratique : la complexité de l'algorithme quantique croît proportionnellement au carré du nombre d'étapes, alors que celle de l'algorithme classique est linéaire. Il peut être décliné sur certains problèmes d'optimisation. Ces deux algorithmes, illustrés sous forme d'équations sur la diapositive projetée lors d'un séminaire de master (*figure I*), mettent en évidence les gains de complexité.

Toutefois, l'avantage en complexité de ces algorithmes ne fait pas toujours consensus dans la justification des promesses de l'ordinateur quantique. Comme l'expliquait le chercheur,

⁴⁸ Chen, Lily, Stephen Jordan, Yi-Kai Liu, Dustin Moody, Rene Peralta, Ray Perlner, Daniel SmithTone, « Report on Post-Quantum Cryptography », *NIST publications*, 2016. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/NIST.IR.8105.pdf>, consulté le 30/05/2025.

⁴⁹ ENISA, « POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHY : Current state and quantum mitigation », <https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/publications/ENISA%20Report%20-%20Post-Quantum%20Cryptography%20Current%20state%20and%20quantum%20mitigation-V2.pdf>, 2021, consulté le 08/06/2025.

⁵⁰ Grover, Lov K., « [A fast quantum mechanical algorithm for database search](#) », *Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing*, 1996, 212.

son objectif est de trouver des algorithmes exponentiellement plus rapides que leurs homologues classiques, afin que l'avantage théorique se retrouve effectivement en pratique : « *Sur le papier, [l'algorithme de Grover] semble intéressant, mais en pratique, cela ne sera probablement jamais utilisé, parce que les frais généraux [dus à la construction de l'ordinateur, le passage du gain théorique au gain pratique] sont très importants, si vous n'avez que ce type d'accélération quadratique. Ensuite, l'algorithme de Shor vous donne des algorithmes pour la factorisation et [une autre application], et dans ce cas, nous avons vraiment une accélération exponentielle, donc cela semble vraiment prometteur.* »⁵¹

Chercheur en informatique quantique lors d'un séminaire devant des étudiants
en master de physique (Observation du 28/11/2024)

Montrer un simple avantage théorique ne suffirait donc pas : il faut qu'il soit suffisamment significatif pour compenser des contraintes liées à la mise en œuvre matérielle du modèle théorique de l'ordinateur quantique. Celles-ci incluent non seulement les coûts de construction, mais aussi les défis technologiques liés à la précision des composants et aux limites actuelles de fabrication. Un enquêté, engagé dans un projet d'installation d'un ordinateur quantique dans un centre de calcul haute performance (HPC)⁵², souligne par exemple les limites temporelles des qubits, qui ne fonctionnent qu'à une fréquence fixe, ce qui restreint leur rapidité face aux ordinateurs classiques dont les fréquences de fonctionnement ont été régulièrement optimisées grâce aux progrès technologiques.

Plusieurs enquêtés ont ainsi relativisé les gains non exponentiels attribués à l'ordinateur quantique. Ce doctorant d'une start-up qui construit un ordinateur quantique dénonce certaines médiations scientifiques sur l'avantage de l'ordinateur :

« *L'exemple classique, [pour] lequel on essaie un peu tout le temps de se battre, le premier exemple que les gens sortent quand ils parlent de l'ordinateur quantique, c'est le problème du voyageur de commerce. C'est le truc où tu dois te balader de ville en ville. Je ne sais pas si tu connais le problème. C'est un voyageur qui doit passer par 50 villes. Quel est le*

⁵¹ Traduction personnelle depuis « So on paper it looks nice, in practice probably it will never be used, because the overheads are very fluid, if you have just this kind of quadratic speedup. Then Shor's algorithm gives you algorithms for factoring and discrete log, and in that case we really have an exponential speedup, so this really looks promising. ».

⁵² Le calcul haute performance est une filière qui construit des ordinateurs puissants pour mener un nombre important de calcul. Ils utilisent pour cela des ordinateurs classiques, que j'appelle supercalculateur dans la suite. Ils ont de nombreuses applications industrielles, ce qui en fait un concurrent pour l'ordinateur quantique.

trajet le plus court pour passer par toutes les villes ? C'est un problème qui est super important en logistique. Mais l'avantage de l'ordinateur quantique là-dedans est très faible. Je crois que c'est juste en racine de n [n correspond au nombre d'étapes, ici la complexité que décrit le doctorant correspond à celle de l'algorithme de Grover]. Donc en gros, il faudrait vraiment un ordinateur quantique très avancé. En fait, les ordinateurs classiques ont été hyper optimisés. Donc c'est très dur depuis 60 ans, quand tu regardes les trucs avec tous les GPU. Donc battre un supercalculateur [ordinateur classique très puissant], si tu as juste un faible avantage théorique, c'est compliqué. »

Doctorant en troisième année de thèse dans une start-up française développant un ordinateur quantique (Entretien du 19/02/2025)

Ce doctorant questionne moins la validité théorique de ces gains que leur mise en œuvre : même si l'avantage existe théoriquement, il reste difficile à exploiter en pratique. Si l'écart de complexité entre classique et quantique ne se creuse qu'à un rythme lent, cet avantage ne devient significatif que sur de très grands problèmes, qui requièrent des ressources de calcul que les constructeurs d'ordinateurs quantiques ne maîtrisent pas encore, comme nous le verrons.

Les promesses d'applications de l'ordinateur quantique, fondées et crédibilisées sur des algorithmes censés offrir un avantage par rapport au calcul classique, sont ainsi remises en cause par certains scientifiques. Les débats portent principalement sur la tendance à généraliser l'avantage quantique à de très nombreuses problématiques sans tenir compte des degrés variés de bénéfice selon l'algorithme ou le problème, ni des difficultés de mise en œuvre sur des ordinateurs encore expérimentaux.

Cette asymétrie entre les avantages des algorithmes a des effets dans la production scientifique. Dans un article paru en octobre 2024⁵³, les auteurs issus d'une start-up de quantique et de divers laboratoires d'informatique et de physique démontrent qu'une manière d'agencer des qubits particuliers (appelés « qubits de chat ») permet de réduire le bruit et ainsi d'accélérer les calculs. À la fin de la discussion de l'article, les auteurs écrivent :

⁵³ Ruiz, Diego, Jérémie Guillaud, Anthony Leverrier, Mazyar Mirrahimi, et Christophe Vuillot. « LDPC-Cat Codes for Low-Overhead Quantum Computing in 2D ». *Nature Communications*, 2025, 16(1): 1040. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56298-8>.

*« Afin de quantifier la manière [dont une amélioration présentée dans l'article] réduit les besoins en ressources pour les algorithmes quantiques tolérants aux fautes, nous comparons notre architecture à [un autre système ayant fait l'objet d'une étude empirique de son avantage quantique] qui peut être utilisé pour factoriser [un type de nombre encodable sur 2048 bits et utilisé pour chiffrer des messages] en 4 jours en utilisant 350 000 qubits de chat. Nous estimons que, sous les mêmes hypothèses matérielles [...], les améliorations proposées dans cet article réduiraient ce nombre à moins de 100 000 qubits de chat et à 7 jours de calcul. »*⁵⁴

Cette partie cherche à illustrer l'avantage prouvé par la nouvelle architecture détaillée dans l'article. Pour cela, les auteurs comparent l'avantage de leur solution à celui d'autres architectures en mesurant le nombre de qubits de chat et le temps de calcul requis pour factoriser un nombre entier à l'aide de l'algorithme de Shor. Après avoir contacté l'un des auteurs, celui-ci soulève l'intérêt de ce type d'approche, fondée sur une étude de 2021⁵⁵ ayant déjà publié des résultats expérimentaux attestant l'avantage quantique d'une machine réelle. Les auteurs étendent alors ce travail à leur propre cas pour rendre davantage pratique l'avantage théorique que propose leur architecture. L'algorithme de Shor est ainsi utilisé à la fois comme promesse et comme mesure de l'avancée des recherches.

Après un échange avec l'un des auteurs, celui-ci met en lumière la pertinence de recourir à une approche s'appuyant sur une étude antérieure ayant déjà produit des résultats empiriques démontrant un avantage quantique sur une machine réelle. Les auteurs utilisent ces conclusions pour transposer cette preuve pratique à leur propre architecture, cherchant ainsi à matérialiser l'avantage théorique qu'ils proposent. L'algorithme de Shor devient alors à la fois un étalon de mesure de réussite et construit l'horizon d'attente pour toutes les recherches. En l'utilisant comme indicateur, les équipes orientent délibérément leurs choix technologiques et expérimentaux vers la réduction du temps de calcul et du nombre de qubits nécessaires à un cas d'usage concret. L'algorithme de Shor structure ainsi les

⁵⁴ *Ibid.* p. 6, traduction personnelle depuis « In order to quantify how the gains in memory reduce resources requirements for fault-tolerant quantum algorithms, we benchmark our architecture against the repetition cat code architecture which can be used to factorize RSA-2048 integers in 4 days using 350000 cat qubits. We estimate that, under the same hardware assumptions ($\kappa_1/\kappa_2 = 10^{-5}$), the improvements proposed in this paper would reduce this number to less than 100000 cat qubits, and 7 days of computation. ».

⁵⁵ Gidney, Craig et Martin Ekerå, « How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits », *arXiv*, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.09749>.

développements de l'ordinateur quantique : il n'est plus seulement la promesse d'un avantage futur, mais le critère même de l'avancée vers cet objectif et crédibilise tout en orientant les travaux de recherche.

En conclusion, il apparaît que les algorithmes jouent un rôle central dans la formulation et la crédibilisation des promesses associées à l'ordinateur quantique. C'est en comparant les complexités algorithmiques que les chercheurs ont forgé le concept d'avantage quantique, c'est-à-dire la capacité théorique à surpasser les performances des ordinateurs classiques sur certains problèmes. En généralisant cet avantage à toute une classe de problèmes d'optimisation ou de factorisation comme le permet le formalisme en informatique fondamentale, les promoteurs du quantique ont multiplié les usages promis. La conséquence est une prolifération des attentes : de l'industrie microélectronique à la cryptanalyse, en passant par la logistique ou la modélisation climatique, presque tous les secteurs semblent escompter un gain temporel grâce à l'ordinateur quantique.

Ensuite, nous avons vu que la quête de cet avantage théorique irrigue l'ensemble des pratiques de recherche, depuis les séminaires académiques jusqu'aux échanges informels au tableau. Les chercheurs et chercheuses utilisent la comparaison classique/quantique comme critère de choix méthodologique, orientant leurs publications et collaborations autour de la recherche d'algorithmes à accélération maximale. Et qu'elle se propage hors des laboratoires par un travail de traduction minutieux. L'exemple de la réunion de médiation scientifique au Palais de la Découverte illustre comment les concepts d'« avantage » et de « problème quantique » sont négociés, reformulés et adaptés pour traduire l'avantage quantique dans une autre sphère. Ce mouvement de va-et-vient entre formalisme scientifique et dispositifs de médiation révèle la circulation des promesses : elles ne restent pas confinées aux articles de recherche, mais se manifestent sur des panneaux pédagogiques, dans des jeux d'énigmes ou des discours de start-ups.

Enfin, les promesses d'un avantage quantique de l'ordinateur quantique restent hétérogènes par des débats scientifiques émergeant de la dimension théorique de l'anticipation de cet avantage. Les débats entre partisans d'une accélération exponentielle et défenseurs d'un gain « seulement » quadratique montrent que l'incertitude pousse la communauté à rechercher des preuves empiriques pour crédibiliser les attentes.

La suite de ce travail se concentrera sur ces expérimentations empiriques pour crédibiliser l'avantage quantique. À travers l'étude des prototypes d'ordinateur quantique développés en laboratoire et en industrie, je chercherai à identifier comment les promesses sont inscrites et formulées pour faire adhérer les acteurs tant scientifiques qu'industriels, financiers ou administratifs.

La circulation des promesses par les démonstrateurs et prototypes pour intéresser des acteurs et acquérir des ressources

Dans cette section, il s'agit de montrer comment, au-delà des discours et des publications théoriques, les promesses de l'ordinateur quantique s'incarnent et sont formulées par des *démonstrations* concrètes et des prototypes mis en avant par des acteurs scientifiques, industriels et financiers. Ces démonstrations, qu'il s'agisse de publications évaluées par les pairs ou de communiqués de presse relayés par des entreprises, dépassent le statut d'illustrations pour représenter des moments clés où se négocient à la fois la crédibilité des promesses et l'urgence à y investir. En reliant étroitement les résultats scientifiques et la communication d'entreprise, ces événements matérialisent une promesse d'avantage quantique tout en projetant un futur où quelques centaines de qubits suffiraient à dépasser les capacités classiques.

Pour comprendre cette dynamique, je m'intéresserai, après une brève description historique des développements empiriques de l'ordinateur quantique, à deux démonstrations de capacités d'ordinateurs quantiques. Le premier est une publication scientifique d'acteurs industriels ayant démontré un avantage à l'utilisation d'un ordinateur quantique pour anticiper les risques de défaut de crédit. Il s'agira de saisir les opérations scientifiques et rhétoriques mobilisées par les acteurs pour crédibiliser les promesses et engager à l'action. Ensuite, je reviendrai sur la controverse issue d'une publication de Google en 2019 annonçant avoir atteint la *suprématie quantique* (concept que je précise dans la suite et qui renvoie à la supériorité effective des ordinateurs quantiques sur les ordinateurs classiques), en exposant les parallèles avec les premiers cas et en étudiant les effets de cet évènement sur les promesses. À travers ces deux volets, je cherche à saisir comment les démonstrations suscitent, construisent et défont les attentes collectives autour de l'ordinateur quantique.

Un historique des développements de prototypes d'ordinateurs quantiques

Les découvertes d'algorithmes de Shor et Grover ont motivé de nombreuses recherches pour démontrer la faisabilité de qubits et exécuter ces algorithmes. Ces recherches ont d'abord lieu dans des laboratoires et sont très internationalisées. Juan Ignacio Cirac et Peter Zoller (tous deux de l'Université d'Innsbruck en Autriche à l'époque) proposaient dès 1995⁵⁶ d'employer des ions refroidis et piégés par des champs électromagnétiques pour réaliser les opérations logiques quantiques. Ces expériences fournissaient les premières preuves empiriques qu'il est possible de manipuler de petits groupes de qubits et d'entrevoir un ordinateur quantique primitif. John Preskill, physicien reconnu dans le champ à Caltech, rapporte, dans un article (2021)⁵⁷ sur l'histoire de l'ordinateur quantique, l'excitation qui régnait alors, malgré les doutes des pionniers expérimentaux comme Haroche, Unruh ou Landauer. À cette période, les laboratoires peinaient à conserver les qubits dans leur état sur de longues durées, ce qui altérait la fiabilité de l'information qui était manipulée. Serge Haroche et Jean-Michel Raimond⁵⁸ (Collège de France, ENS Ulm et Laboratoire Kastler Brossel), William Unruh⁵⁹ (Université de la Colombie Britannique au Canada) ou encore Rolf Landauer⁶⁰ (IBM Thomas J. Watson Research Center) pointaient dans leurs publications scientifiques, dès 1995-1996, ces nombreuses difficultés concrètes. Il était, selon eux impossible pour la physique de gérer assez de qubits suffisamment longtemps pour pouvoir effectuer des calculs. Ces débats scientifiques cristallisent l'incertitude de la faisabilité d'un tel ordinateur, en particulier auprès de la communauté des physiciens et des

⁵⁶ Cirac, Juan I., and Peter Zoller, « Quantum Computations with Cold Trapped Ions. » *Physical Review Letters*, 1995, 74 (20): 4091. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.4091>.

⁵⁷ Preskill, John, « Quantum Computing 40 Years Later », arXiv, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.10522>.

⁵⁸ Haroche, Serge, and Jean-Michel Raimond, « Quantum Computing: Dream or Nightmare? », *Physics Today*, 1996, 49 (8): 51–54. <https://doi.org/10.1063/1.881512>.

⁵⁹ Unruh, William G., « Maintaining Coherence in Quantum Computers. », *Physical Review A*, 1995, 51 (2): 992. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.51.992>.

⁶⁰ Landauer, Rolf, « Is Quantum Mechanics Useful? », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, 1995, 353 (1703): 367–76. <https://doi.org/10.1098/rsta.1995.0106>.

physiciennes qui dénoncent un jeu théorique de la part de la communauté d'informatique fondamentale sans possibilité empirique.

Cette histoire est largement dominée par des figures masculines, phénomène qui se retrouve tout au long du développement de l'informatique quantique. Ce constat s'inscrit dans une dynamique plus générale dont Nathan Ensmenger propose l'histoire dans *Making Programming Masculine* (2010)⁶¹, où il montre comment l'informatique, discipline féminine à ses débuts, s'est progressivement masculinisée. Ensmenger retrace la manière dont les actions mises en place par les acteurs de la filière pour professionnaliser le champ a valorisé des représentations masculines associées à la figure du « nerd » : capacités en mathématiques, amour de la technique et du bidouillage et peu sociable. Ces représentations ont orienté les politiques de recrutement dans l'industrie informatique, favorisant les profils masculins et écartant progressivement les femmes ou les reléguant aux tâches les moins prestigieuses. L'informatique quantique s'inscrivait dans cette continuité en émergeant des laboratoires pour asseoir sa crédibilité par l'académie, tout en recrutant dans de grandes universités américaines des profils majoritairement masculins. Le programme de recherche en lui-même mettait en avant la production théorique d'algorithmes et la modélisation mathématique, tout en s'écartant des considérations pratiques et matérielles du calcul. On peut envisager que cette orientation ait contribué à façonner l'informatique quantique autour de valeurs masculines héritées de la discipline, en privilégiant la théorisation abstraite et en nourrissant alors la controverse sur la faisabilité d'un ordinateur quantique.

Preskill raconte dans son article (2021) comment cette controverse se cristallisa autour de la question de la fiabilité du calcul quantique. En 1995, Peter Shor (toujours affilié aux Bell Labs) a travaillé à des solutions pour être moins dépendant du maintien de l'état des qubits dans le temps. Il proposa des protocoles de correction d'erreurs (codes de Shor, 1995)⁶² qui, théoriquement, permettraient de réduire cet effet. Quelques années plus tard, d'autres

⁶¹ Ensmenger, Nathan, « Making Programming Masculine », *Gender Codes: Why Women are Leaving Computing*, Thomas J. Misa. Wiley, 2010, 115–141. <https://doi.org/10.1002/9780470619926.ch6>.

⁶² Shor, Peter W., « Scheme for Reducing Decoherence in Quantum Computer Memory. », *Physical Review A*, 1995, 52 (4): R2493. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.52.R2493>.

chercheurs majeurs de la scène théorique comme Dorit Aharonov et Michael Ben-Or⁶³ (alors principalement aux États-Unis et en Israël), Emanuel Knill et Raymond Laflamme et Wojciech Zurek⁶⁴ (au Los Alamos National Laboratory), Alexei Kitaev⁶⁵ (travaillant à l’Institut de physique théorique de la Landau Institute en Russie, puis à Caltech) ou encore John Preskill⁶⁶ affinèrent cette approche. Ils ont alors démontré que, si un laboratoire parvenait à maintenir les taux d’erreur en dessous d’un certain seuil, il pourrait réaliser une mise à l’échelle de la taille de l’ordinateur quantique. Cette théorie de la correction d’erreur apaisa la crise en proposant une autre voie expérimentale : il ne s’agissait plus de réaliser un qubit très fiable, mais d’agencer plusieurs qubits pour compenser les erreurs. L’objectif de la majorité de la communauté scientifique devint alors d’augmenter progressivement le nombre de qubits. Les scientifiques encore sceptiques restent isolés mais toujours audibles sur le sujet, comme Gil Kalai, mathématicien et informaticien à l’Université hébraïque de Jérusalem, qui exprimait son point de vue sceptique dans plusieurs billets de blog et articles académiques, dont « How Quantum Computers Fail » (2011)⁶⁷. Kalai soutenait que des barrières fondamentales, liées à la physique ou aux propriétés des erreurs des qubits, empêchaient une correction efficace au-delà d’un certain nombre de qubits.

Le passage du tournant des années 1990 à celui des années 2000 voit l’informatique quantique franchir un nouveau seuil : les premières expériences concrètes à deux ou trois qubits, réalisées notamment avec des systèmes de résonance magnétique nucléaire (NMR) et d’ions piégés, prouvent qu’il est possible de manipuler physiquement des bits quantiques sur de courtes séquences de calcul. Des groupes comme ceux d’Isaac Chuang, Neil

⁶³ Aharonov, Dorit, and Michael Ben-Or, « Fault-Tolerant Quantum Computation with Constant Error. », *Proceedings of the Twenty-Ninth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 1997, 176–188. ACM. <https://doi.org/10.1137/S0097539799359385>.

⁶⁴ Knill, Emanuel, Raymond Laflamme, and Wojciech H. Zurek., « Resilient Quantum Computation. », *Science*, 1998, 279 (5349): 342–45. <https://doi.org/10.1126/science.279.5349.342>.

⁶⁵ Kitaev, Aleksei Yur’evich, « Quantum Computations: Algorithms and Error Correction. », *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*, 1997, 52 (6): 53–112. <https://doi.org/10.1070/RM1997v05n06ABEH002155>.

⁶⁶ Preskill, John, « Reliable Quantum Computers. », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454 (1969): 385–410. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0167>.

⁶⁷ Kalai, Gil., « How Quantum Computers Fail: Quantum Codes, Correlations in Physical Systems, and Noise Accumulation. », *arXiv*, 2011. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1106.0485>.

Gershenfeld⁶⁸ ou de Rainer Blatt⁶⁹ (Université d’Innsbruck) contribuent à ces avancées. Ces avancées scientifiques se traduisent par des articles mais aussi des dispositifs expérimentaux, de premiers prototypes d’ordinateur dont les capacités sont présentées sous la forme d’articles ou de conférences scientifiques.

Des laboratoires et entreprises se mirent à augmenter progressivement le nombre de qubits de leurs ordinateurs. Leur objectif était non plus de démontrer la faisabilité de l’ordinateur, mais de démontrer l’avantage quantique des algorithmes. La start-up D-Wave, première start-up développant un ordinateur quantique, est lancée en 1999 aux États-Unis. Ses ordinateurs furent questionnés par des chercheurs et entreprises du secteur qui testèrent une machine sans pouvoir confirmer l’avantage quantique (Troels et al., 2014)⁷⁰. Les difficultés expérimentales pour augmenter le nombre de qubits rapidement empêchaient la démonstration de cet avantage. Progressivement, de grandes entreprises américaines comme IBM, Google ou Intel développèrent leur propre ordinateur quantique, mis à disposition par le cloud en 2016 par IBM, année où Microsoft annonçait que l’ordinateur quantique devenait la priorité de l’entreprise⁷¹.

Dans le même temps, de nombreuses start-ups se lancèrent dès 2015⁷² dans le monde entier et cherchaient à construire un ordinateur quantique. Aujourd’hui, en France, cinq start-ups lancées entre 2017 et 2021 développent leur ordinateur quantique. Chacune lève des fonds, fait des annonces sur sa roadmap et sur la temporalité dans laquelle elle arrivera à produire un ordinateur quantique assez puissant pour démontrer de l’avantage quantique. La presse

⁶⁸ Chuang, Isaac L., Neil Gershenfeld, and Mark Kubinec, « Experimental Implementation of Fast Quantum Searching. » *Physical Review Letters*, 1998, 80 (15): 3408–11. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.3408>.

⁶⁹ Häffner, H., W. Hänsel, C. Roos, et al., « Scalable Multiparticle Entanglement of Trapped Ions. », *Nature*, 2005, 438: 643–46. <https://doi.org/10.1038/nature04279>.

⁷⁰ Troels F. Rønnow, Zhihui Wang, Joshua Job et Sergio Boixo, « Defining and detecting quantum speedup », *Science*, 2014, 345(6195): 420–424.

⁷¹ Shah, Agam, « L’informatique quantique en tête des priorités de Microsoft », *Le Monde Informatique*, 2016, <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-l-informatique-quantique-en-tete-des-priorites-de-microsoft-66581.html>, consulté le 30/05/2025.

⁷² Chiavarini, Lorenzo, Dealroom research et Felix Ullmer, « Global Quantum Computing startups », 2025, <https://app.dealroom.co/lists/36190/list>, consulté le 30/05/2025, présentent dans un tableau plus de 300 start-ups du secteur quantique, parmi lesquelles celles-ci se sont lancées pour construire un ordinateur quantique : Quantum Circuit (2015), PsiQuantum (2016), Xanadu (2016), Photonic (2016), Riverlane (2016), Quantum Motion (2017) et Quandela (2017).

grand public se fait le relais des financements obtenus, des programmes d’accompagnement et des livraisons des ordinateurs quantiques de ces acteurs en France, qui apparaissent comme les futurs producteurs d’ordinateurs. Les prototypes et les publications se multiplient pour démontrer l’intérêt de cette technologie et faire circuler les promesses dans des sphères dépassant le milieu académique.

Le cas d'une démonstration de l'ordinateur quantique pour le secteur bancaire

Les promesses de l’informatique quantique reposent sur des algorithmes quantiques présentant un avantage théorique par rapport aux ordinateurs classiques. De nombreux acteurs scientifiques, industriels et financiers se fondent sur les prototypes d’ordinateur quantique pour valider l’avantage quantique promis par les promoteurs de l’innovation quantique. En France, ces prototypes relèvent pour la plupart de projets de recherche, mis en œuvre par des start-ups qui s’allient à divers acteurs étatiques, scientifiques et industriels pour proposer des preuves de concept dans lesquelles l’ordinateur est construit et testé. L’enjeu de crédibiliser cet avantage théorique se traduit par plusieurs activités de démonstration, telles que théorisées par Rosenthal (2019). Il y décrit les dynamiques rhétoriques et matérielles qui mobilisent un public afin de l’impliquer, et montre comment ces démonstrations influencent le développement des acteurs qui les présentent. L’objectif de cette section est d’illustrer des dynamiques similaires à travers quelques démonstrations d’ordinateurs quantiques, en France et à l’international, afin de comprendre leur rôle dans le développement technologique et la circulation des promesses.

Lorsque je demande à un *partner* d’un fonds d’investissement dans des entreprises développant des technologies quantiques de m’expliquer par quels moyens il estime « *un horizon de temps de 3 à 5 ans pour les premières utilisations [d’ordinateurs quantiques] dans le quotidien des entreprises, et puis plutôt 5 à 10 ans pour une généralisation de l’utilisation* », il m’explique qu’il s’agit d’une dynamique visible dans les entreprises dans lesquelles il investit. Je demande des détails et il mobilise alors une démonstration réalisée par la start-up française Pasqal qui construit un ordinateur quantique : « *Prenons l’exemple du Crédit Agricole [une banque française]. Pasqal a mené avec le Crédit Agricole en 2021 un pilote sur l’anticipation des défauts de crédit, donc les clients qui vont faire défaut. Aujourd’hui, le Crédit Agricole a des machines pour calculer cela. Ils le font de façon classique. Ils ont testé la possibilité de le faire avec un ordinateur quantique.*

Le résultat était qu'on fait aussi bien avec la machine Pasqal à 100 qubits que nos meilleurs calculs classiques. L'article a été publié, il a été revu [par les pairs], donc c'est un travail sérieux. Et c'était il y a deux ans sur une machine de 100 qubits. Donc le Crédit Agricole pense que lorsqu'ils feront tourner ce même cas d'usage sur une machine à 200 qubits, probablement qu'ils arriveront à être meilleurs [que leurs ordinateurs classiques]. Lancer ce type de cas d'usage prend 9-12 mois pour être traité correctement. C'est pour ça que je dis qu'on a déjà quelques sujets candidats à cet avantage quantique. »

Partner d'un fonds d'investissement français spécialisé dans les technologies quantiques

(Entretien du 18/04/2025)

Ce projet étonne par ses multiples dimensions. Il s'agit d'un projet de recherche car il donne lieu à une publication scientifique (2023)⁷³ incluant des partenaires privés français (Pasqal, Crédit Agricole) et espagnols (Multivers computing, entreprise de logiciel dans le quantique, ou encore Donostia International Physics Center, fondation de recherche privée). Cet article combine un algorithme quantique avec des algorithmes classiques d'apprentissage automatique pour évaluer le risque de défaut de crédit. Il annonce dans son abstract :

*« Nos performances sont compétitives par rapport à l'état de l'art des [méthodes de calcul classique actuelles], tandis que notre modèle offre une meilleure interprétabilité et des temps d'apprentissage comparables. »*⁷⁴

Il est intéressant de remarquer que cette publication ne cherche pas tant à démontrer la supériorité des algorithmes quantiques sur leurs homologues classiques qu'à montrer que leur combinaison peut produire des résultats équivalents à ceux obtenus par des méthodes entièrement classiques. Les notions de performance et de temps de calcul évoquent la promesse d'un avantage en complexité, mais la solution quantique y reste fortement imbriquée avec des méthodes classiques. Je n'ai rencontré personne lors de mon terrain pour

⁷³ Leclerc, Lucas, Luis Ortiz-Guitierrez, Sebastián Grijalva, Boris Albrecht, Julia R. K. Cline, Vincent E. Elfving, Adrien Signoles, Loïc Henriet, Gianni del Bimbo, Usman Ayub Sheikh, Maitree Shah, Luc Andrea, Faysal Ishtiaq, Andoni Duarte, Samuel Mugel, Irene Cáceres, Michel Kurek, Román Orús, Achraf Seddik, Oumaima Hammammi, Hacene Isselnane and Didier M'tamon, « Financial Risk Management on a Neutral Atom Quantum Processor.», *Physical Review Research*, 2023, 5: 043117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.5.043117>.

⁷⁴ *Ibid.* p.1, traduction personnelle de « We report performance that is competitive with the state-of-the-art random forest benchmark, whereas our model achieves better interpretability and comparable training times ».

soutenir que l'ordinateur quantique pourrait se développer et trouver des applications sans intégration dans des architectures classiques.

La publication énonce une équivalence entre les résultats avec et sans ordinateur quantique, ce que le *partner* m'expliquait, mais elle soutient également dans le corps du texte l'évolution des résultats avec l'augmentation du nombre de qubits disponibles sur la machine :

« *À l'avenir, les améliorations matérielles en termes de nombre de qubits conduiront à des améliorations de performance. Ce comportement est illustré à la figure 8 [dans ce mémoire vous la trouvez en figure 2], où nous montrons comment la précision des classificateurs quantiques [type d'algorithmes quantiques] évolue avec [le nombre de qubits]. En extrapolant ces résultats et en maintenant les autres facteurs constants, les classificateurs quantiques proposés pourraient surpasser le modèle de référence en l'espace de quelques centaines de qubits adressables.* »⁷⁵

L'article présente donc à l'aide d'une figure (présentée en *figure III*) que l'avantage quantique pourrait apparaître avec l'augmentation du nombre de qubits. La publication anticipe donc à quelques centaines de qubit la frontière de développement entre un ordinateur quantique concurrent avec un ordinateur classique pour ce cas d'usage.

⁷⁵ *Ibid.* p. 11, traduction personnelle de « Going forward, hardware upgrades in terms of qubit numbers will lead to performance improvements. This behavior is illustrated in Fig. 8, where we show how the precision of the quantum classifiers evolves with system size. Extrapolating from these results and keeping other factors constant, the proposed quantum classifiers could outperform the benchmarked model within a few hundred addressable qubits. ».

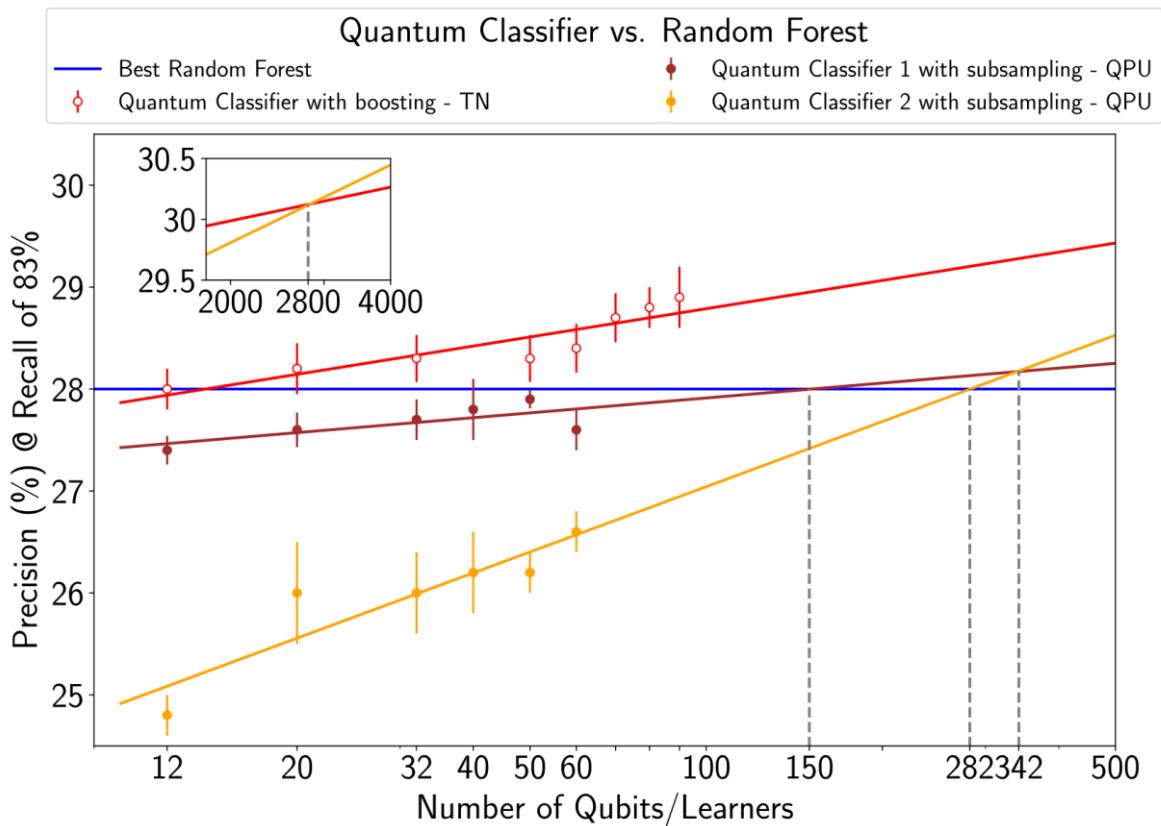


Figure III : figure extraite de l'article Leclerc et al. (2023), numérotée 8 dans l'article. La figure présente les résultats de l'article pour démontrer l'avantage des algorithmes quantiques face à un algorithme classique pour un cas d'usage d'évaluation du risque de défaut de crédit bancaire.

La *figure III* illustre ce que les auteurs appellent une « extrapolation » graphique des performances comparées des ordinateurs classiques et quantiques. Sur l'axe horizontal est indiqué le nombre de qubits disponibles sur la machine, tandis que l'axe vertical mesure la précision obtenue pour une tâche d'optimisation donnée. Parmi les courbes tracées, la ligne bleue représente la performance d'un ordinateur classique : ses résultats sont calculés à partir de paramètres jugés « optimaux » par les auteurs pour cet usage, et ils demeurent constants quel que soit le nombre de qubits (puisque il n'est constitué d'aucun qubit). Les points bruns représentent la précision atteinte par un algorithme quantique spécifiquement conçu pour tirer le meilleur parti du nombre de qubits disponibles. En jaune, les points montrent la précision d'un second algorithme quantique, choisi pour maximiser le gain à mesure que le nombre de qubits augmente : ce tracé se caractérise par une pente plus forte, qui traduit l'espoir d'une amélioration plus marquée avec davantage de ressources quantiques. Enfin, les points rouges représentent une simulation classique de ce qu'un algorithme quantique

idéal, dépourvu de tout bruit, pourrait produire : il joue le rôle d'étalement hypothétique, qui aide à visualiser l'écart entre la machine réelle et la performance théorique maximale.

Malgré la technicité du graphique dont je ne prétends pas avoir saisi toutes les subtilités, j'aimerais souligner qu'il ne s'agit pas d'un diagramme de performances neutre : c'est l'illustration même du choix méthodologique opéré par les auteurs pour défendre la promesse d'un avantage quantique. La proximité entre les points bruns (capacités de l'algorithme quantique réel pour différents nombres de qubits) et la droite bleue (référence des capacités optimales actuel d'un ordinateur classique) suggère que, jusqu'à un certain nombre de qubits, les méthodes quantiques atteignent déjà la même précision qu'un calcul classique lui-même optimisé. Ce diagramme, et la preuve qu'il soulève, est construit en sélectionnant des conditions « optimales » pour l'ordinateur classique, et en ajustant un algorithme quantique pour obtenir la précision maximale. Sans contester la rigueur méthodologique de cette publication, je peux néanmoins souligner que la figure est organisée de manière à montrer que l'ordinateur quantique peut rivaliser dès à présent avec son homologue classique.

Par ailleurs, ce graphique ne se contente pas de comparer les capacités existantes mais inclut aussi des droites de régression destinées à projeter leur évolution future, alimentant un horizon d'attente. Les capacités de l'algorithme classique sont représentées de manière figée dans le temps présent (une droite horizontale qui représente la précision actuelle du meilleur algorithme) sans considérer les éventuelles évolutions futures. À l'inverse, des lignes jaunes et brunes présentent les projections basées sur les mesures existantes (les points de couleur), visant à estimer l'évolution des performances quantiques avec un nombre croissant de qubits. Pour tracer ces droites, les auteurs prolongent la tendance observée sur un ensemble de mesures pour « prédir » que la précision quantique dépassera celle du calcul classique à 150 qubits (pour l'algorithme au profil de pente brune) et à 283 qubits (pour le profil jaune). Ces croisements sont mis en évidence par des lignes en pointillés, qui matérialisent un état particulier futur où les ordinateurs quantiques atteindront voire surpasseront les meilleures configurations classiques. Ces tracés en pointillés fabriquent l'horizon d'attente en représentant graphiquement un domaine où quelques centaines de qubits permettront enfin de réaliser un avantage tangible et qui se traduit dans le texte de l'article : « *les classificateurs quantiques proposés pourraient surpasser le modèle de référence en l'espace de quelques centaines de qubits adressables* ». En cherchant à tracer en pointillés les

croisements, les auteurs font prolonger ce graphique jusqu'à de grands nombres de qubits (2800 qubits dans la fenêtre superposée au graphique quand l'expérimentation a été réalisée sur 60 qubits maximum) qui cristallise les attentes des futurs développements de l'ordinateur quantique vers davantage de qubits pour dépasser les capacités classiques.

Ce geste de projection opéré par des scientifiques prolongeant des points de données existant rappelle le cas de la Loi de Moore analysé par Loeve (2015)⁷⁶. La loi de Moore est une promesse qui prend une énorme place dans la communauté de l'informatique. Loeve présente l'histoire de cette « loi » en présentant d'abord la mise en évidence de Gordon Earle Moore qui traça, en 1965, l'évolution du nombre de composants de calcul par puce dans les processeurs disponibles sur le marché en fonction de l'année de commercialisation de ces processeurs. Il traça alors une ligne droite et observa une croissance exponentielle du développement technologique des transistors. Moore extrapola ensuite ce comportement en un modèle prédictif qui anticipe la croissance exponentielle de la puissance de calcul sur 10 ans.

L'énoncé de la loi de Moore, comme l'explique Loeve, est repris par un ensemble d'acteurs pour finalement devenir une « loi » prédictive, à laquelle Loeve préfère mettre une majuscule pour mettre l'emphase sur la dimension légale construite et contraignante et diminuer son caractère de loi naturelle et prédictive. Car si la croissance exponentielle de la puissance des processeurs a effectivement eu lieu, Loeve démontre que cela est dû à la roadmap technologique des leaders mondiaux en la matière qui ont mis en œuvre les ressources nécessaires pour suivre cette prétendue loi. La dimension performative de la promesse est ici évidente.

Cette projection fait écho aux extrapolations mises en œuvre dans l'article publié par Pasqal, le Crédit Agricole et Multiverse Computing. Si les conditions dans lesquelles ont été réalisées cette anticipation quantifiée ne sont sans doute pas les mêmes, le geste de projection est semblable et caractérise la manière dont les scientifiques peuvent produire des futurs par leurs instruments de mesure et leurs données. Ces projections cherchent également à

⁷⁶ Loeve, Sacha, « La Loi de Moore : enquête critique sur l'économie d'une promesse », in Audéstat, Marc, *Sciences et technologies émergentes: pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Editions Hermann, 2015, 91-113.

convaincre et, comme la Loi de Moore, alimentent des promesses de développement de l'ordinateur quantique pour acquérir de nouvelles ressources.

Les éléments d'anticipation présentés dans cette publication permettent au *partner* du fonds d'investissement auquel je faisais référence en début de section d'identifier des horizons temporels précis, mais cette publication ne se limite pas à paraître dans une revue académique : elle est également promue par les acteurs qui y ont contribué. Ainsi, Pasqal met en ligne cet article sur son propre site, dans une section « Publications »⁷⁷ référençant ses travaux scientifiques. De son côté, le Crédit Agricole publie⁷⁸ sur son site un communiqué de presse conjoint⁷⁹ avec Pasqal et Multiverse Computing, diffusé sur son site institutionnel. Ce communiqué ne se contente pas de relayer les capacités actuelles de l'ordinateur quantique, il inscrit aussi, explicitement, une anticipation des développements futurs :

« L'objectif était double : de mesurer d'abord la capacité d'un ordinateur quantique à résoudre un problème concret, et ce dans l'état actuel de la technologie ; d'apprécier ensuite l'évolution de la performance des résultats avec le nombre de qubits utilisés [...] Dès 50 qubits, les résultats obtenus sont aussi précis que les résultats en production. Les projections indiquent que cette performance pourra être dépassée à partir de 300 qubits, puissance qui devrait être disponible industriellement en 2024. »

Ce communiqué reprend les principaux résultats de l'article scientifique sans reproduire les graphiques, et il met l'accent sur la projection temporelle : le franchissement du seuil des 300 qubits devient une promesse quantifiée et datée (« disponible industriellement en 2024 »). Or, ces prédictions n'apparaissent pas sous cette forme dans l'article publié : elles intègrent manifestement des informations complémentaires fournies par les auteurs ou par

⁷⁷ Pasqal, « Publications », <https://www.pasqal.com/publications>, consulté le 03/06/2025.

⁷⁸ Crédit Agricole, « Résultats concluants de deux expérimentations conduites en informatique quantique », 2023, <https://www.ca-cib.fr/fr/actualites/resultats-concluants-de-deux-experimentations-conduites-en-informatique-quantique>, consulté le 03/06/2025.

⁷⁹ Crédit Agricole, Pasqal, Multiverse Computing, « Informatique quantique : résultats concluants de 2 expérimentations conduites par Crédit Agricole CIB en partenariat avec Pasqal et Multiverse Computing sur des cas d'usage réels en finance », https://www.ca-cib.fr/sites/default/files/Communiqu%C3%A9%2520de%2520presse_Cre%25CC%2581dit%2520Agricole%2520CIB_Multiverse_Pasqal_26012023_0.pdf, consulté le 03/06/2023.

d'autres experts du projet. Le communiqué de presse articule les données empiriques et une projection jugée plausible par les partenaires, afin de dresser un horizon d'attente calibré par les organisations partenaires. Le communiqué intègre également le point de vue de divers acteurs impliqués dans l'opération. Par exemple, le président de Pasqal s'y exprime ainsi :

« C'est l'expérimentation la plus représentative jamais réalisée et qui lance une nouvelle ère pour le calcul quantique, avec les premiers comparatifs concrets. Un des résultats est que le point de bascule n'est pas si loin, sans doute moins de 2 ans, et qu'il est donc urgent pour les utilisateurs de s'approprier rapidement ces nouvelles méthodes, comme le fait Crédit Agricole CIB. »

Président de Pasqal issu du communiqué de presse du Crédit Agricole, de Pasqal et de Multiverse Computing de janvier 2023 exposant les résultats de leur expérimentation

Ce *verbatim* déploie plusieurs procédés rhétoriques qu'il s'agit d'identifier pour saisir leur rôle dans la circulation de la promesse. L'expérience présentée dans l'article est qualifiée par un superlatif « la plus représentative jamais réalisée » et un lexique de la rupture est omniprésent à travers « une nouvelle ère », « premiers comparatif », « point de bascule ». Le procédé vise à construire l'horizon d'attente et le situer dans le temps dans un futur proche. Cette promesse cherche à provoquer l'action de son lectorat mentionné par le terme « utilisateurs ». Ils doivent anticiper et se préparer. Le président articule ainsi la crédibilisation de la promesse réalisée par la publication (« représentatif », « comparatifs concrets », « résultat ») et sa légitimation en rapprochant le caractère d'urgence et l'actualité de démonstration. Le fait que cette preuve émerge aujourd'hui signifie que le quantique devient une priorité immédiate et qu'il faut agir sans délai. Ces éléments rhétoriques montrent le travail de cette démonstration qui n'a pas lieu que dans le laboratoire mais aussi dans la production discursive des acteurs qui se coordonnent autour de cette preuve. Les autres partenaires qui prennent la plume dans ce communiqué de presse relaient eux aussi la promesse en articulant sa crédibilité (mis en gras par moi-même) et sa légitimité par l'urgence et les impacts (souligné par moi-même) :

« Cette collaboration avec Crédit Agricole CIB, et Pasqal pour la partie quantique, a clairement démontré que le bénéfice économique, en utilisant des solutions inspirées du quantique et [solutions directement] quantiques, est possible dès maintenant. »

Directeur général de Multiverse Computing issu du communiqué de presse du Crédit Agricole, de Pasqal et de Multiverse Computing de janvier 2023 exposant les résultats de leur expérimentation

« *Ces 2 PoCs ont permis de montrer concrètement le potentiel et la réalité du calcul quantique pour la finance alors que les technologies du calcul quantique n'en sont qu'à leurs débuts. Nous avons profité de cette initiative pour commencer à développer les compétences internes en préparation à une rupture technologique qui, si elle se réalise, aura un impact direct et déterminant sur la compétitivité dans notre secteur.* »

Sponsor du projet au sein du Crédit Agricole issu du communiqué de presse du Crédit Agricole, de Pasqal et de Multiverse Computing de janvier 2023 exposant les résultats de leur expérimentation

Les énoncés combinent à la fois des marqueurs de crédibilité et de légitimité en soulevant l'urgence et les bienfaits des développements de la technologie pour les différents cas d'usage. Les démonstrateurs permettent de crédibiliser les promesses. Ces collaborations partenariales valorisent les résultats et leur donnent un écho dans d'autres espaces industriels et financiers. Raimbault (2023) décrit comment ces preuves de concept deviennent de nouveaux outils de crédibilité scientifique qui étendent davantage qu'ils ne remplacent le cycle de crédibilité scientifique décrit par Latour et Woolgar (1979). Dans ce cas-ci, la crédibilité de la publication scientifique est *traduite* dans un espace médiatique pour solliciter l'intérêt de l'auditoire sous la forme d'une *démonstration* (Rosenthal 2019). Cette sollicitation vise à intéresser de nouveaux acteurs industriels pour réaliser des partenariats, anticiper la montée en compétences, et ainsi réaliser de nouveaux projets de recherche, permettant de fermer le cycle de la crédibilité scientifique. La traduction de la crédibilité scientifique en crédits financiers passe par le *régime d'économie de la promesse* crédibilisant puis légitimant la mise à disposition des moyens humains, financiers, matériels et organisationnels pour le développement technologique.

Ce communiqué n'est pas l'unique vecteur de communication du projet. Une vidéo de 2023⁸⁰ est postée sur le compte YouTube du Crédit Agricole deux mois après la publication du communiqué de presse présente le projet. La vidéo dure quatre minutes et quatorze secondes

⁸⁰ Crédit Agricole, « Informatique quantique : Crédit Agricole CIB acteur français de référence sur la Finance », 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=4osJ3t0h0bw>, consulté le 03/06/2025.

et présente l'informatique quantique. Elle est montée de manière très dynamique avec des plans courts d'une dizaine de secondes maximum. Elle alterne les scènes d'interview et les scènes en laboratoire avec de nombreux circuits optiques visibles. Il s'agit évidemment d'un lourd travail de communication, maniant l'image comme les discours pour faire circuler et faire adhérer aux promesses du quantique. Comme a pu le montrer Rosental (2019), ces activités impliquent des coûts importants pour les acteurs et demandent une organisation qui place ces démonstrations au centre de leur attention et des développements technologiques.

Cette vidéo étend la collaboration au-delà du laboratoire, impliquant les divers partenaires dans une mise en circulation des résultats et des promesses qui dépasse les frontières de la recherche académique pour atteindre les espaces industriels et financiers. Ce medium permet alors aux acteurs de formuler les promesses d'applications de l'ordinateur quantique et de coordonner et structurer les imaginaires déployés en précisant l'horizon d'attente de cette technologie. Le président de Pasqal y intervient en listant explicitement les promesses de l'ordinateur quantique :

*« [l'ordinateur quantique] est le nouvel outil que la nature nous a donné pour résoudre des problèmes qui étaient jusqu'à présent insolubles : comment réduire la consommation d'énergie en améliorant sa distribution ? Comment concevoir des médicaments plus rapides et plus efficaces ? Comment prédire ce qui se passera avec le réchauffement climatique ? Comment prévoir les crises économiques ? »*⁸¹

Président de Pasqal issu d'une vidéo de communication sur les résultats de
l'expérimentation menée par le Crédit Agricole, de Pasqal et de
Multiverse Computing de mai 2023

La généralisation des problèmes abordés par les ordinateurs quantiques est ici évidente : le programme cherche à identifier les intérêts de l'informatique quantique pour le secteur financier à partir d'un cas d'usage spécifique qui est l'évaluation du risque de défaut de crédit. Pourtant, ce cas d'usage reposant sur un algorithme d'optimisation pour le *machine learning* est étendu à tout type d'algorithme d'apprentissage et à tous les secteurs qui

⁸¹ *Ibid.* 1'17, traduction personnelle depuis « This is the new tool that Nature has given to us to solve problems that until now was unsolvable : how to reduce use of energy by improving its distribution, how to design faster, better drugs ? how to predict what will happen with the global warming ? how to forecast economic problems ?».

pourraient bénéficier de ce type de machine, tandis que la référence au risque de défaut de crédit disparaît rapidement dans le communiqué de presse au profit d'une insistance croissante sur l'avantage quantique lui-même.

Le cas de la démonstration de la « suprématie quantique » de Google

Les communications de ce type sont très nombreuses et certaines font davantage parler d'elles et peuvent entraîner des controverses. C'est le cas de la publication de Google en 2019 annonçant la suprématie quantique dans une publication dans *Nature*. L'article paraît le 23 octobre 2019⁸², signé par des auteurs et autrices des laboratoires de Google, de la NASA, de diverses universités américaines et allemandes, parmi lesquelles l'Université du Massachusetts à Amherst, Caltech, l'Université de Californie à Santa Barbara, l'Université de Californie à Riverside, l'Université du Michigan à Ann Arbor, l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign, la Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, et le Forschungszentrum Jülich. Il est intitulé « La suprématie quantique en utilisant un processeur supraconducteur programmable »⁸³ et présente dans son *abstract* la promesse quantique et la manière dont les auteurs et autrices affirment avoir démontré la promesse :

*« La promesse des ordinateurs quantiques est que certaines tâches informatiques peuvent être exécutées exponentiellement plus rapidement sur un processeur quantique que sur un processeur classique. [...] Notre processeur « Sycamore » prend environ 200 secondes pour [réaliser une tâche de calcul spécifique]- nos benchmarks indiquent actuellement que la tâche équivalente pour un superordinateur classique de pointe prendrait environ 10 000 ans. Cette augmentation spectaculaire de la vitesse par rapport à tous les algorithmes classiques connus est une réalisation expérimentale de la suprématie quantique pour cette tâche de calcul spécifique, annonçant un paradigme informatique très attendu. »*⁸⁴

⁸² Arute, Frank, Kunal Arya, Ryan Babbush, Dave Bacon, Joseph C. Bardin, Rami Barends, Rupak Biswas, et al., « Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor. » *Nature*, 2019, 574 (7779): 505-10. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.

⁸³ *Ibid.* p. 1, traduction personnelle depuis « Quantum supremacy using a programmable superconducting processor ».

⁸⁴ *Ibid.* p. 1, traduction personnelle depuis « The promise of quantum computers is that certain computational tasks might be executed exponentially faster on a quantum processor than on a classical processor [...] Our Sycamore processor takes about 200 seconds to sample one instance of a quantum circuit a million times—our

L'*abstract* évoque exactement la même promesse d'application que celle que j'analyse dans ce chapitre. Il est question d'une attente d'un ordinateur quantique qui surpassé les ordinateurs classiques sur « certaines tâches » que j'ai appelées *problèmes* précédemment. L'*abstract* présente donc une expérience qui aurait produit un processeur capable d'exécuter un programme qui aurait pris à un ordinateur classique dix mille ans. Ils annoncent alors avoir atteint la « suprématie quantique », concept théorique introduit par le physicien John Preskill en 2012⁸⁵, par la phrase suivante :

« Nous espérons donc accélérer l'avènement de l'ère de la suprématie quantique, où nous pourrons accomplir des tâches avec des systèmes quantiques contrôlés, dépassant ce qui est réalisable avec des ordinateurs numériques classiques. »⁸⁶

La *suprématie quantique* est un concept qui a essaimé dans la communauté académique et qui correspond donc à une période où les capacités des ordinateurs quantiques dépasseront (visiblement unilatéralement) celles des ordinateurs classiques. Cette perspective rappelle la notion de « révolution scientifique » de Kuhn que j'ai esquissé dans l'introduction. Cette nouvelle « ère » reflète un nouveau paradigme de calcul, bien plus puissant et inimaginable que le paradigme de calcul actuel :

« Atteindre la suprématie quantique et en explorer les conséquences figureront parmi les grands défis de la science du XXI^e siècle, et notre imagination est mal équipée pour envisager les récompenses scientifiques de la manipulation d'états quantiques fortement intriqués, ni les avantages potentiels des technologies quantiques avancées. »⁸⁷

benchmarks currently indicate that the equivalent task for a state-of-the-art classical supercomputer would take approximately 10,000 years. This dramatic increase in speed compared to all known classical algorithms is an experimental realization of quantum supremacy^{8–14} for this specific computational task, heralding a much-anticipated computing paradigm».

⁸⁵ Preskill, John, « Quantum computing and the entanglement frontier. » *arXiv: Quantum Physics* (2012). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1203.5813>.

⁸⁶ *Ibid.* p. 2, traduction personnelle de « We therefore hope to hasten the onset of the era of *quantum supremacy*, when we will be able to perform tasks with controlled quantum systems going beyond what can be achieved with ordinary digital computers ».

⁸⁷ *Ibid.* p. 15, traduction personnelle de « Attaining quantum supremacy and exploring its consequences will be among the great challenges facing 21st century science, and our imaginations are poorly equipped to envision the scientific rewards of manipulating highly entangled quantum states, or the potential benefits of advanced quantum technologies ». »

Les attentes déployées par cette promesse de l'existence d'une suprématie quantique seraient extrêmes, inaccessibles à l'esprit humain et concernent tout autant les scientifiques que les sociétés humaines. Compte tenu de la rupture que représenterait la suprématie quantique, l'affirmation de Google d'y être parvenu en 2019 a soulevé un vaste débat. Avant d'être publié par la revue *Nature*, le résultat est annoncé un mois avant, le jour de son acceptation par la revue, dans un article dans la presse grand public du *Financial Times* du 20 septembre 2019⁸⁸. L'article mentionne peu le résultat expérimental et s'étend plutôt sur les anticipations des capacités de l'ordinateur que les résultats en eux-mêmes en utilisant des *verbatimis* et interviews des scientifiques de Google. On retrouve ici les mêmes procédés que dans le cas du projet du Crédit Agricole : la publication scientifique sert à créer un espace ouvert au public pour débattre des bénéfices anticipés et de l'urgence liée aux promesses technologiques. L'article de presse reprend le concept de « taux exponentiel double » annoncé par la publication scientifique dans sa section conclusive intitulée « futur », marquant la volonté d'anticipation des scientifiques. Voici le texte de l'article du *Financial Times* :

*« Ils ont également prédit que la puissance des machines quantiques augmenterait à un « taux exponentiel double », comparé au taux exponentiel de la loi de Moore, qui a conduit aux progrès des [transistors dans les ordinateurs classiques actuels] dans la première ère de l'informatique. »*⁸⁹

La mention de la loi de Moore n'est pas anodine comme j'ai déjà pu le présenter à travers l'étude de Loeve (2015). Dans son chapitre, Loeve présente les généralisations qui sont faites de la Loi de Moore à toutes les projections qui anticipent une évolution exponentielle dans le développement d'une technologie. En invoquant la loi de Moore pour évoquer un « taux exponentiel double », les scientifiques reprennent directement la promesse d'origine, en l'étendant cette fois à la progression des capacités de calcul quantique qui permet d'atteindre la suprématie. Le parallèle entre l'exponentielle de l'avantage quantique en complexité par rapport aux algorithmes classiques et de la croissance de la puissance de calcul n'a à priori

⁸⁸ Murgia, Madhumita et Richard Waters, « Google Claims to Have Reached Quantum Supremacy », *The Financial Times*, 20 septembre 2019.

⁸⁹ *Ibid.* Traduction depuis « They also predicted that the power of quantum machines would expand at a “double exponential rate”, compared to the exponential rate of Moore’s Law, which has driven advances in silicon chips in the first era of computing. ».

pas de fondement théorique mais produit un effet rhétorique crédibilisant la promesse de l'ordinateur quantique.

Les parallèles entre ces différentes qualifications d'« exponentiel » se retrouvent également, selon un enquêté, dans les retours exponentiels attendus par les investisseurs en capital-risque dans les technologies quantiques⁹⁰. Leur stratégie d'investissement consisterait à financer dix start-ups pour en voir au moins une réussir. Elle reposera sur l'hypothèse que le taux de réussite des start-ups reste constant (environ 5 à 10 %), de sorte que le nombre de succès croît de manière linéaire avec le volume d'investissements. En revanche, chacune des rares start-ups qui réussit peut générer des gains de nature exponentielle, ce qui assurerait un retour global lui aussi exponentiel. Dans cette logique, l'enjeu pour les investisseurs est d'identifier les secteurs à croissance « exponentielle » où cette combinaison (linéarité des succès des start-ups et gains exponentiels pour les gagnantes) est la plus probable. Le terme « exponentiel », utilisé pour qualifier divers concepts et avec différentes acceptations selon la sphère scientifique, industriel ou financier, se retrouve ainsi partagé et circulé dans des espaces par les promesses. Les opérations de traduction des promesses dans ces espaces fédèrent des acteurs et déplacent les horizons d'attente en s'appuyant sur des proximités lexicales.

⁹⁰ Le média Quantum Insider présente à travares l'article Dargan, James, « 21 of the World's Top Quantum Investors in 2024», *Quantum Insider*, 2024, <https://thequantuminsider.com/2022/06/08/quantum-investors/>, consulté le 10 aout 2025, un certain nombre d'investisseurs privés dans les technologies quantiques, principalement sur des ordinateurs quantique. Parmi les investisseurs les plus actifs figurent notamment plusieurs fonds d'investissement en deeptech ou très généraux essentiellement implantées aux États-Unis comme A&E Investments, Airbus Ventures, Alchemist Accelerator, Bloomberg Beta, DCVC (Data Collective), Felicis Ventures, Fenox Venture Capital, Goldman Sachs ou encore Lux Capital. D'autres fonds se sont spécialisés sur les technologies quantiques comme Quantum Wave Fund, Quantonation (fonds français) ou encore Quantum Valley Investments (fonds canadien). Leur rôle s'est fortement accru depuis le début des années 2010 : les investissements privés mondiaux sont passés de 59 millions USD en 2012 à 2,3 milliards en 2021, et atteignent environ 15 milliards USD cumulés (engagés ou reçus) en 2024. Les États-Unis concentrent environ 44 % de ces financements pour 24 % des entreprises du secteur, la Chine en capte 17 % pour seulement 10 % des entreprises et l'Union européenne, abritant 26% des start-ups quantiques, représente un peu plus de 12 % des investissements privés mondiaux, avec de fortes disparités selon les pays. Ces financements privés restent cependant largement minoritaires face aux financements publics, qui constituent la principale source de soutien au secteur : en 2024, le total des investissements publics annoncés dans le monde est près de trois fois supérieur au montant cumulé des investissements privés. Lire Erixon, Fredrik, Andrea Dugo, Dyuti Pandya, Oscar du Roy, « Benchmarking Quantum Technology Performance: Governments, Industry, Academia and their Role in Shaping our Technological Future», European Center for International Political Economy, 2025, https://ecipe.org/wp-content/uploads/2025/03/ECI_25_PolicyBrief_06-2025_LY03.pdf, consulté le 10/08/2025.

Ainsi, Google déploie en parallèle de cette publication scientifique une stratégie de communication grand public, avec un article dans le *Financial Times*, et par ailleurs dans un article de blog (2019)⁹¹ reprenant lui aussi les résultats de l'article. Il ne s'agit pas seulement de prouver une thèse (ici la supériorité d'un algorithme quantique sur ses équivalents classiques) mais aussi de la diffuser largement, en inscrivant cette supériorité technique dans une logique concurrentielle, alors que d'autres entreprises du secteur cherchent à s'imposer sur un marché encore naissant. L'expérience, bien qu'impossible à reproduire en dehors d'un laboratoire, témoigne d'une volonté de rendre visibles et crédibles les résultats, tout en soutenant une stratégie marketing visant financeurs et clients potentiels. Ce format de démonstration, mêlant annonce médiatique et présentation scientifique, rappelle le format hybride identifié par Doganova (2012) dans le domaine des biotechnologies, confrontées à des difficultés similaires pour exposer leurs produits. La démonstration de la suprématie quantique a eu un retentissement considérable, largement relayé par les médias. Elle est également mobilisée dans les observations et entretiens que j'ai réalisés et a marqué une grande partie de la filière. Elle donne également lieu à une controverse sur la notion de *suprématie quantique*.

Le concurrent direct de Google, IBM, publie le jour précédent la publication de Google dans la revue *Nature*, un billet de blog pour contester l'atteinte de la « suprématie quantique » assorti d'un article de recherche sur arXiv (2019)⁹². L'article de blog exprime plusieurs positions qu'il est pertinent de rappeler ici. D'abord, sans remettre en question l'expérience de Google en elle-même, IBM critique l'utilisation de « suprématie quantique » en présentant une méthode issue d'une de ses publications scientifiques qui démontre qu'un algorithme classique peut être exécuté pour réaliser la même tâche en deux jours et non dix mille ans. IBM poursuit en précisant que les capacités de l'informatique classique sont elles aussi en augmentation, ce qui ne permet pas à Google de prétendre avoir passé le « point de bascule » vers une ère où les algorithmes quantiques sont plus puissants que leurs

⁹¹ Martinis, John, « Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor », *Blog de Google*, 2019, <https://research.google/blog/quantum-supremacy-using-a-programmable-superconducting-processor/>, consulté le 10 aout 2025.

⁹² Pednault, Edwin P. D., John A. Gunnels, Giacomo Nannicini, L. Horesh and Robert L. Wisnieff, « Leveraging Secondary Storage to Simulate Deep 54-qubit Sycamore Circuits. » *arXiv: Quantum Physics*, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.09534>.

homologues. Enfin, IBM soutient que le concept de suprématie quantique est trompeur, car il oppose directement quantique et classique sans tenir compte des tâches spécifiques que chacun peut traiter :

*« Mais plus fondamentalement, parce que les ordinateurs quantiques ne régneront jamais en maître sur les ordinateurs classiques, mais travailleront plutôt de concert avec eux, car chacun a ses propres atouts. »*⁹³

Cet article ouvre ainsi une controverse sur la manière d'envisager l'avantage de l'informatique quantique. La démonstration théorique d'une vitesse de calcul rapide n'apparaît plus suffisante pour démontrer cet avantage, les algorithmes quantiques doivent le conserver tout au long des développements de l'ordinateur classique et de ses algorithmes. Ces remises en question apparaîtront sous la forme de publications scientifiques, d'articles de blog, d'articles de presses qui feront de l'annonce de la suprématie de Google un événement, soit d'une révolution scientifique soit d'une exagération d'un résultat scientifique alimentant un engouement scientifique, politique et médiatique autour des technologies quantiques.

Les démonstrations de la capacité des ordinateurs quantiques à produire un avantage sur les autres technologies peuvent ainsi donner lieu à des controverses scientifiques affectant les promesses. Si elles permettent aux promesses de circuler, elles sont des points d'achoppement où peuvent se cristalliser des groupes d'acteurs, comme des concurrents ou des détracteurs. Dans le cas quantique, je n'ai vu que des acteurs scientifiques ou entrepreneuriaux s'opposer aux promesses. Les controverses, si elles sont relayées par des acteurs médiatiques à l'arène publique, ne mobilisent pas et ne structurent pas des actions de la société civile.

Les démonstrations constituent des moments où se mettent en scène des acteurs institutionnels, scientifiques ou entrepreneuriaux, et instaurent une posture à mi-chemin entre la présentation de faits établis et l'anticipation d'un futur pour l'ordinateur quantique. Borup et al. (2006) soulignent que les attentes sociales connaissent des cycles d'engouement suivis de déceptions lorsqu'elles ne se concrétisent pas. Des événements médiatiques tels

⁹³ *Ibid.*, traduction personnelle depuis « But more fundamentally, because quantum computers will never reign “supreme” over classical computers, but will rather work in concert with them, since each have their unique strengths. ».

que la publication de Google en 2019 s'inscrivent dans ce registre des controverses vives, remettant en cause la crédibilité des constructeurs de ces ordinateurs et, par ricochet, la légitimité des promesses qu'ils portent. Cette décrédibilisation varie selon les acteurs : ceux qui sont investis dans la promesse identifient la crise principalement à une « survente » ou à une « inflation » des attentes, tout en reconnaissant l'intérêt des expérimentations. Le problème est ainsi situé dans le discours de certains acteurs, notamment de grands industriels américains. À l'inverse, les groupes que ces promesses cherchent à mobiliser demeurent plus sceptiques quant à leur véracité. Un chercheur impliqué dans un projet de développement quantique reproche à Google sa « communication abusive », tout en admettant la valeur scientifique de ses travaux :

« À la place de Google j'aurais un peu honte, mais ils n'ont jamais honte de rien. Cette annonce était survendue et [sa portée] a assez vite été régulée dans la communauté [scientifique] qui a précisé que de toute façon l'algorithme n'a pas d'intérêt, après ça reste de la belle physique. »

Chercheur en informatique classique au CEA, responsable d'un projet de recherche d'intégration d'un ordinateur quantique dans un centre de calcul
(Entretien du 27/02/2025)

La critique porte essentiellement sur le discours : l'anticipation prématuée des résultats et des bénéfices est « régulée » par les pairs scientifiques, qui replacent l'annonce dans un cadre plus critique. À l'inverse, un chef de division quantique dans une société de conseil pour l'industrie décrit la réception des controverses auprès de clients potentiels, souvent ciblés par les promesses d'applications du quantique :

« [IBM] va beaucoup plus loin dans les discours, c'est-à-dire qu'ils vont voir les industries [futurs clients] en prétendant que le hardware [la partie physique de l'ordinateur quantique] est prêt, qu'il faut se dépêcher de faire les applications, sinon ils seront dépassés. Cela n'est pas vrai. Il ne faut pas prendre les clients pour des imbéciles. J'en vois énormément qui me disent que c'est du vent et qu'ils connaissent IBM, qu'ils passent leur temps à vendre la lune. Donc ils en déduisent que le quantique c'est juste du pipeau. »

Chef de division quantique dans une entreprise de conseil en calcul quantique pour des industries, spécialisé en informatique et en calcul haute performance pour le quantique
(Entretien du 31/03/2025)

Cette inversion des positions met en lumière la tension entre, d'une part, la nécessité pour les acteurs industriels et académiques de maintenir une image de progrès en légitimant les

promesses et, d'autre part, la défiance croissante d'une partie des futurs clients (entreprises industrielles ou start-ups nécessitant des centres de calculs pour sa R&D) quant aux promesses trop ambitieuses. Cette tension alimente la dynamique des controverses : chaque démonstration, en tant que spectacle scientifique, devient un moment où se négocie la légitimité des savoirs et des promesses.

En conclusion de cette partie, on constate d'abord que l'histoire des prototypes quantiques se déroule sur le temps long en affrontant plusieurs controverses scientifiques, d'abord la faisabilité d'une telle technologie et ensuite la réalisation de l'avantage théorique anticipé. Si la première controverse est apaisée aussi bien par des publications théoriques de correction d'erreur que de réussites expérimentales, la deuxième est encore en cours et a intégré de nouveaux acteurs. La création de start-ups et de services dans de grandes entreprises crée de nouveaux espaces de circulation des promesses, avec de nouvelles chambres d'échos et de nouvelles pratiques de démonstration qui permet un élargissement progressif du cercle d'acteurs touchés par les promesses d'applications de l'ordinateur quantique.

Les promesses l'ordinateur quantique, fondées sur des arguments théoriques, mobilisent des ressources et coordonnent des acteurs dans la construction de *démonstrations* qui prennent la forme des publications scientifiques relayées par des acteurs industriels. Ces démonstrations, qu'elles soient réalisées dans des laboratoires de start-ups françaises ou d'industriels internationaux, jouent simultanément le rôle de preuves scientifiques et de vitrines d'anticipation des développements futurs de l'ordinateur. En croisant publication académique et communication d'entreprise, ces dispositifs réalisent des opérations de crédibilisation et de légitimation des promesses appelant de nouvelles ressources et organisations.

Ces opérations peuvent faire émerger des controverses qui remettent en question la crédibilité des acteurs engagés et de leurs promesses. L'anticipation réalisée par les promesses est ainsi à la fois le moteur des promesses dans leur mise en action et leur point d'achoppement cristallisant des débats de la communauté scientifique et industrielle. Dans les deux cas étudiés, en France comme à l'international, les démonstrations se révèlent donc être à la fois des passeurs de promesses et des instigateurs de controverses. Alors que la démonstration cherche à rendre visible l'avantage quantique potentiel, elle expose aussi le caractère fragile de la crédibilité collective autour du quantique.

Conclusion

En conclusion de ce premier chapitre, j'ai voulu montrer comment les anticipations et projections théoriques des acteurs développant un ordinateur quantique donnent naissance à des promesses d'applications qui orientent activement le développement de la technologie et visent à intéresser largement de nouvelles ressources. Il s'agissait d'explorer, d'une part, les activités scientifiques de formalisation, et d'autre part, les opérations de communication et de démonstration qui portent ces anticipations hors du laboratoire.

Dans la première partie, j'ai analysé l'anticipation théorique de l'avantage quantique comme geste générateur de promesses. Nous avons d'abord vu que la formalisation du qubit et la généralisation de la complexité algorithmique ont permis de définir quantitativement un « avantage quantique », c'est-à-dire un écart théorique systématique avec le calcul classique. Ces outils conceptuels ont servi de fondement à la multiplication de scénarios d'usage, du calcul d'optimisation microélectronique à la factorisation cryptographique. Ils sont au centre de l'activité de recherche en informatique quantique, qui se donne pour agenda et boussole la détermination de nouvelles applications par le biais d'algorithmes. Cette formulation de l'avantage quantique crédibilise la perspective d'un gain de temps ou de ressources, perspective alors diffusée, après un processus de traduction, vers d'autres arènes comme celle de la médiation scientifique. Ce travail reprend le prisme de l'usage et du concret pour formuler les promesses. Le concept d'avantage quantique reste débattu quant à sa réalisation dans un appareil concret et engendre plusieurs promesses qui provoquent une adhésion hétérogène : selon l'algorithme, les promesses diffèrent en ampleur, légitimant l'expérimentation pour valider l'avantage théorique.

Dans la deuxième partie, j'ai étudié la circulation des promesses à travers les démonstrations empiriques et les prototypes. L'historique des développements expérimentaux illustre le déplacement d'un débat scientifique sur la faisabilité vers la question de l'utilité : l'ordinateur quantique est-il capable de démontrer l'avantage qu'il prétend ? Par deux études de cas, j'ai montré comment les acteurs engagés tentaient de crédibiliser et de légitimer ces promesses. Dans le cadre de démonstrations alliant publications scientifiques et communications médiatiques, ils cherchent des preuves tangibles des capacités des ordinateurs, présentes et à venir. Ces démonstrations articulent des opérations de

crédibilisation et de légitimation, et font circuler à grande échelle les promesses pour susciter l'intérêt et mobiliser des ressources.

La séparation artificielle entre la dimension théorique et la dimension expérimentale de l'ordinateur quantique permet d'apprécier leur convergence dans les gestes d'anticipation qui façonnent les promesses et construisent un horizon d'attente, tant dans son contenu que dans sa temporalité. Les mécanismes de communication et de traduction de l'avantage quantique mettent en tension les anticipations théoriques et les démonstrations empiriques, assurant la circulation des promesses d'usage.

Ce chapitre a donc montré comment les activités d'anticipation et de traduction ont permis de formuler et de diffuser les promesses d'applications de l'ordinateur quantique. En s'attachant aux pratiques et à leurs orientations par les promesses du développement technologique, il a mis en lumière les enjeux de la construction collective des horizons d'attente et leur force de coordination. Par ailleurs, l'ordinateur quantique produit un autre type de promesse, une promesse de marché ou de politique publique, qui organise la circulation des promesses d'applications. Le chapitre 2 cherchera à comprendre cette seconde promesse et à approfondir l'étude de la construction des horizons d'attente de l'ordinateur quantique.

Chapitre 2 : La promesse d'un marché des technologies quantiques comme horizon d'attente de l'administration française

Ce chapitre se propose d'analyser la promesse de marché qui s'est progressivement superposée aux promesses d'applications scientifique de l'ordinateur quantique, et dont l'organisation collective de l'horizon d'attente façonne les réseaux d'acteurs et oriente la trajectoire technologique. À travers la généalogie d'un pari économique assumé, j'interrogerai la manière dont l'incertitude est convertie en opportunité de marché, mobilisant États, institutions de recherche et entreprises. Cette perspective renvoie à la question générale de ce mémoire en mettant l'accent sur la dimension politique d'une promesse, et plus particulièrement sur les horizons d'attente collectivement élaborés autour de l'idée d'un marché des technologies quantiques.

Pour explorer cette dynamique, j'ai mobilisé plusieurs matériaux. D'un côté, j'ai suivi la circulation des discours officiels et stratégiques à travers les rapports et documents administratifs établis à l'échelle européenne et française pour comprendre comment la promesse de marché est formalisée et légitimée. De l'autre, je m'appuie sur mes entretiens avec un membre du conseil scientifique européen pour le lancement d'un instrument, le Flagship, et la ministre de la recherche Frédérique Vidal pendant la création de la stratégie nationale française, ainsi qu'un de ses conseillers. Associés à d'autres entretiens avec un chargé de mission à la Direction générale des entreprises (DGE), un autre de l'armement (DGA) et un dernier au Secrétaire Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (SGDSN), je cherche à saisir les rapports d'adhésion au sein de l'État et les inspirations internationales de cette promesse de marché. J'ai par ailleurs observé une réunion d'experts français commanditée par le Secrétaire Général Pour l'Investissement (SGPI) où scientifiques et industriels ont évalué l'état de maturité de l'ordinateur quantique et discuté des modalités d'investissement, révélant la tension sur la justification économique du marché de l'ordinateur quantique.

Le développement de ce chapitre s'articule en trois temps. Dans un premier volet, je retrace comment, à l'échelle européenne, le Quantum Flagship a mis les technologies quantiques à l'agenda économique de l'innovation, érigéant un secteur compétitif fondé sur la promesse d'emplois et les ruptures scientifiques. Le second volet montre comment, par un « souci de

l'international » (concept développé par Kollop, 2019)⁹⁴, la France a importé et adapté ces cadres européens pour élaborer sa propre stratégie nationale, conférant aux technologies quantiques le statut de secteur prioritaire et coordonnant les administrations autour d'un horizon d'attente. Enfin, le troisième volet se concentre sur l'ordinateur quantique lui-même et dévoile la naissance d'un pari économique forcé, où l'absence de justification financière classique conduit l'État à s'engager au titre d'une décision rationnelle face à un futur menaçant. À chaque étape, il s'agira de montrer comment se nouent des rapports d'adhésion spécifiques à l'horizon d'attente, qu'il soit porté par l'Europe, réimporté en France ou incarné dans la décision d'investir sur la seule confiance en un pari technologique.

Les deux premières sections de ce chapitre sont consacrées aux technologies quantiques dans leur ensemble, dont l'ordinateur quantique apparaît comme la vitrine. En revanche, la troisième met l'accent sur l'ordinateur quantique lui-même et le pari économique forcé par les incertitudes sur son développement autant technique que commerciaux. Il s'agit alors de comprendre le glissement de ces rapports d'adhésion à la promesse de marché.

Les technologies quantiques mises à l'agenda de la politique économique européenne comme un secteur compétitif

Dans cette section, j'examine comment, à l'échelle européenne, les technologies quantiques ont été érigé comme un secteur hautement compétitif, porté par des promesses de valeur économique et de rupture technologique. À travers l'histoire d'un instrument européen, le Quantum Flagship, je montrerai comment des réseaux académiques et industriels ont utilisés les promesses de l'ordinateur quantique auprès de la Commission Européenne et comment elles ont installé les technologies quantiques comme un secteur spécifique et compétitif.

Le premier dispositif d'action publique dédié pour soutenir le développement des technologies quantiques sur le sol européen, dont l'ordinateur quantique est présenté

⁹⁴ Kolopp, Sarah, « « La main de l'étranger » ? : Les voies de l'international dans la réforme financière en France : le cas du « souci international » de la direction du Trésor », *Politix*, 2018, 124(4): 161-81. <https://doi.org/10.3917/pox.124.0161>.

officiellement comme une partie de l'agenda de recherche (2017)⁹⁵, correspond à une initiative intitulée « Quantum Flagship » lancée en 2018 formellement par la Commission Européenne. Ce programme de soutien à l'innovation pour un montant d'un milliard d'euros sur 10 ans était le premier instrument uniquement dédié au quantique par une puissance publique sur le continent (après le Royaume Uni) et a donc eu une grande influence sur la structuration du quantique dans les États membres comme une filière, en particulier pour la France. En constituant une arène commune à tous les États, il a mis en réseau des acteurs avec des objectifs différents structurant l'émergence d'une nouvelle promesse pour l'ordinateur.

« *Donc, ils [la Commission européenne] n'arrêtaient pas de nous répéter : « il faut que ça [l'ordinateur quantique] ait un impact, c'est-à-dire sous 10 ans, il faut que ça crée des emplois, du rapatriement de cerveaux expatriés, etc. » Donc ils disaient : « si vous n'y croyez pas, dites-leur que vous n'y croyez pas, mais si vous y croyez, apportez-nous des éléments pour que ça rentre dans un Flagship. Ça va créer des emplois, on va récupérer tout plein de jeunes qui sont partis s'expatrier en Amérique, etc. ».* »

Membre du conseil scientifique lors du lancement du Flagship au titre de chef de division quantique dans une entreprise de conseil en calcul quantique pour des industries, spécialisé en informatique et en calcul haute performance pour le quantique

(Entretien du 31/03/2025)

Ce *verbatim* est extrait d'un entretien mené avec un ancien membre du groupe d'experts qui a défini la feuille de route du Flagship lors de son lancement. L'objectif de ce groupe était d'orienter l'instrument, de définir ses objectifs et son périmètre. L'enquêté y déploie les éléments promis par le Flagship, qui constitue un *horizon d'attente* : des « emplois », des « cerveaux », tout en faisant appel à l'adhésion à cet horizon par la « croyance » des experts dans la capacité d'une filière quantique à produire de tels résultats. Ce rapport d'adhésion pour un groupe de technologie m'invite à considérer qu'en plus de *promesses d'applications*, une autre promesse a émergé. Reposant sur des critères de croissance et d'emploi, je la

⁹⁵ Commission Européenne, « Quantum Technologies Flagship Final Report », https://qt.eu/media/pdf/170922_HLSC_Final_Report_online.pdf, 2017, consulté le 09/06/2025.

désignerai par le terme *promesse de marché*. Je propose de retracer l'émergence de ce Flagship pour montrer l'apparition de cette promesse et sa circulation.

En 2014, La Commission Européenne ouvre un appel à projets pour financer des secteurs technologiques. Il s'agit du premier dispositif de ce type déployé et il cherche à accélérer sur le temps long (10 ans) le « transfert » des résultats scientifiques en produits et services commerciaux par le financement de projets de collaboration entre académie et industrie. Il vise ainsi à « valoriser » les résultats produits par l'académie en rapprochant ces acteurs avec des industriels au sein de projets collaboratifs. Ces espaces frontières sont censés élaborer des objets hybrides entre science et industrie, comme des preuves de concept, qui cherchent à accélérer l'innovation dans le mythe du modèle linéaire pour produire des technologies de marché (Joly, 2019)⁹⁶. Le Flagship présente cette même orientation Cet instrument est particulièrement orienté vers la mise en marché des technologies, comme l'indique son site internet :

« *Ils [les programmes Flagship] mobilisent des chercheurs, des universitaires, des entreprises et des programmes nationaux pour relever des défis majeurs dans le domaine de la science et de la technologie. Le résultat peut apporter des changements positifs qui profitent à la société et à l'économie, et faire progresser le leadership de l'UE dans le domaine de la technologie et de l'industrie.* »⁹⁷

Les Flagships étaient sélectionnés par un appel à projet et seuls deux secteurs technologiques ont été choisis en 2014⁹⁸ : l'utilisation de supercalculateurs pour la neurologie et la production de graphène, matériau à base de fine couche de carbone utilisé dans l'électronique, la chimie ou l'ingénierie. D'après deux de mes enquêtés, un consortium

⁹⁶ Joly, Pierre-Benoît, Reimagining Innovation, in Lechevalier, Sébastien, *Innovation Beyond Technology: Science for Society and Interdisciplinary Approaches*, Editions Springer, 2019, 25–45.

⁹⁷ Commission Européenne, « Future and Emerging Technologies (FET) flagships », <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/flagships>, consulté le 21/05/2025. Traduction personnelle depuis « They [Flagships] mobilise researchers, academics, industry and national programmes to tackle major challenges in science and technology. The result can bring positive changes that benefit society and the economy, and advance EU leadership in technology and industry ».

⁹⁸ Comission Européenne, « EU Science and Technology Flagships pick up steam - final inclusive structure announced », 2014, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_14_1005, consulté le 09/06/2025.

d'acteurs académiques et industriels a candidaté à cet appel à projet pour les technologies quantiques et n'a pas été sélectionné.

Ce même réseau d'acteurs a ensuite publié un manifeste, sorti en mai 2016⁹⁹ et intitulé « Quantum Manifesto, A New Era of Technology », plaidant pour un Flagship sur les technologies quantiques. Il présente explicitement les bénéfices qu'aurait le développement de ces technologies en Europe, formulant côté à côté la promesse de marché et les promesses d'applications :

« [objectif n°3] Faire de l'Europe une région dynamique et attractive pour les entreprises innovantes et les investissements dans les technologies quantiques. [objectif n°4] Tirer parti des avancées des technologies quantiques pour apporter de meilleures solutions aux grands défis dans des domaines tels que l'énergie, la santé, la sécurité et l'environnement. »¹⁰⁰

Ce manifeste a été soutenu par la signature d'individus des communautés académiques (2651 signatures), puis dans une moindre mesure par des entreprises (56 signatures) et des institutions de recherche (19 signatures) à travers toute l'Europe, mais majoritairement situées en Allemagne, au Royaume-Uni, en France, en Espagne et en Italie, comme l'indique une annexe du manifeste. Un leader de ce réseau serait Tommaso Calarco, l'un des auteurs principaux du manifeste selon un journaliste¹⁰¹ et chercheur en physique au Centre de recherche de Jülich en Allemagne. Selon un enquêté, il serait intervenu auprès du commissaire européen au numérique Günther Oettinger de l'époque. Il lui aurait alors « vendu le Quantum Flagship », qui fut lancé malgré un premier avis négatif de la Commission. Ce récit provient d'un expert que j'ai interrogé et qui a participé à divers comités scientifiques, européens et français, sur des instruments portant sur le quantique, comme le Flagship. Ce réseau d'acteurs, principalement académique, apporte la légitimation du quantique comme secteur de marché, d'abord par sa candidature, puis par son manifeste. Les arguments mobilisés ensuite repris dans le rapport final du groupe d'experts

⁹⁹ Collectif, « Quantum ManifestoA New Era of Technology », <http://www.qtflagship.cnr.it/wp-content/uploads/2016/10/Quantum-Manifesto.pdf>, consulté le 25/05/2025.

¹⁰⁰ Ibid. p. 3, traduction personnelle depuis « Make Europe a dynamic and attractive region for innovative business and investments in quantum technologies. Benefit from advances in quantum technologies to provide better solutions to grand challenges in such fields as energy, health, security and the environment. »

¹⁰¹ Décode Media, « [DECODE Quantum] À la rencontre de Tommaso Calarco (Forschungszentrum Jülich) », Frenchweb, <https://www.frenchweb.fr/decode-quantum-a-la-rencontre-de-tommaso-calarco-forschungszentrum-julich/446758>, 2024, consulté le 25/05/2025.

pour lancer le Flagship, comme le montre cette comparaison de deux phrases du résumé exécutif des deux documents dont la structure est très proche (voir *table I*). Les phrases sont coupées en phase et les différences entre les deux sont inscrites en gras.

<i>« This initiative aims to</i>	<i>« The QT Flagship initiative is very important and urgent to</i>
<i>place Europe at the forefront of the second quantum revolution now unfolding worldwide, bringing transformative advances to science, industry and society.</i>	<i>place and keep Europe at the forefront of the second quantum revolution now unfolding worldwide, bringing transformative advances to science, economy and society.</i>
<i>It will create new commercial opportunities addressing global challenges, provide strategic capabilities for security and seed as yet unimagined capabilities for the future. »</i>	<i>It will create new commercial opportunities addressing global challenges, provide strategic capabilities for security and seed yet unimagined applications for the future. »</i>
Quantum Manifesto, A New Era of Technology (mai 2016)	Rapport Quantum Technologies Flagship Final Report (juin 2017)

Table I : Comparaison entre deux phrases du résumé exécutif de deux documents, l'un issu d'un manifeste signé par un large panel de scientifiques et industriels européen et l'autre issu d'un rapport d'expert donnant l'orientation du Quantum Flagship.

Le Flagship apparaît alors comme un dispositif ayant largement été orienté par ce manifeste, traduisant ainsi les revendications scientifiques dans l'orientation du dispositif. J'interprète cette porosité comme le résultat d'un travail de traduction réalisé par le réseau académique et industriel, qui a reformulé leurs intérêts scientifiques et leurs projets de développement des technologies quantiques en énoncés alignés sur les priorités de marché et de rupture promues par la Commission européenne.

Les communications de la Commission européenne sur le Flagship présentaient le quantique comme une « révolution » technologique qui donnera lieu à de nombreuses « technologies quantiques », c'est-à-dire un ensemble de produits issus de ce domaine scientifique. Dans

un rapport de lancement du Flagship, la notion de révolution cherche à orienter l'instrument pour qu'il réponde à la demande de la Commission d'un marché fructifiant :

*« La première révolution quantique - comprendre et appliquer les lois physiques du domaine microscopique - a débouché sur des technologies révolutionnaires telles que le transistor et le laser. Aujourd'hui, notre capacité croissante à manipuler les effets quantiques dans des systèmes et des matériaux personnalisés ouvre la voie à une deuxième révolution quantique. »*¹⁰²

La mention de « révolution » est toujours présente aujourd'hui sur le site du Flagship :

*« La deuxième révolution quantique se déroule actuellement, exploitant les énormes progrès réalisés dans notre capacité à détecter et à manipuler des objets quantiques uniques. Le Quantum Flagship est le moteur de cette révolution en Europe. »*¹⁰³

Cette expression de « révolution », que j'ai décrite rapidement dans l'introduction de ce mémoire, relie les effets épistémiques et politiques des sciences. En utilisant cette expression pour décrire l'innovation des technologies quantiques, l'Union Européenne et tous les promoteurs de l'innovation du secteur l'inscrivent dans la continuité d'un récit de rupture, qui vient *naturellement* après une autre révolution antérieure que serait celle des technologies développées par des laboratoires de physique et d'informatique. Ces technologies, comme le laser ou les transistors, sont des éléments constitutifs de l'ordinateur quantique, présents dans de nombreux objets technologiques, et ils dessinent l'horizon d'attente associé à la découverte technologique. Le marché des technologies quantiques ne vise pas seulement la croissance et l'emploi, mais l'adoption massive par de nombreux acteurs industriels et étatiques de cette technologie, qui s'exporte, se construit et se décline en d'innombrables applications. On voit ainsi à l'œuvre ces promesses d'applications qui, traduites dans un

¹⁰² Commission Européenne, « Quantum TechnologiesFlagship Final Report », https://qt.eu/media/pdf/170922_HLSC_Final_Report_online.pdf, 2017, consulté le 25/05/2025, traduction personnelle depuis « The first quantum revolution – understanding and applying the physical laws of the microscopic realm - resulted in ground-breaking technologies such as the transistor and the laser. Now, our growing ability to manipulate quantum effects in customised systems and materials is paving the way for a second quantum revolution ».

¹⁰³ Commission Européenne, « The future is Quantum », <https://qt.eu/>, consulté le 21/05/25, traduction personnelle depuis « The Second Quantum Revolution is unfolding now, exploiting the enormous advancements in our ability to detect and manipulate single quantum objects. The Quantum Flagship is driving this revolution in Europe. ».

autre espace administratif et financier, forgent une nouvelle promesse de marché. La mise à l'agenda politique de l'innovation par le Flagship de l'ordinateur quantique participe à l'installation de cette technologie comme future révolution ou « changement de paradigme », selon un enquêté du SGDSN.

La genèse du Flagship illustre la construction d'une promesse de marché qui vient s'ajouter aux promesses d'applications scientifiques. À travers l'articulation d'intérêts académiques, industriels et administratifs, ce dispositif intègre les promesses d'applications des technologies quantiques dans un instrument de politique techno-industrielle à visée de marché. La circulation des promesses d'applications fait donc émerger une nouvelle promesse de marché relayée par des institutions européennes. Elle identifie les technologies comme des technologies de rupture, capable de réaliser une révolution scientifique au service d'un profit économique. Les technologies quantiques deviennent donc une figure de proue (pour un Flagship dont la traduction française est vaisseau amiral) de l'innovation de l'Union Européenne.

La genèse de la stratégie nationale des technologies quantiques motivée par un « souci de l'international »

Le statut privilégié des technologies quantiques en Europe inspire, en parallèle d'une volonté de rupture en matière de gouvernement de l'innovation en France, la création d'une stratégie nationale sur les technologies quantiques. Il s'agit d'un texte donnant les priorités et objectifs de l'État français en la matière. Dans la continuité de la genèse du Flagship, je cherche ici à retracer la création de cette stratégie quantique pour identifier comment la recherche de réforme de la politique techno-industrielle en France a entraîné une adoption des technologies quantiques et ainsi légitimé et crédibilisé ses promesses de marché.

Les acteurs développant des technologies quantiques, composés de l'académie, de l'industrie, des fournisseurs, ou des clients, se définissent comme une filière. Un chef de la division quantique d'une entreprise indique en entretien l'objectif de construire une filière autonome et efficace :

« Et enfin, sur la partie vraiment développement de logiciels quantiques, c'est vrai qu'on a beaucoup de mal à faire émerger cette discipline [en Europe]. On a eu... On a beaucoup

discuté avec des écoles, des universités, au moins qu'il y ait une filière. Mais c'est un peu poussif. »

Membre du conseil scientifique lors du lancement du Flagship au titre de chef de division quantique dans une entreprise de conseil en calcul quantique pour des industries, spécialisé en informatique et en calcul haute performance pour le quantique

(Entretien du 31/03/2025)

Un autre administrateur au SGDSN précise que « *Le premier objectif [de l'État], c'est de soutenir les filières françaises.* », quand un membre de la direction générale des entreprises parle de « *structuration d'une filière industrielle* ». Cette filière permet de placer l'ensemble des acteurs travaillant à la promesse du marché quantique sous une même identité. Il n'est plus question de diversité des applications, mais d'un unique pari en faveur d'un marché quantique, qui se compose de plusieurs parties et projets, dont le développement d'un ordinateur quantique dont l'avantage ne fait pas encore consensus. Cette unité se traduit par un objet d'action publique englobant : la stratégie nationale sur les technologies quantiques, visant à organiser un ensemble de dispositifs pour soutenir la filière. Je souhaite ici présenter comment cet objet émerge, s'inspire du contexte international tout en cherchant une spécificité pour construire une économie marquée par la rupture technologique et l'accélération de l'innovation. Je reprends pour cela le *souci de l'international*, concept emprunté à Kolopp (2018)¹⁰⁴ pour décrire les inspirations internationales des réformes et politiques publiques de l'administration financière française.

Sarah Kolopp s'est intéressée aux moyens par lesquels l'administration du Trésor a fait évoluer ses activités en s'inspirant de références internationales. Elle analyse les passeurs et passerelles qui ont permis d'intégrer dans l'administration française des thèses jusque-là écartées sur la gestion des finances publiques. Ces passeurs sont des fonctionnaires de cette administration qui se « branchent », dans leurs formations et activités à l'international, aux théories et conceptions étasuniennes en matière de politique financière, et y trouvent des inspirations pour répondre à une volonté locale de créer une rupture. Le *souci international*,

¹⁰⁴ Kolopp, Sarah, « « La main de l'étranger » ?:Les voies de l'international dans la réforme financière en France : le cas du « souci international » de la direction du Trésor », *Politix*, 2018, 124(4): 161-81.
<https://doi.org/10.3917/pox.124.0161>.

défini comme le « souci de la comparaison de soi avec autrui, et souci de ce que font les autres »¹⁰⁵, devient une ressource pour nourrir les réformes de libéralisation financière. Ce travail est particulièrement pertinent pour saisir la naissance de comparaisons à l'œuvre dans le réseau quantique, motivé par un contexte local jugé défavorable par les acteurs qui cherchent des idées pour se démarquer.

Entre 2017 et 2019, le gouvernement français était justement en quête de réforme dans sa politique technoscientifique. Comme le précise Frédérique Vidal, ministre de la recherche de l'époque, en entretien :

« Disons que nous étions en train de réfléchir, avec Bruno Le Maire [ministre de l'économie du gouvernement d'Edouard Philippe] essentiellement, sur des stratégies nationales, notamment pour le volet innovation. Et donc la question était comment est-ce qu'on peut impulser, soutenir plus particulièrement des recherches académiques qui vont ensuite avoir, en tout cas c'est ce qu'on espère, un impact sur l'économie. Que ce soit en termes de création d'emplois, que ce soit en termes de création de licornes, etc. »

Frédérique Vidal, ministre de la recherche sous Edouard Philippe pendant la création de la stratégie quantique (Entretien du 10/03/2025)

D'après cet entretien, le ministère de l'Économie était en quête d'une rupture dans la manière dont l'État administre les politiques techno-industrielles. Le gouvernement questionnait alors les différents ministères pertinents et établit une liste de sujets qui pourraient être portés par des stratégies nationales, dont le quantique fait partie. Pour certains de ces sujets, des missions parlementaires ont été lancées pour établir de potentielles stratégies nationales. Fin 2018 paraissait le rapport de la mission Vilani sur l'intelligence artificielle, intitulé « Donner un sens à l'intelligence artificielle »¹⁰⁶ et sous-titré « Pour une stratégie nationale et européenne ». Une commission parlementaire était ensuite lancée sur le quantique début 2019 pour définir les orientations d'une stratégie et motiver l'investissement public dans le

¹⁰⁵ *Ibid.* p. 174.

¹⁰⁶ Villani, Cédric, « Donner un sens à l'intelligence artificielle », https://fichiers.acteurspublics.com/redac/pdf/2018/2018-03-28_Rapport-Villani.pdf, 2018, consulté le 26/05/2025.

domaine. Les travaux de cette commission ont donné lieu à un rapport paru début 2020 sous le nom de rapport Forteza¹⁰⁷.

Ce rapport était piloté par Paula Forteza, députée de la majorité puis non inscrit de 2017 à 2022, Jean-Paul Herteman, ex-PDG de Safran de 2011 à 2015, et Iordanis Kerenidis, chercheur en informatique fondamentale. Il présenta en 68 pages les technologies quantiques, leur fonctionnement théorique, les acteurs qui les développements, et leurs intérêts vis-à-vis de secteurs d'activités qui pourraient en bénéficier. Il poursuit avec les objectifs que devraient viser la France vis-à-vis de leur développement et des recommandations pour les mettre en œuvre. Comme me le confirmera ce dernier en entretien, le choix de cette gouvernance a été réalisé pour assurer un regard démocratique, industriel et académique, afin d'agréger au mieux ces perspectives dans le cadre d'une stratégie nationale. La présence de la députée relevait d'une mission parlementaire visant à évaluer et valider le projet de stratégie d'accélération du gouvernement, tout en produisant un document servant d'appui pour légitimer cette politique auprès du Parlement. L'ancien PDG de Safran apportait une perspective industrielle, en lien avec les attentes des entreprises et les usages potentiels des technologies quantiques dans le domaine de la défense. Enfin, la participation d'un chercheur en informatique visait à renforcer la crédibilité scientifique du rapport et de ses promesses technoscientifiques, tout en évitant de trancher prématulement sur le type de technologie quantique à privilégier. Ce choix est d'autant plus significatif qu'à l'époque, plusieurs grandes start-ups françaises développaient des architectures de qubits différentes. Cette orientation explique également la place prépondérante accordée à l'informatique quantique dans le rapport, plus marquée que dans d'autres stratégies européennes très orientée sur le type de qubit à privilégier.

Par ailleurs, le rapport intégrait également des co-rédacteurs, dont Neil Abroug qui sera le coordinateur national de la stratégie une fois lancée. Ce rapport s'inscrivait dans la perspective du gouvernement de décrire le quantique, avec unité, comme un futur marché. Intitulé « Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas », il présentait dès la première phrase du résumé exécutif le quantique comme une « révolution ». Ce rapport présentait les enjeux du secteur quantique sous deux catégories : « Croissance économique

¹⁰⁷ Forteza, Paula, Jean-Paul Herteman et Iordanis Kerenidis, « Quantique : le virage que la France ne ratera pas », https://forteza.fr/wp-content/uploads/2020/01/A5_Rapport-quantique-public-BD.pdf, 2020.

», rejoignant la promesse de marché quantique, et « Souveraineté technologique », rappelant les enjeux géostratégiques sur lesquels je reviendrai dans la dernière section pour me concentrer ici essentiellement sur la dimension de marché.

Ce rapport avait la fonction de guide de la stratégie nationale quantique. Il était lui-même sous-titré « 37 propositions pour une stratégie nationale ambitieuse », l'inscrivant dans ce contexte de recherche de stratégies nationales que je présentais au chapitre 1. Il s'agissait ainsi de légitimer la mise en œuvre d'une stratégie nationale sur les technologies quantiques menée par le gouvernement et financée par des fonds publics.

Ce rapport intervenait dans un contexte où le Quantum Flagship a déjà été lancé, et où les rapporteurs s'inspirent de certains éléments du cadrage européen de la promesse quantique par un *souci de l'international*. Ainsi, le chercheur en informatique quantique Iordanis Kerenidis, corédacteur du rapport Forteza, me précise en entretien (Entretien du 14/04/2025) que le périmètre choisi par le rapport et la structuration de la stratégie en trois technologies quantiques différentes était issu du rapport final sur le Flagship, dont l'ordinateur quantique. Par ailleurs, ce rapport a été rédigé suite à une série d'entretiens avec divers acteurs académiques et industriels, dont certains ont été impliqués en tant qu'experts dans l'orientation et le pilotage du Flagship européen. On voit alors se croiser ces divers espaces de discussions qui orientent *in fine* la stratégie nationale. Ces personnalités diffèrent du rôle de *passeur* que propose Sarah Kolopp, qui désigne un agent de l'administration qui s'expose aux conceptions internationales pour nourrir sa réflexion sur les réformes. Pourtant, ces acteurs restent des porteurs qui présentent les enjeux du quantique tels qu'ils les ont déjà présentés et dirigés lors de la construction des instruments d'action publique européens. Ainsi, on retrouvait les mêmes justifications économiques et de souveraineté dans le rapport Forteza que dans le rapport final du Flagship quantique.

Le *souci de l'international* ne suffit pas à expliquer l'intérêt de l'État français pour les technologies quantiques. Le Flagship a construit un contexte politique et demandait un investissement financier de la part des États membres à hauteur de 50% entraînant un effet d'opportunité économique et politique. Par ailleurs, la compétitivité académique et industrielle du secteur correspondait également à une justification géostratégique en plus des enjeux économiques. Je discuterai les justifications du marché de l'ordinateur quantique et son rôle dans la stratégie nationale dans la section suivante.

Les acteurs que j'ai interrogés et qui étaient au gouvernement pendant la réalisation de la stratégie nationale quantique présentent le Flagship comme une preuve de la maturité des technologies quantique pour le marché qui justifie la mise en œuvre d'une stratégie nationale :

« Le fait que ce flagship se mette en place correspondait à une sorte de niveau de maturité du domaine. Du point de vue des perspectives ouvertes, la notion d'ordinateur quantique restait en 2017 un pari, ce qu'elle est toujours d'ailleurs aujourd'hui. Il y a eu évidemment des progrès de faits il y a une dizaine d'années, mais cela correspondait néanmoins à une progression de la maturité du sujet. »

Ancien conseiller de Frédérique Vidal, ministre de la recherche pendant la construction de la stratégie quantique (Entretien du 07/04/2025)

Le rapport Forteza a donc importé en transposant au niveau français, dans un gouvernement en quête de rupture, une proposition de stratégie nationale qui soit en accord avec les attentes d'innovation et d'accélération du gouvernement. Il a joué un rôle clé dans la crédibilisation de la promesse de marché quantique, car il a légitimé l'investissement public dans cette stratégie et est utilisé par le gouvernement comme preuve auprès de l'administration, du Parlement et de la société en général :

« Frédérique Vidal : C'était aussi une façon d'avoir la vision globale et de s'appuyer sur ce rapport. L'idée, c'est à chaque fois, si je puis dire... qu'on soit en capacité d'argumenter, parce que comme c'est aussi beaucoup d'argent, c'est important qu'on sache où on met cet argent.

Antoine Sérandour : *D'accord, oui. Donc c'était un moyen d'information pour le gouvernement.*

Frédérique Vidal : *Oui, et puis au-delà, après, comme il faut qu'on justifie aussi auprès du secrétariat général pour l'investissement, qui est directement auprès du Premier ministre. Disons que le démarrage, c'est toujours qu'on ait un rapport sur lequel on puisse s'appuyer. Donc c'était le Premier ministre qui avait demandé ce rapport, puisque le principe, c'était de demander à l'Assemblée de faire cette étude de l'extérieur. »*

Frédérique Vidal, ministre de la recherche sous Edouard Philippe pendant la création de la stratégie quantique (Entretien du 10/03/2025)

En février 2020, un mois après la parution du rapport Forteza, le ministère de l'Économie, le ministère de la Recherche et le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), service administratif en charge d'allouer les budgets d'investissement des administrations, recevaient un rapport intitulé « Faire de la France une économie de rupture technologique »¹⁰⁸ qu'ils avaient commandité auprès d'experts et pour lequel ils ont mis à disposition des agents. Comme l'indique le premier paragraphe de ce rapport, dirigé par Benoît Potier, président du conseil d'administration d'Air Liquide, il proposait de choisir des « secteurs prioritaires » pour une intervention de l'État à long terme, afin « d'encourager les grandes transitions » tout en garantissant la « souveraineté nationale ». Ce rapport venait confirmer l'ambition du gouvernement lancée deux ans plus tôt de faire naître des stratégies nationales, en faisant ainsi état de « *22 marchés émergents, dont 10 prioritaires, sur lesquels la France a le potentiel pour jouer un rôle de leader à l'échelle mondiale et appelant une concentration des moyens* ». Les technologies quantiques faisaient partie des dix secteurs identifiés par le rapport, et il proposait de s'appuyer sur le rapport Forteza pour construire une stratégie nationale d'accélération. Le rapport a donc participé à la circulation de la promesse de marché quantique et directement influencé la stratégie nationale dans le but de renforcer sa légitimité et de s'inspirer du cadrage de rupture technologique européen autour des technologies quantiques.

La promesse du marché quantique était alors confirmée pour l'administration et décrite dans ce rapport Potier à travers les « atouts » de la France dans ce secteur, qui étaient les différentes entreprises et start-ups qui se sont positionnées sur ces technologies. Le rapport citait en particulier la participation des grands industriels français comme Atos qui avait développé une expertise sur le calcul quantique, Thales, Total et Airbus qui avaient participé à des projets de recherche afin d'aider à l'industrialisation des technologies quantiques, et Air Liquide qui était un fournisseur essentiel de la filière en France. Les « impacts » prévus par le rapport portent exclusivement sur des indicateurs économiques comme les exportations et les emplois créés. Le marché est décrit à travers sa taille (2,2 milliards d'euros d'investissements privés) et son taux de croissance prévu pour la période 2018-2023.

¹⁰⁸ État français, « Faire de la France une économie de rupture technologique », https://www.economie.gouv.fr/files/Rapport_collegeExperts_06_02.pdf, 2020, consulté le 09/06/2025.

L'évaluation des marchés a été réalisée en partenariat avec le cabinet de conseil privé Roland Berger, autour de trois critères :

« La pertinence économique des marchés (volume du marché mondial, européen et national) ; la capacité de la France à se positionner dessus (existence de barrières à l'entrée, réglementaires, capitalistiques, de capital humain, accès aux infrastructures, positionnement de la France sur les secteurs associés) ; les enjeux en matière de souveraineté (sécurité des approvisionnements et technologies duales). »¹⁰⁹

Ces critères se retrouvent largement dans les entretiens avec les acteurs administratifs comme dans l'ensemble des rapports que j'ai cité. Les critères de marché (calendrier d'industrialisation, montant des investissements de capitaux privé, compétitivité des entreprises à l'international) sont omniprésents dans le rapport, quantifiés par les budgets totaux alloués.

Par ailleurs, le rapport Potier insiste sur « décloisonner les différentes initiatives publiques pour atteindre une masse critique » (titre de la partie 3 du rapport), invitant ainsi tous les organes publics à se structurer autour de ces stratégies, en limitant les marges de manœuvre pour une meilleure coordination. La stratégie nationale se construit en étroite collaboration interministérielle, le rapport Forteza vise l'ensemble de la filière, du fournisseur au client futur, en passant par les enjeux de formation. La stratégie nationale rassemble tous les acteurs de la filière dans la promesse du marché quantique où tous les acteurs sont mis en réseau. Je présente cette mise en réseau dans la partie suivante.

La stratégie nationale quantique est finalement annoncée en janvier 2021, sous la forme d'un rapport¹¹⁰ qui décrit différents dispositifs de soutien économique pour accompagner les acteurs de la filière afin de produire des « technologies quantiques ». Elle est également pilotée par un « coordinateur national », Neil Abroug de mars 2021 à août 2024 (qui a co-rédigé le rapport Forteza), puis depuis août 2024 par Loïc Le Loarer. De la même manière que le Flagship européen visait la production de technologies pouvant atteindre un marché,

¹⁰⁹ *Ibid.* p. 20.

¹¹⁰ État français, « Stratégie nationale sur les technologies quantiques », https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/content_migration/document/Dossier_de_Presse_Presentation_de_la_strategie_nationale_sur_les_technologies_quantiques_1372307.pdf, 2021, consulté le 02/06/2025.

d'où son focus sur les « technologies quantiques », la stratégie nationale s'attache au même produit. Un agent de la Direction Générale des Entreprises (DGE), direction affiliée au Ministère de l'Economie et chargée d'accompagner le développement économique des entreprises, me précise en entretien l'objectif de la stratégie nationale :

« L'objectif, ce n'est pas de faire de la physique quantique mais de créer des technologies quantiques avec la seconde révolution quantique. »

Chargeé de mission à la DGE, titulaire d'un doctorat en physique quantique, pour suivre le tissu industriel quantique et la partie de la stratégie nationale qui y réfère

(Entretien du 28/02/2025)

Parmi ces technologies quantiques se trouve l'ordinateur quantique. Je décris dans le chapitre suivant les différents instruments d'action publique qui la composent et comment elle façonne les acteurs et leurs interactions. Cette stratégie est issue d'un travail de crédibilisation de cette promesse par divers rapports administratifs qui reprend des arguments de l'international. L'Union européenne conforte le contexte d'émergence de la stratégie nationale par son dispositif Flagship qui inspire et incite à soutenir les technologies quantiques. Si ce « souci international » est passé par des acteurs et structure la politique française, cette inspiration n'est pas à sens unique : le gouvernement français est intervenu dans la gouvernance du Flagship, et le réseau d'académiques et d'industriels moteur pour le Flagship était également très présent en France et a orienté les discussions dans ces différents espaces.

Les motivations et justifications économiques de la création d'un marché : un pari forcé

Les justifications qui font des technologies quantiques un futur marché reposent sur une vision de la science comme productrice de connaissances sous la forme de prototypes ou de brevets permettant de construire des technologies qui pourront être commercialisées. Ces justifications s'appuient sur le pari d'une révolution, déjà présente pour certains ou en cours pour d'autres, mais qui peine à se justifier par des arguments économiques. En particulier, l'ordinateur quantique ne trouve pas de justification économique alors qu'il est encore largement en cours de développement et soutenu massivement par la stratégie nationale. Ce manque d'arguments pousse les acteurs à parler de *pari* plutôt que d'adhérer sans limites à

la promesse de marché. Pour montrer cette dynamique, j'examinerai dans un premier temps une réunion de rédaction d'un rapport d'experts de l'Académie des Technologies pour le gouvernement afin de saisir le rapport aux justifications économiques de la promesse de marché. Ensuite, j'examinerai, à partir de mes entretiens, le pari formulé par les acteurs lorsqu'ils envisagent cette technologie, et je caractériserai la forme d'adhésion à la promesse de marché qui en découle.

La justification de l'intérêt économique du quantique est souvent intervenue dans mes entretiens, moins comme une information guidant l'action publique que comme un prétexte pour la justifier ou la valider *a posteriori*. Je prends pour exemple la commande d'un rapport par Neil Abroug, ancien coordinateur national (fonction administrative prenant en charge la mise en œuvre de la stratégie nationale et est central dans la construction de la filière en France) qui a quitté ce poste en septembre 2024. Ce coordinateur a commandé lorsqu'il était en poste à l'Académie des technologies un rapport afin de quantifier les retours du marché de l'ordinateur quantique, ou, à minima, les coûts d'investissement. Ce rapport permettrait d'entamer une réflexion sur de nouveaux instruments de financement de la recherche, selon les membres de la réunion. J'ai eu accès à ce rapport en cours d'écriture¹¹¹, dont la cinquième et dernière section, intitulée « Analyse technico-économique de l'écosystème », traite des enjeux de justifications économiques, tandis que les quatre autres discutent les intérêts techniques, l'état de l'art et les applications de l'ordinateur quantique. Cette section finale vise à justifier, voire à quantifier, les futurs investissements dans l'ordinateur quantique et représente l'unique section « non technique » :

« Au-delà de l'analyse technique des applications particulières envisagées pour [l'ordinateur quantique], il s'agit d'esquisser sur quelles bases l'investissement considérable en cours pourrait être justifié »

Extrait d'une version en cours de rédaction du rapport de l'Académie des Technologies sur l'état de développement de l'ordinateur quantique publié en juin 2025 au salon Vivatech

¹¹¹ Le rapport de l'Académie des Technologies est publié lors du salon Vivatech le 12 juin 2025. L'ensemble des analyses qui suivent ont été réalisées avant sa publication, et les passages mentionnés n'ont pas été modifié dans la version publiée. Il est consultable sur le site de l'académie : Lambert, Catherie, Thierry Bonhomme et Gérard Roucaïrol, « État de l'art de l'ordinateur quantique tolérant aux fautes », Académie des Technologies, 2025, https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/06/202505_ordinateur_quantique.pdf, consulté le 11 aout 2025.

Pourtant, dès la première page de cette section, le caractère rationnel, justifié par une quantification, des investissements dans le quantique est relativisé :

« L'impact économique possible identifiable aujourd'hui est très inférieur à la fusion et au génome. De ce point de vue, [l'ordinateur quantique] est plus comparable à l'exemple donné pour la recherche spatiale. On peut identifier des domaines d'applications, mais l'investissement massif sur un sujet incertain semble disproportionné par rapport à l'impact possible. »

Extrait version en cours de rédaction d'un rapport de l'Académie des Technologies sur
l'état de développement de l'ordinateur quantique publié en juin 2025

Comment comprendre cette analyse, dont la prudence tranche avec les promesses de retombées économiques généralement formulées ? Dans le rapport, l'ordinateur quantique est d'abord mis en regard d'autres grands projets technologiques afin de justifier l'ampleur des investissements nécessaires. La comparaison porte sur quatre références : la fusion nucléaire, les vols habités, le projet « Génome Humain » et le CERN, considérés comme des « composantes techno-scientifiques représentant des défis totalement nouveaux à leur époque ou actuellement ». Ces projets présentent toutefois des profils très différents : tous relèvent de la « recherche » (à nuancer pour les vols habités, largement structurés par la course à la Lune), la plupart sont des collaborations internationales (sauf les vols habités qui étaient des projets nationaux), et ils se déploient sur des temporalités très contrastées (le séquençage du génome humain s'est déroulé entre 1990 et 2003, tandis que le CERN existe depuis 1952 et poursuit encore ses travaux).

L'hétérogénéité de ces références permet de cadrer l'ordinateur quantique comme un projet de recherche, et non comme une technologie de marché, les experts ne le jugeant pas encore « mature ». Ce constat oriente la comparaison : l'absence de maturité rend difficile toute estimation de bénéfices économiques, ce qui conduit à rapprocher l'ordinateur quantique du vol habité, seul projet de la liste pour lequel le rapport identifie un « impact économique possible » faible. Dans cette perspective, les justifications avancées sont principalement d'ordre géostratégique : la mise en parallèle avec d'autres projets sert avant tout à soutenir la demande de financements élevés, malgré des retours financiers attendus limités. À titre de comparaison, l'ordinateur quantique bénéficierait de 1,2 milliard d'euros d'investissements privés en capital-risque et d'environ 50 milliards d'euros d'investissements publics et privés

à l'échelle mondiale, contre des budgets allant de 3 milliards à 190 milliards d'euros pour les autres grands projets technologiques, comme celui de la navette spatiale.

Le rapport invite donc à financer le quantique à hauteur des vols habités pour des raisons « géostratégiques ». Il s'agit d'une réorientation de la rédaction, qui cherchait initialement à quantifier les gains espérés pour chiffrer de futures politiques publiques. Lors d'une réunion de rédaction à laquelle j'ai assisté, un expert a expliqué comment l'association du quantique au vol habité a modifié son avis, le conduisant à réduire l'importance des considérations « économiques » au profit de considérations « géostratégiques » :

« Un [relecteur du rapport] met en avant qu'on fait une tentative succincte et superficielle de regarder s'il y a une justification économique pour l'investissement [dans le rapport]. Nous avons fait une comparaison avec d'autres grands projets du passé, et nous concluons que la comparaison la plus pertinente correspond au spatial et aux vols habités. [Ce lecteur] nous dit « les vols habités n'ont jamais été justifié d'un point de vue économique, mais toujours dans une vision géostratégique et de compétition des pays ». Donc nous avons re-rédigé pour refléter plus précisément son point de vue. Cela met un poids important [dans le rapport] sur le géostratégique dans la justification actuelle [de l'ordinateur quantique]. »

Un rédacteur du rapport sur l'état de développement de l'ordinateur quantique de l'Académie des technologies, physicien, pendant une réunion de rédaction après les relectures d'experts de l'académie (Observation du 11/02/2025)

Cet expert constate alors que les justifications du quantique ne se trouvent pas du côté du marché, ce qui remet en question la visée initiale du rapport. Quelques minutes plus tard, l'ancien coordinateur de la stratégie reprend la parole pour souligner l'importance de pouvoir fournir des chiffres et de justifier les investissements, dans ce cas-ci en comparant avec d'autres coûts pour une technologie différente :

« Mais la question se situe au-delà de cet intérêt géopolitique [du développement de l'ordinateur quantique] : sur quel seuil le coût par qubit de qualité a un intérêt par rapport au coût flop dans le calcul haute performance ? On ne sait pas aujourd'hui. »

Neil Abourg, coordinateur national de la stratégie nationale pendant une réunion de rédaction du rapport sur l'état de développement de l'ordinateur quantique, après les relectures d'experts de l'académie (Observation du 11/02/2025)

L'ancien coordinateur cherche à quantifier le coût de construction d'un qubit (« *coût par qubit de qualité* ») et à le comparer au coût (« *coût flop dans le calcul haute performance* ») d'une autre technologie concurrente, le calcul classique dans des centres de supercalculateurs, afin de proposer une trajectoire cohérente de la part de l'État et de décider sur quelle technologie il apparaît plus pertinent d'investir. Cet argument est à nouveau questionné plus tard dans la discussion. Les experts sont invités à discuter librement et donner leur avis sur le rapport. Un expert prend la parole et s'étonne des montants d'investissements pour l'IA, qui a été identifié dans la réunion comme un concurrent du quantique dans les investissements :

« Chercheur en physique quantique : *Le président a parlé de 109 milliards d'euros pour construire un gros centre IA, ce qui représente 10 ans de budget CNRS. On accuse le quantique de faire du hype, je suis complètement perdu.*

Chercheur en informatique quantique : *Tu parles d'investissements scientifiques ou financements totaux ?*

Chercheur en physique quantique : *Les ordre de grandeurs des sommes sont hallucinantes. Il y a un changement d'échelle où on passe du million au milliard !* »

Deux chercheurs rédacteurs d'un rapport de l'académie des technologies sur l'état de développement de l'ordinateur quantique, pendant une réunion de rédaction après les relectures d'experts de l'académie (Observation du 11/02/2025)

Ce caractère impromptu des financements publics sur l'intelligence artificielle, qui suit des dynamiques de « hype » ou de tendances, est critiqué dans la suite de la réunion car des financements aussi massifs menacent l'avènement de l'ordinateur quantique. Deux chercheurs interrogés pendant la réunion précisent « croire » dans la capacité de la filière à construire un ordinateur, à condition que les investissements privés soient maintenus, ce qui est menacé par les avancées en IA qui attirent les financements. Ils soulèvent ainsi le caractère performatif de l'investissement : dans les deux domaines technologiques, l'investissement n'est pas justifié par les capacités de la technologie, mais à l'inverse conditionnent la technologie à atteindre des capacités.

Les deux technologies sont ainsi en concurrence dans l'acquisition des financements privés. Les difficultés de justification des applications de l'ordinateur, et donc des parts de marché qu'il pourrait viser, affaiblissent encore la légitimité de la promesse de marché :

« Nous avons du mal à anticiper les problèmes sur lesquels l'ordinateur quantique pourra aider, donc il y a un risque que les gens se détournent des investissements massifs du quantique. Mais il me semble que si les investissements continuent, alors je suis optimiste [qu'on pourra construire un ordinateur quantique] »

Un chercheur en informatique quantique, rédacteur d'un rapport de l'académie des technologies sur l'état de développement de l'ordinateur quantique, pendant une réunion de rédaction après les relectures d'experts de l'académie (Observation du 11/02/2025)

Devant la prédominance d'enjeux géostratégiques et du modèle de justification économique très incertain, le groupe d'expert ne donne pas de réponse à la question de Neil Abroug, commanditaire du rapport. L'absence de justification économique se traduit au sein de l'État par un manque d'information produit par le marché lui-même. Un chargé de mission présente les difficultés à justifier le quantique comme liée à l'incapacité des investisseurs à identifier ses bénéfices, justifiant l'implication de l'État :

« Il y a une sorte de faille de marché : c'est utile de travailler à développer des ordinateurs, mais pour l'instant ils ne font pas de calculs utiles. C'est pour ça qu'il y a besoin de la puissance publique. On veut avancer sans avoir les hypothèses pour investir, pour faire émerger une filière utile - on l'espère - dans 5-10-15 ans. »

Chargé de mission à la DGE, titulaire d'un doctorat en physique quantique, pour suivre le tissu industriel quantique et la partie de la stratégie nationale qui y réfère
(Entretien du 28/02/2025)

Devant l'incapacité à pouvoir justifier économiquement l'avantage des technologies quantiques, ce marché est présenté comme un *pari*. Voici deux *verbatim* de deux enquêtés qui travaillent dans un cadre administratif permettant d'identifier de quel *pari* il s'agit :

« Donc il y a aussi un écosystème qui est en train de démarrer, qui va faire qu'un jour on aura tout : l'ordinateur quantique [...] puis toute une économie basée sur cet ordinateur quantique. Et... bien sûr, le pari, c'est que si on a les meilleurs ordinateurs quantiques de la planète, on les exportera ; donc un retour sur investissement, un pari en fait. [...] [Le programme ProqCima de développement d'un ordinateur quantique] vient d'un désir de souveraineté économique. Et d'être... pionnier, de faire un pari sur l'innovation de rupture. »

Ingénieur DGA responsable du suivi de la filière industrielle quantique, dont fait partie le programme d'accompagnement de start-up développant un ordinateur quantique ProqCima

(Entretien du 27/03/2025)

« Le postulat de base, c'est qu'il y a une possibilité que [le projet de construire un ordinateur] marche, même si nous n'en sommes pas certains. Nous aurions un problème si ça marchait et que nous étions déclassés pour n'avoir rien fait. Cela ressemble à un pari de Pascal, je l'avais vu passé dans une note probablement écrite par Neil Abroug : cela ne coutera pas grand-chose, il y a des chances que cela fonctionne, même si nous ne sommes pas à l'abri qu'un chercheur en physique théorique nous informe que ça n'arrivera jamais. Par contre, si un autre pays obtient cet ordinateur et que nous avons 5 ou 10 années de retard, nous risquons des problèmes de souveraineté »

Chargé de mission à la DGE, titulaire d'un doctorat en physique quantique, pour suivre le tissu industriel quantique et la partie de la stratégie nationale qui y réfère

(Entretien du 28/02/2025)

Les *verbatim* convergent pour montrer que le pari autour de l'ordinateur quantique est avant tout un cadre d'anticipation projetée opposant deux futurs radicalement différents. D'un côté, l'ingénieur de la DGA dessine un futur optimiste où la France disposerait d'une filière complète (plusieurs types de machines, des applications variées, une économie dédiée) et d'où découlerait un retour sur investissement assuré grâce à l'exportation des meilleurs ordinateurs quantiques. Ce scénario met l'accent sur l'ambition collective (« un jour on aura tout ») et la construction d'une chaîne de valeur aux bénéfices économiques. De l'autre côté, l'horizon alternatif reste neutre : l'ordinateur quantique n'existe pas ou n'apporte rien. Cela crée un déséquilibre qui incite à choisir l'option d'investissement. Le chargé de mission à la DGE reprend cette même dichotomie, mais en inversant le regard : il identifie surtout les risques associés à l'inaction (le retard vis-à-vis de la compétitivité économique) et présente donc le pari comme un acte de prudence obligé pour éviter un déclassement. Dans cette logique, parier sur le quantique apparaît non pas comme une posture aventureuse, mais comme la décision rationnelle lorsque l'alternative est pire.

Ce *pari* remplit plusieurs fonctions pratiques et symboliques. D'abord, il restreint le choix en posant seulement deux issues possibles qui déresponsabilise l'acteur public : si l'investissement ne paie pas, il ne s'agit que d'un pari sur lequel aucun contrôle n'est possible. L'issue est écrite d'avance et les causes sont indépendantes. Et par ailleurs, il force à l'engagement. Cette légèreté, presque ludique, confère au pari une simplicité qui légitime l'engagement financier en contexte d'incertitude. Ensuite, comme l'indique l'ingénieur de la DGA, la posture du pari est aussi une posture active d'anticipation : elle valorise

l'incertitude comme atout, en faisant de l'inconnu le moteur même de l'innovation et la manière de se démarquer. Plutôt que de craindre l'incertitude, le pari lui donne de la valeur, transformant l'imprévisible en valeur potentielle. Cette capacité à créer de la valeur à partir de l'incertitude fonde la légitimité du pari quantique dans les discours de l'État.

Ce rapport à l'ordinateur quantique comme un pari me permet de caractériser le rapport d'adhésion de l'État à la promesse de marché de l'ordinateur quantique. Ici, il n'est plus question de croire dans les applications du quantique, mais plutôt d'adhérer à un programme plus large qui, in fine, développera des bénéfices pour l'État et la société. Le pari est un rapport d'adhésion particulier, qui n'a pas besoin de croire pleinement aux promesses, mais d'avoir des fondations pour croire à l'existence d'une issue favorable, possible et probable. Le pari repose sur un gain économique attendu, mais non certain. Ce rapport à la promesse offre des rapports à la crédibilité de la promesse différents de ce que nous avons traité dans le chapitre précédent.

Le rapport d'adhésion sous la forme d'un pari est un pari qui engage à l'action. Le forçage du pari est tel que le chargé de mission quantique de la DGE le présente comme d'un « pari de Pascal ». Le *pari de Pascal* fait référence à un texte publié à titre posthume en 1670¹¹² du philosophe et scientifique français Blaise Pascal où il cherche à démontrer l'existence de Dieu. Sans faire appel à des considérations spirituelles, Pascal cherche moins à prouver l'existence de Dieu qu'à *faire croire* en Dieu. Son pari se présente sous la forme suivante : il invite d'abord à parier sur l'existence de Dieu, en présentant le fait qu'il n'est pas possible de ne pas parier. Par la suite, il oppose les deux situations, où Dieu existe ou n'existe pas, et identifie pour chacune les gains et pertes selon que l'on ait parié pour ou contre. Devant l'incommensurabilité du *gain* dans le cas où Dieu existe et où l'on a cru en lui (« vous gagnez tout », à savoir le paradis) et parallèlement la faible perte dans le cas où Dieu n'existe pas et où l'on a cru (« vous ne perdez rien »), le pari ressemble davantage à un choix forcé.

Adapté au quantique, ce raisonnement modifie la légitimité du pari envers la promesse quantique : n'ayant que peu de certitudes quant aux capacités de cette technologie, l'État est en mesure de parier, il ne peut pas se soustraire au pari car soit il investit dans le quantique, soit il investit ailleurs. Et s'il croit et que l'ordinateur fonctionne, il recevra les avantages qui

¹¹² Pascal, Blaise, *Pensées*, Les Belles lettres, 2023.

lui donneront une position économique hégémonique. À l'inverse, si l'ordinateur n'est pas faisable ou sans avantage, l'État n'aura perdu que quelques ressources financières. Dans un contexte de restrictions budgétaires, une telle minimisation du scénario négatif est d'autant plus remarquable qu'elle transpose au champ de l'action publique une logique empruntée aux portefeuilles d'investissement privés, où certaines pertes sont jugées acceptables au regard de gains potentiels élevés sur d'autres projets. Cette approche entre alors en tension avec les rhétoriques politiques de disette budgétaire, qui justifient généralement la sélection stricte et la hiérarchisation des dépenses publiques.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre, la promesse de marché a circulé et enrôlé des administrations à des échelles différentes en construisant différents rapports d'adhésions. Elle est issue d'une articulation collective de projections sur les technologies quantiques pour construire un horizon d'attente partagé.

La première section a montré comment, à l'échelle européenne, le Quantum Flagship a érigé les technologies quantiques comme un secteur hautement compétitif. Ce dispositif, décidé par la Commission Européenne et orienté par un réseau académique et industriel, a fait émerger la promesse d'emplois et de ruptures scientifiques tout coordonnant des acteurs autour d'un processus d'innovation linéaire producteur de révolutions technologiques.

J'ai ensuite décrit l'importation française de ces cadres européens par un « souci de l'international ». En s'inspirant des promesses du Flagship, divers rapports administratifs ont légitimé l'investissement de l'État dans le soutien des technologies quantiques par une stratégie nationale. Cette nouvelle manière d'administrer l'innovation en France fait apparaître de nouvelles logiques d'intéressement de l'État aux technologies quantiques, entre leur mise à l'agenda politique européen, le souci international et l'incitation économique à contribuer aux projets européens.

Enfin, j'ai cherché à mettre en lumière comment l'ordinateur quantique apparaît comme un pari économique forcé pour l'administration française. Sans éléments de justifications financières quantitatif, l'État a adopté la posture du pari qui permet l'investissement malgré l'incertitude technique et commerciale. Ce rapport d'adhésion, fondé sur un choix binaire,

engage l'État et crédibilise l'ensemble des promesses de l'ordinateur quantique qui se voit soutenu par la puissance publique.

En somme, ce chapitre a tracé le parcours d'une promesse de marché des technologies quantiques et de son rapport d'adhésion de la comparaison sectorielle au souci international pour finir par un pari économique spécifique à l'ordinateur. Chacune de ces étapes révèle un mode distinct d'adhésion à l'horizon d'attente qui est construit collectivement. Le chapitre suivant prolonge cette analyse en s'intéressant aux effets concrets de ces promesses sur la structuration des acteurs et des organisations : comment la mise en œuvre de la stratégie nationale quantique, par ses dispositifs, ses calendriers et ses financements, réorganise-t-elle les relations entre ministères, laboratoires, entreprises et financeurs pour façonner effectivement la filière quantique française ?

Chapitre 3 : La mise en œuvre d'une politique technoscientifique centrée sur les start-ups

Ce troisième chapitre cherche à saisir la mise en réseau des acteurs de la filière quantique par l'action publique. Alors que les promesses d'applications et de marché définissent des horizons d'attente, il s'agit désormais de comprendre comment ces promesses deviennent efficaces en structurant concrètement les relations entre les espaces scientifiques, industriels, administratifs et financiers. Plus précisément, j'examine comment la stratégie nationale, *via* ses instruments de financement et d'accompagnement, redéfinit les rapports de force et déplace les activités, en faisant des start-ups le pivot de la filière quantique. Ce faisant, cette stratégie inscrit le développement de la filière dans une représentation dominante d'une innovation pensée comme linéaire. Par innovation linéaire, j'entends une conception du progrès scientifique dans laquelle la recherche fondamentale conduit, par enchaînement séquentiel, à des applications industrielles puis à la création de valeur économique, selon le modèle du *linear model of innovation* largement discuté et critiqué en sociologie des sciences (Godin, 2006)¹¹³. Il s'agit ensuite de développer les conséquences de cette redéfinition qui modifie le réseau et structure les financements de long terme sur un régime de promesse craint par certains acteurs et qui renforce ce régime.

Pour éclairer ces dynamiques, je m'appuie sur un ensemble de sources variées. D'une part, je me fonde sur des entretiens avec les pilotes de projets de développement sur l'ordinateur quantique, qu'il s'agisse de projets de collaboration européenne entre science et industrie ou de dispositifs nationaux d'accompagnement de start-ups et de soutien à la recherche. Je m'appuie également sur un entretien avec un partenaire d'un fonds d'investissement spécialisé dans le quantique qui, croisé avec les entretiens auprès d'acteurs administratifs, m'a permis de saisir les logiques de coordination recherchées par l'État et la répartition des rôles entre financeurs publics et privés. À ces entretiens s'ajoutent d'autres discussions avec des agents administratifs et un acteur industriel, qui me permettent d'interroger leurs craintes vis-à-vis des effets du régime des promesses. D'autre part, l'analyse de documents produits par les start-ups (roadmaps, présentations aux investisseurs, rapports d'avancement) offre un

¹¹³ Godin, Benoît, « The Linear Model of Innovation: The Historical Construction of an Analytical Framework », *Science, Technology, & Human Values*, 2006, 31(6): 639-667. <https://doi.org/10.1177/0162243906291865>.

accès direct aux stratégies de publicité des promesses et à leurs modalités de diffusion vers le capital privé.

Le plan de ce chapitre se déploie en deux temps. Dans un premier volet, j'étudierai la mise en réseau organisée par l'État : comment les instruments publics ciblés placent les start-ups au centre de la filière et focalisent les ressources humaines, financières et techniques sur ces entités. Dans un second volet, j'analyserai les effets de cette structuration sur le réseau lui-même. Le rôle de soutien de l'État, temporaire, organise le rôle de promoteur d'innovation que jouent les start-ups, assurant la circulation des promesses et l'attraction de capitaux privés. Les difficultés et tensions soulevées par les acteurs, entre crainte d'une bulle spéculative et nécessité de maintenir l'urgence des promesses, met en tension le régime des promesses et ses effets sur la viabilité de la filière.

Les start-ups comme le moteur de la filière au centre des instruments publics

Dans cette partie, j'examine d'abord comment la stratégie nationale pour les technologies quantiques façonne les relations entre les acteurs du quantique pour en faire une filière centrée sur les start-ups. À travers l'étude de trois instruments publics finançant et encadrant l'innovation, je montre comment ces dispositifs redéfinissent les rapports entre univers de la recherche, start-ups, grands industriels et organismes publics. Au cœur de cette architecture, les start-ups occupent une position pivot : elles concentrent les ressources humaines (doctorants, ingénieurs), financières (subventions, capitaux) et organisationnelles (pilotage par la DGA, accompagnement par la DGE, projets PEPR) mises à disposition par l'ensemble des acteurs. Cette centralisation transforme les pratiques des acteurs qui n'ont pas attendu la filière quantique pour émerger : laboratoires publics, entreprises de conseil, centres de calcul haute performance ou organisme de financement européen voient leurs routines et leurs attentes se reconfigurer pour servir l'innovation « quantique ». Ces adaptations illustrent l'incarnation concrète d'une vision libérale de l'innovation qui s'appuie sur le jeu des promesses technoscientifiques pour structurer et dynamiser un secteur tout entier.

La mise en réseau par les instruments publics place les start-ups au centre

Le gouvernement français élabore une politique technoscientifique à visée économique, visant à construire une véritable filière. Pour la mettre en œuvre, le rôle de chaque acteur est défini par divers instruments publics, sous forme de dispositifs de financement et d'accompagnement des activités. Ces *instruments*, analysés par Lascoumes et Le Galès (2004), reflètent des choix politiques et produisent des effets propres en raison des conventions qui les ont façonnés lors de leur conception, de leur construction et de leur mise en œuvre dans un processus itératif. Ils portent également des « logiques politiques dissimulées » en s'appuyant sur une dimension technique et sur des logiques d'efficacité. En automatisant certains processus, ces outils discrets dépolitissent les mécanismes qu'ils opèrent. Les conventions qu'ils intègrent peuvent être de nature sociotechnique reposant sur des opérations de traduction issues de savoirs et d'expertises techniques, mais aussi de nature sociopolitique, renvoyant aux choix de finalités ou aux représentations des politiques à mener (Chiapello et Gilbert, 2013)¹¹⁴. En particulier, des écarts entre les modèles de décision associés aux instruments et leur mise en œuvre effective peuvent apparaître.

Ces instruments occupent une place très importante dans l'action publique et dans la politique technoscientifique de l'État sur le secteur quantique. L'analyse des dispositifs publics, à l'aune des conventions qu'ils incorporent et des dysfonctionnements qu'ils peuvent engendrer, permet de mettre au jour le rôle de la promesse du marché quantique dans la conduite de l'innovation par l'État et ses effets sur les développements technoscientifiques.

Les différents programmes et dispositifs de soutien à l'innovation dérivent de la stratégie nationale pour les technologies quantiques. Cette stratégie place la production de technologies au centre de ses objectifs afin d'en faire une filière économique de premier rang à l'international. Cette stratégie vise donc à organiser la production, de la recherche à l'industrialisation, en structurant celle-ci autour d'un type d'entité bien spécifique : les start-ups. Ces start-ups sont particulières, car la plupart sont issues de laboratoires et se sont

¹¹⁴ Chiapello, Eve et Patrick Gilbert, *Sociologie des outils de gestion : introduction à l'analyse de l'instrumentation de gestion*, Editions La Découverte, 2013.

développées en France. Elles correspondent à ce qu'on appelle des « spin-offs »¹¹⁵, elles sont créées par d'anciens doctorants, post-doctorants ou chercheurs, qui considèrent parfois la publication d'un article scientifique comme un premier pas vers l'industrialisation d'un résultat de recherche. Doganova (2012) présente dans son introduction le soutien étatique à la création de start-ups comme un phénomène récent, structuré dans les années 1990-2000 avec une loi élargissant les pratiques de transfert des résultats scientifiques vers des acteurs (entreprises et utilisateurs) pour lesquelles ils seraient utiles. Ce type d'organisation vise à développer un produit capable d'accéder rapidement au marché tout en restant très proche de l'académie, ce qui permet de « valoriser » les résultats scientifiques publiés par cet espace-frontière.

Les start-ups du secteur quantique occupent ainsi une position centrale dans la stratégie, en particulier celles qui travaillent à la construction d'un ordinateur quantique. Un agent de la DGE souligne d'ailleurs les autres voies envisageables pour développer un tel ordinateur et met en avant le caractère politique et idéologique de ce choix :

« Il a été décidé [il précisera ensuite « par le Président »] que les résultats de recherche se structureraienr en start-up. Notre objectif [à la DGE] est donc de veiller à ce que cette industrie puisse vendre, fabriquer ses produits, ou les améliorer. [...] Cette stratégie est poussée par le Président qui a un attrait pour la construction des start-ups pour le domaine des technologies émergentes. Nous aurions pu faire autrement, il s'agit ici d'un outil adapté pour sortir du laboratoire. Nous passons donc par des acteurs privés, avec des fonds privés. Nous aurions pu passer par un grand groupe comme EDF ou Atos, qui puisse récupérer ces [résultats de] recherches et les faire vivre. Nous aurions pu aussi créer un grand laboratoire CNRS. [les start-ups sont] plus une modalité de l'air de temps. »

Charge de mission à la DGE, titulaire d'un doctorat en physique quantique, pour suivre le tissu industriel quantique et la partie de la stratégie nationale qui y réfère

(Entretien du 28/02/2025)

La place centrale qu'occupent les start-ups dans les discours, les dispositifs et les outils de mesure de la stratégie résulte d'un choix politique. Ce choix est probablement orienté par

¹¹⁵ En français, *spin-off* est souvent traduit par « essaimage » ou « entreprise issue de la recherche ». Le terme désigne une entreprise créée pour exploiter commercialement des résultats, brevets ou savoir-faire développés dans un laboratoire ou une organisation de recherche, souvent par les chercheurs eux-mêmes.

l'objectif même de cette stratégie. Frédérique Vidal, ancienne ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, évoque explicitement en entretien la volonté de produire des « licornes françaises » via cette stratégie d'accélération, expression désignant les start-ups valorisées à plus d'un milliard d'euros. J'ai également constaté, à travers un entretien avec l'un de ses conseillers, que l'émergence de start-ups est placée au cœur de la stratégie nationale. Les start-ups et leur croissance économique constituent ainsi un critère de réussite partagé par l'ensemble des agents de l'État que j'ai rencontrés. Un agent du Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (SGDSN), service administratif sous l'autorité du Premier ministre responsable de la coordination des services de renseignements et de défense, m'explique les objectifs du service vis-à-vis du développement de l'ordinateur quantique :

« Pour nous, il y a une métrique assez simple [de la réussite des activités du SGDSN sur le quantique], c'est : est-ce que nos start-ups survivent ? D'une part, est-ce qu'elles survivent ? Et, d'autre part, est-ce qu'elles restent souveraines ? »

Ingénieur de l'armement au SGDSN, titulaire d'un doctorat en physique quantique, responsable des enjeux de prolifération d'armes de destruction massive et spécialiste des enjeux de l'ordinateur quantique pour la défense (Entretien du 20/02/2025)

Les start-ups constituent à la fois l'objectif visé par la stratégie et le moyen de valorisation des résultats pour faire advenir un marché scientifique. L'administration cherche ainsi, par la création de start-ups, à valoriser les résultats scientifiques et à faire advenir les promesses émises par ces acteurs. La promesse d'un marché se concrétise à travers ces entreprises, dont le nombre, la croissance, la localisation des chaînes de production et la capitalisation constituent autant de critères de réussite. La start-up se trouve donc au cœur du dispositif de jugement de l'État vis-à-vis de sa stratégie quantique. Comme l'indique Doganova (2012), les start-ups opèrent elles-mêmes un processus de *valuation* : elles mesurent la valeur des résultats scientifiques et les incorporent dans des dispositifs techniques évalués à l'aune de leur potentiel de mise sur le marché. On retrouve ce double statut des start-ups dans les représentations de l'État : elles occupent à la fois la position de moyen par leur valorisation des publications quantiques et celle d'objectif par leurs activités d'évaluation du marché.

La lourde pondération des start-ups dans la stratégie oriente les divers dispositifs qui sont mis en place par l'État, ce qui change les rapports de forces entre acteurs. En m'appuyant sur deux dispositifs de soutien aux start-ups, je cherche à montrer leurs effets sur les relations

entre start-ups et autres acteurs du secteur quantique, et identifier comment les promesses motivent, sont produites et circulent par ces instruments.

Le Programme d'accompagnement des start-ups par l'État : ProqCima

Le programme ProqCima, lancé en 2024 par un communiqué de presse du ministère des armées¹¹⁶, vise à soutenir le développement d'ordinateurs quantiques par cinq start-ups françaises. Il mobilise 500 millions d'euros sur dix ans¹¹⁷, financés par des fonds d'investissement, un montant particulièrement élevé si l'on compare à la stratégie nationale pour les technologies quantiques, qui prévoyait 1 milliard d'euros de financements publics sur quatre ans en 2021. Opéré par la DGA, ProqCima met ces cinq entreprises en compétition : en 2028, seule la moitié d'entre elles (trois start-ups) sera maintenue dans le programme. Une nouvelle évaluation interviendra en 2032 pour sélectionner les deux technologies les plus performantes : celles-ci bénéficieront d'un soutien supplémentaire afin de faire évoluer leurs prototypes (objectif : 128 qubits utilisables) vers des produits industriels opérationnels pour leurs premiers clients (objectif : 2 048 qubits utilisable). Officiellement, ProqCima poursuit la construction d'ordinateurs « utilisables pour les besoins de la Défense », même si, selon un interlocuteur de la DGA, le choix de confier ce programme à la DGA relève avant tout de son expertise technique dans le domaine :

« [l'ordinateur quantique] est une technologie duale. En fait, il s'agit principalement d'une technologie civile. C'est-à-dire que le ministère des Armées a été mandaté par France 2030 pour piloter ce programme. Mais ce n'est pas en raison des applications militaires que nous avons été mandatés, c'est parce que nous savons le faire, nous savons piloter ce genre de projet et c'est une compétence qui est reconnue par les autres ministères. Lorsque le

¹¹⁶ Ministère des Armées, « COMMUNIQUÉ DE PRESSE DU MINISTÈRE DES ARMÉES », <https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/ministere-armees/06.03.2024%20Lancement%20du%20programme%20Proqcima%20et%20notification%20d%E2%80%99accords-cadres%20pour%20le%20d%C3%A9veloppement%20d%E2%80%99ordinateurs%20quantiques%20universels.pdf>, 2024, consulté le 22/05/2025.

¹¹⁷ En comparaison, la stratégie nationale sur les technologies quantiques française investit au total un milliard d'euros d'argent public, il s'agit donc de la moitié de l'effort financier qui est investi dans ce programme, même s'il n'est pas clair que ce programme soit entièrement financé sur le budget de la stratégie nationale de 2021.

secrétariat général pour l'investissement [service du premier ministre qui alloue les budgets d'investissement de l'État] a eu besoin de trouver dans l'État une direction qui soit capable de mener ce type de travail de contractualisation et de suivi, il a pensé à la DGA parce que la DGA est reconnue pour être à l'aise dans ce type de développement technologique. »

Ingénieur DGA responsable du suivi de la filière industrielle quantique, dont fait partie le programme d'accompagnement de start-up développant un ordinateur quantique ProqCima

(Entretien du 27/03/2025)

Le programme ne vise ainsi pas exclusivement la production d'ordinateurs pour des usages militaires, mais plutôt une mise à disposition des compétences de la DGA pour « piloter » ce type de projet d'accompagnement. Ce déplacement des compétences au profit d'un bénéfice économique justifie encore mon hypothèse d'un poids prépondérant des motivations économiques sur les enjeux de défense. Cet intérêt économique pour le domaine militaire entraîne des glissements dans les représentations administratives de ces enjeux. La DGA déploie alors des compétences d'économie stratégique ou de guerre économique pour soutenir les start-ups : suivi hebdomadaire de chaque start-up, sensibilisation et formation aux enjeux réglementaires nationaux et internationaux, discussions avec des investisseurs publics et privés, coaching et recommandations pour des projets de développement au-delà du périmètre strict du programme :

« Nous allons regarder comment se passe cette intégration dans le cloud [lors de la livraison d'un ordinateur de la start-up Pasqal pour un autre projet que celui de ProqCima] et dans le datacenter qui correspond. Puis nous regarderons aussi quels usagers commencent à s'intéresser techniquement à [l'ordinateur et ses] usages concrets. Nous allons également regarder sous l'angle économique ce que Pasqal en tire comme avantage. Je pense que nous allons forcément inciter Pasqal à tirer le maximum de retour d'expérience, même technique, de cette aventure. Parce que c'est aussi évidemment un objectif. »

Ingénieur DGA responsable du suivi de la filière industrielle quantique, dont fait partie le programme d'accompagnement de start-up développant un ordinateur quantique ProqCima

(Entretien du 27/03/2025)

Les administrateurs du programme ne s'intéressent donc pas uniquement au développement de l'ordinateur mais interrogent la start-up Pasqal sur ses autres activités, sur diverses dimensions, dont économique et industrielle. Le périmètre du programme semble donc élargi à l'ensemble des activités des start-ups accompagnées. Comme me l'explique mon enquêté

dans la suite de l'entretien, ces compétences déployées par la DGA ne sont pas nouvelles : la division de la DGA responsable de ce projet s'intéresse traditionnellement aux environnements économique et industriel des entreprises françaises de Défense. Pourtant, ce dispositif met à l'épreuve cette division avec un produit, l'ordinateur quantique, dont les usages identifiés par la stratégie nationale sont essentiellement civils. Par ailleurs, le soutien de start-ups n'est pas habituel à la DGA. L'ingénieur que j'y ai rencontré explique les nombreuses difficultés administratives et réglementaires pour établir un contrat sur huit ans avec des acteurs encore en recherche et développement. Les contraintes et objectifs sont alors « adaptés »¹¹⁸ au contexte d'incertitudes sur les spécifications techniques ou les délais de construction et de livraison. Le dispositif ProqCima met ainsi directement en liaison ces start-ups avec l'État, modifiant les pratiques des deux parties.

En reconfigurant les rapports entre administration et start-ups, ce dispositif redéfinit les modalités de légitimation de l'action de l'État, qui étend son champ d'intervention à des entreprises chargées de construire un ordinateur quantique. Cette légitimation s'appuie sur la promesse d'applications militaires et la menace pesant sur la cryptographie, promesse qui justifie et se voit elle-même renforcée par l'action de l'État mobilisant l'administration de Défense. Ce faisant, le programme crédibilise la promesse de marché en rendant visible, auprès des acteurs concernés, le soutien de la puissance publique : son accompagnement financier et organisationnel anticipe des financements massifs et partage un horizon d'attente avec ses bénéficiaires.

Le Programme et Equipement Prioritaire de Recherche (PEPR) quantique en soutien à la recherche et développement

Un autre dispositif public a émergé suite à la stratégie nationale sur les technologies quantiques. Le Programme et Équipement Prioritaire de Recherche (PEPR) est un programme de financement de la recherche publique sur une grande thématique, mis en œuvre depuis les années 2020 pour chacune des stratégies d'accélération mentionnées en première section de ce chapitre. La stratégie quantique dispose de son propre PEPR, doté de

¹¹⁸ Je n'ai pas pu avoir accès aux contrats ni à plus de détails par mon enquêteur pour des raisons de confidentialité.

150 millions d'euros sur six ans (15 % du budget public total de la stratégie nationale). Ce programme finance des projets dont les thématiques ont été définies par le ministère de la Recherche. Les équipes candidates sont structurées autour de trois organismes nationaux : le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies du Numérique (INRIA) et le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Après l'annonce des PEPR, ces trois organismes ont conduit diverses réunions pour coordonner leur participation (et celle de leurs équipes en partenariat avec des universités). Le PEPR Quantique finance exclusivement des activités de recherche pour des laboratoires publics. Cependant, un chef de division quantique dans un organisme national de recherche précise que les start-ups en bénéficient également :

« Et donc, nous avons trouvé une façon de faire qui permet aujourd'hui que l'ensemble des start-ups [de profiter du dispositif PEPR]. Alors, ce n'est pas encore tout à fait vrai, parce que pour l'une d'entre elles c'est en cours de négociation, mais ça va se faire ; et puis pour une autre, c'est un des projets du dernier appel à projets qui va amener cette composante-là de soutien par un projet du PEPR d'une start-up. [...] Quand je dis soutien, c'est une forme d'interaction indirecte parce que le projet porte sur le sujet, ou un sujet très proche, évidemment un peu en avance de phase par rapport à la start-up, mais complètement en lien avec la start-up. Donc, pour chacune des start-ups que j'ai citées [start-ups construisant un ordinateur quantique] se trouve en interaction avec un projet du PEPR. »

Chercheur en informatique classique au CEA, responsable d'un projet de recherche
d'intégration d'un ordinateur quantique dans un centre de calcul
(Entretien du 27/02/2025)

Les modalités de financement du PEPR Quantique évoluent pour soutenir les activités de recherche et développement des start-ups. Même sans les financer directement, ces projets de recherche financés représentent des moyens humains et financiers alloués à des thématiques proches des développements de ces start-ups. L'instrument de financement est ainsi orienté par les développements techniques des start-ups. Ces start-ups mènent elles-mêmes des activités de recherche, en raison de leur origine académique et de leur statut de spin-off, mais aussi parce qu'elles bénéficient de financements issus de dispositifs français, européens et privés. Ces sources constituent l'essentiel de leurs ressources, leurs ventes de produits et services restant encore limitées. Comme l'explique le CEO d'une start-up dans les communications quantique, les appels à projets de recherche et divers financements de projets académiques permettent à la société de maintenir les activités de recherche. Ce

soutien académique permet à l'entreprise de profiter d'une assise financière pour conserver les emplois et continuer le développement du produit sous la forme de publications scientifique. Ces publications alimentent le cycle de crédibilité scientifique à la fois dans la communauté académique mais aussi, comme nous l'avons vu au premier chapitre, pour crédibiliser les promesses auprès de partenaires et financeurs.

Avec le soutien de ces différents dispositifs, les start-ups françaises disposent d'un rôle central dans la filière quantique formalisée par l'État, qui se traduit matériellement par le monopole dans la construction d'un ordinateur. Aucun laboratoire public ou grande entreprise française ne développe d'ordinateur quantique. Les laboratoires dans le domaine collaborent avec ces start-ups, sous la forme de projets communs, de publications communes ou de co-gestion de contrats de thèse (comme les thèses CIFRE, financées à 50 % par l'État et qui semblent devenues une pratique courante) ou de post-doctorats. Cette allocation des ressources matérielles au profit des start-ups, associée à la mise à disposition de résultats de recherche par les PEPR, au financement et à l'accompagnement par le programme ProqCima, ainsi qu'aux moyens humains mobilisés par des projets ou contrats de travail coportés avec des laboratoires, est organisé par l'État pour faire des start-ups les nœuds de la filière. Ces dispositifs créent autant d'espaces de collaboration et d'exploration (Doganova, 2012) qui « consolident un réseau émergent »¹¹⁹. L'ensemble des acteurs et des ressources sont focalisés et coordonnés dans ou à proximité de ces start-ups, ce qui légitime et crédibilise la promesse qu'ils portent au sujet de l'ordinateur quantique en cours de construction.

La focalisation de la filière sur les start-ups entraîne une réorganisation des autres acteurs. L'État, comme mentionné précédemment, adapte ses activités et doit développer une nouvelle expertise pour accompagner l'innovation « de rupture » proposée par ces entreprises. De même, les chercheurs modifient leurs pratiques dans le cadre des projets les plus étroitement liés au secteur industriel.

¹¹⁹ Doganova, Liliana, *Valoriser la science: les partenariats des start-up technologiques*, Edition Presses des Mines, 2012, pp. 61.

Un projet européen de collaboration entre science et industrie : HPCQS

Par exemple, le projet de recherche européen HPCQS¹²⁰, pour « high performance computing and quantum simulation », lancé fin 2021 et prévu pour se clôturer fin 2025, vise à articuler calcul haute performance et ordinateur quantique. Il prévoit la production de deux ordinateurs quantiques par la start-up française Pasqal, ainsi que l’expérimentation de ces machines dans deux grands centres de calcul situés en France et en Allemagne. Ces ordinateurs quantiques sont très spécifiques : ils constituent une catégorie d’ordinateur quantique appelée NISQ (« Noisy intermediate scale quantum » ou ordinateur quantique bruité), fonctionnant à partir de qubits pas assez stables pour réaliser un grand nombre de calcul mais qui, agencés d’une certaine manière peuvent faire tourner certains algorithmes. Ce type d’ordinateur se veut « intermédiaire » avant l’arrivée d’ordinateurs quantique « universels » disposant de plus de qubits et plus stable, mais encore en développement aujourd’hui. Le projet HPCQS se veut être une première expérimentation de mise à disposition dans des centres de calculs européens d’ordinateurs quantiques tels qu’il en existe aujourd’hui.

Le consortium du projet réunit des partenaires académiques et industriels, parmi lesquels figurent de futurs clients ou utilisateurs potentiels de l’ordinateur quantique. Le financement est assuré par EuroHPC, l’organisation européenne chargée de soutenir l’acquisition d’ordinateurs à haute performance pour les États membres de l’Union européenne. Comme pour la DGA, cette entité n’est pas familière avec l’achat de matériels encore en phase de développement. Sa participation constitue, à l’échelle européenne, une forme de redéploiement d’instruments d’innovation et de recherche au profit de l’ordinateur quantique et de ses constructeurs. Un chercheur impliqué dans le projet explique ainsi les malentendus survenus entre ses activités académiques et les exigences du projet en cours de développement :

« Nous avons l’habitude des réseaux [de recherche] européens, où l’on se réunit pour échanger des idées, mais on n’est pas forcés de faire quelque chose de particulier. Nous avons dit [lors de la candidature] que nous prévoyions d’avoir des résultats, et nous en

¹²⁰ Le projet porte le titre « High Performance Computer - Hybrid Quantum Simulator », combinant calcul haute performance et simulateur quantique hybride. J’ai eu l’occasion d’échanger avec plusieurs partenaires, tant privés que publics, impliqués dans cette initiative.

avons ; mais [en général, dans un projet de recherche européen] nous n'avons certainement pas quelqu'un qui nous dit : "Tu produis ça." [Pourtant] quand nous avons dit que nous fournirions des algorithmes pour le projet, eux [le comité de pilotage du projet de recherche] ont cru que ce serait du code [et non des algorithmes théoriques sous forme de publication scientifique]. Bref, nous nous sommes adaptés, nous avons recruté un ingénieur qui savait développer, qui était intéressé par le quantique, et nous avons pu produire quelques bibliothèques. »

Chercheur en informatique quantique à propos d'un projet de recherche européen en collaboration avec des acteurs académiques et industriels (Entretien du 28/11/2024)

Ce projet a permis l'essor d'une nouvelle manière de collaborer, avec des obligations de résultat prévues par le comité de pilotage. Ces résultats étaient le fruit d'un travail de développement et non d'un travail de recherche fondamentale comme y est habitué le chercheur. Ce projet de recherche a coordonné les acteurs en déplaçant certaines de leurs activités dans le but de permettre à des industriels d'expérimenter l'avantage quantique et ainsi crédibiliser des promesses d'applications. Ces déplacements influent directement sur les rapports d'adhésion aux promesses. Leur circulation des promesses d'applications dans ces espaces expose les partenaires à des déceptions, comme le formule ce chercheur :

« Et là, ça ressemble à du bidouillage pour quelqu'un comme moi [chercheur en informatique], qui n'a pas assez d'expertise, sans doute... Entre nous, j'espère qu'il y a quelqu'un qui comprend pourquoi on fait ça. Moi, d'un point de vue théorique, ça s'arrête là. »

Chercheur en informatique quantique à propos d'un projet de recherche européen en collaboration avec des acteurs académiques et industriels (Entretien du 28/11/2024)

En soulignant le caractère approximatif et dénué d'intérêt théorique, ce chercheur met en cause les objectifs du projet. Les attentes collectives ne lui paraissent plus légitimes, et pourtant il demeure engagé. Il précise dans la suite de l'entretien qu'il s'attendait à autre chose et s'imaginait collaborer avec tous les partenaires, à la manière de « *Turing, dans le film* », faisant explicitement référence à *The Imitation Game* (2014). Ce film raconte l'histoire d'Alan Turing, informaticien membre de l'équipe de cryptographie de l'armée britannique pendant la Seconde Guerre mondiale, impliquée dans le déchiffrement des codes allemands. L'inflation des promesses, qui construit des horizons d'attente grandioses et soutenus par les États, façonne ainsi des visions technologiques nourries de parallèles avec

d'autres innovations : la bombe nucléaire, les premiers ordinateurs, l'intelligence artificielle sont des comparatifs qui m'ont beaucoup été présentés en entretien. Les promesses forgent les attentes en s'appuyant sur ces références culturelles, mais elles entraînent également des désillusions individuelles lorsque la réalité ne correspond pas au grand récit anticipé par les acteurs. Cette déception reste limitée dans le cas de ce chercheur et ne justifie pas d'arrêter la collaboration. Elle montre une friction dans le régime d'économie des promesses.

En plus de déplacer les activités des divers acteurs, l'organisation de la filière quantique autour des start-ups reconfigure également les relations au sein d'autres secteurs, en particulier la filière du calcul haute performance (HPC) sur laquelle le quantique s'appuie. La DGE et la DGA disposent chacune d'un même chargé de mission pour le secteur quantique et HPC. La filière HPC vise à accroître les capacités de calcul classiques, c'est-à-dire à mettre en œuvre des centres dotés d'une puissance de calcul élevée afin de réaliser des traitements particulièrement longs au bénéfice de la recherche ou de l'industrie. À l'échelle européenne, les autorités utilisent la filière HPC pour soutenir le développement de l'ordinateur quantique. Si, aux États-Unis, ce sont des entreprises privées comme Google et IBM qui développent un ordinateur et offrent un accès par cloud à leurs ordinateurs, dans l'Union européenne, ce sont les start-ups qui sont chargées de développer ces ordinateurs. Pour les accompagner, des ordinateurs quantiques sont achetés par la puissance publique et mises à disposition dans de grands centres HPC. HPCQS est l'un des projets destinés à équiper ces centres. Au total, l'Europe a commandé huit ordinateurs quantiques basés sur différentes technologies.

Le choix de s'appuyer sur les environnements HPC n'est pas anodin, comme l'explique un gestionnaire du projet HPCQS : le HPC dispose déjà de clients, de financements et d'infrastructures mutualisés en Europe. En intégrant cette filière existante, les autorités européennes cherchent à tirer parti de ces réseaux d'acteurs et de machines pour promouvoir l'ordinateur quantique. Cette stratégie constraint les centres de calcul à établir un cahier des charges adapté, malgré les incertitudes concernant l'évolution future de ces ordinateurs, incertitudes que j'ai déjà évoquées avec le programme ProqCima. Par conséquent, la reconfiguration du réseau HPC par l'introduction de projets quantiques affecte directement cette filière :

« EuroHPC est une entité d'acheteurs, qui achètent des machines. Donc ils se moquent bien de savoir si ce sont des machines expérimentales ou des machines, des supercalculateurs

[aboutis], pour équiper les centres de calcul. Ce projet [HPCQS] a été monté plus ou moins comme un projet de recherche, avec un gros volet de recherche-application, [...] mais la partie procurement [livraison en tant que telle] s'est très mal passée, parce que la technologie du fournisseur n'est pas prête [et a été livrée avec un an et demi de retard], ce qui fait que les centres de calcul qui participent à ce projet, et en particulier Jülich [Centre de calcul en Allemagne, partenaire du projet] qui est le coordinateur, sont en très mauvaise posture vis-à-vis de EuroHPC, qui est le principal financeur du supercalcul en Europe. »

Membre du comité de pilotage du projet HPCQS et Chef de division quantique dans une entreprise de conseil en calcul quantique pour des industries, spécialisé en informatique et en calcul haute performance pour le quantique (Entretien du 31/03/2025)

Les difficultés réglementaires et opérationnelles liées aux spécificités du quantique viennent impacter les relations entre le centre de calcul allemand et le financeur européen EuroHPC. EuroHPC, comme pour la DGA, fonctionne avec des contrats très précis portant sur les caractéristiques techniques des machines et les délais de livraison. Or, les incertitudes inhérentes au développement des ordinateurs quantiques mettent à l'épreuve ces instruments conçus pour le HPC classique et réemployés. La dimension hybride du projet HPCQS, qui visait à s'appuyer sur les réseaux HPC existants, a ainsi fragilisé les pratiques habituelles : l'intégration d'ordinateurs quantiques expérimentaux oblige les centres de calcul à modifier leurs cahiers des charges, leurs procédures d'achat et leurs calendriers de déploiement. Cette anticipation des promesses, en termes de calendrier et de capacités de calcul, provoque des frictions au sein du réseau : les partenaires, sollicités pour fournir des livrables précis, se retrouvent confrontés à des retards et à des spécifications techniques encore instables. Les promesses exposent ainsi les acteurs à des déceptions lors de la concrétisation des attentes. En déplaçant les activités et en redéfinissant les modalités de collaboration, l'utilisation de ce réseau d'acteurs reconfigure leurs rapports, contraignant chacun à adapter ses pratiques à un horizon d'incertitude technologique.

Cette partie a montré comment la stratégie nationale a structuré un réseau d'acteurs en filière. Les diverses interventions publiques coordonnent des acteurs en déplaçant leurs activités pour focaliser les ressources au sein d'un espace frontière : la start-up. Cette modification de réseaux existants montre la force des promesses une fois inscrites dans les instruments publics. Elle montre également leur force d'enrôlement des acteurs, d'acquisition de ressources et de coordination. Les promesses agissent donc localement au niveau des acteurs.

La partie suivante élargit la focale à l'ensemble de ce réseau d'acteurs : elle interroge les effets collectifs de cette structuration sur le régime des promesses pour comprendre comment son fonctionnement met en crise le régime.

Les effets de la stratégie nationale sur le réseau d'acteurs et le régime d'économie des promesses

La stratégie nationale pour les technologies quantiques déploie aujourd'hui un véritable arsenal d'instruments publics qui organisent et structurent l'ensemble de la filière. Cette mise en réseau affecte les relations entre acteurs, mais aussi le réseau et le régime d'économie des promesses lui-même. Cette section aborde les effets de cette structure, non plus à l'échelle des acteurs mais du réseau. Il s'agit d'identifier comment le désengagement de la filière quantique que prévoit l'État alimente une friction entre un régime des promesses qui doit s'autonomiser par le capital privé, tout en conservant sa capacité de coordination élargie. Alors que l'État prend temporairement à son compte le soutien de la filière, les start-ups sont responsables de formuler et faire circuler les promesses, via des *démonstrations* en laboratoire comme vu dans le chapitre 1, ou des roadmaps techniques, et qui doivent transformer ces promesses en modèles économiques viables. Pourtant, cette intervention de l'État est perçue comme très forte par la plupart des acteurs. L'état de la filière, jugée « artificielle », suscite des craintes : certains redoutent l'éclatement d'une bulle spéculative faute de viabilité à long terme, d'autres craignent que la fin des financements publics n'emporte la filière tout entière. Face à ces incertitudes, les start-ups multiplient les promesses temporelles pour maintenir le régime d'économie des promesses. À l'inverse, plusieurs industriels préfèrent limiter leur engagement à de la veille ou à des contrats courts, refusant de s'exposer à la volatilité de ces promesses. Je vais explorer dans cette partie ce tiraillement entre une volonté d'atteindre l'autonomie de la filière par un soutien public continu et la peur d'un « hiver quantique ».

Il s'agira dans un premier temps d'étudier la perspective de soutien de la filière par l'État qui souhaite son désengagement alors même que cet engagement est producteur de légitimité et crédibilité. Je chercherai ensuite à montrer le rôle de promoteur de l'innovation qu'incarnent les start-ups dans le modèle linéaire de la stratégie nationale par l'étude d'une roadmap. Enfin, je décrirai les craintes des acteurs devant le régime des promesses qui

fragilise la filière économique fondé sur des start-ups tout en amplifiant l'urgence des promesses par ces mêmes start-ups.

Le soutien de l'État à la filière comme tension entre force et fragilité financière

Au sein de l'État, la filière quantique est pensée comme un enchaînement linéaire d'acteurs. En amont, les laboratoires de recherche génèrent des résultats, tandis que les fournisseurs de ces laboratoires créent les conditions matérielles nécessaires à l'expérimentation. Les fournisseurs ciblés par la stratégie quantique relèvent de secteurs variés : fabrication d'équipements cryogéniques, fourniture de lasers ou encore électronique cryogénique¹²¹. En aval, des acteurs industriels sont perçus comme de futurs clients et sont incités par l'État à collaborer avec les constructeurs d'ordinateurs quantiques pour conduire des projets de recherche appliquée dans le cadre de leur veille technologique. Il s'agit de grands groupes français qui mènent des activités de calcul significatif, tels qu'EDF, TotalEnergies ou Thalès. Ces industriels sont souvent accompagnés par des cabinets de conseil spécialisés dans l'évaluation des capacités des ordinateurs quantiques et des algorithmes en développement : par exemple, Atos-Eviden propose des logiciels permettant de tester les algorithmes et d'identifier le nombre et la qualité des qubits nécessaires à l'obtention d'un avantage compétitif. Lors de mon entretien à la DGE, j'apprends le souci de l'État d'intervenir tout le long de cette ligne en apportant les ressources financières, les cadres légaux et réglementaires, les ressources humaines formées à la hauteur des besoins de ces différents acteurs. Comme l'a montré la section précédente, les start-ups occupent une position centrale dans la filière, collaborant étroitement avec les acteurs en amont et en aval dans le cadre de divers projets et programmes d'accompagnement principalement financés par des fonds

¹²¹ Les prototypes d'ordinateurs quantiques peuvent fonctionner avec divers types de systèmes physiques en guise d'unité de calcul (le qubit) : des atomes ou des ions piégés en vide, des circuits supraconducteurs refroidis à très basse température, ou encore photons confinés en cavités optiques. Chacune de ces voies demande un environnement expérimental spécifique : des dispositifs pour plonger les qubits à de très basses températures pour limiter conserver leurs propriétés quantiques, des lasers stabilisés pour piéger et contrôler les atomes, de l'électronique bas bruit et blindage magnétique pour réduire les parasites, des sources de photons uniques, du vide ultra-poussé, ou encore de la métrologie de haute précision. Ces dispositifs sont fournis par des filières spécialisées qui adaptent des matériels aux besoins des équipes R&D. Dans la filière, on désigne cet ensemble sous le nom de « technologies habilitantes » et constituent les fournitures et matières premières pour construire des ordinateurs quantiques à ce jour.

publics. Dans ce contexte, un fonds d'investissement décrit la situation économique de la filière de la manière suivante :

« Les pouvoirs publics sont des acteurs importants pour nous parce que les montants qui sont investis par tous les pays dans le monde représentent... Si on fait la somme arithmétique, même si ce n'est pas un calcul juste... de tous les plans quantiques dans le monde, cette somme atteint un montant de 60 milliards. Certains plans quantiques sont sur 2 ans, d'autres sur 3 ans, d'autres sur 5 ans, donc il n'est pas possible d'en tirer un montant investi par les pouvoirs publics chaque année. Néanmoins, il s'agit d'un ordre de grandeur. Quand on regarde l'argent privé qui est investi par des fonds d'investissement tels que le nôtre dans des startups du secteur, le montant atteint 2 milliards à 2,5 milliards par an. Donc ça veut dire que c'est un secteur qui est financé beaucoup plus par le public que par le privé. »

Partner d'un fonds d'investissement français spécialisé dans les technologies quantiques

(Entretien du 18/04/2025)

Cet investisseur dans les technologies quantiques souligne une prépondérance des financements publics sur le marché mondial. La justification qu'il présente repose sur une évaluation complexe intégrant plusieurs plans quantiques nationaux variables en durée, en montants et en technologies privilégiées. L'investisseur compare néanmoins un ordre de grandeur de 60 milliards d'euros de financements publics à 2-2,5 milliards d'euros de financements privés annuels. Cette comparaison brute soulève des questions sur la capacité à décrire plus finement la filière : la plupart des chiffres disponibles dans les rapports ou recueillis lors d'observations restent globaux et ne distinguent pas, par exemple, les types d'ordinateurs financés. Je n'ai pas réussi à élaborer d'hypothèses solides pour des outils quantitatifs aussi généraux, qui ne permettent pas d'appréhender l'état du marché de manière nuancée.

Pour ce partenaire, la forte participation de l'État dans la filière confère à ce dernier une latitude importante dans l'orientation technologique. Selon lui, il est donc crucial de dialoguer avec les représentants de l'État afin de comprendre précisément leurs attentes vis-à-vis de la technologie quantique. La promesse de marché, portée par l'ensemble des acteurs, n'engendre pas automatiquement un horizon d'attente partagé. Chaque partie projette ses propres temporalités et ses propres objectifs. La clarification de ces horizons, par le biais de réunions et d'échanges avec diverses administrations, est perçue par ce partenaire comme un moyen de réduire l'incertitude, de coordonner les ressources et de consolider le rôle

structurant de la promesse de marché. Les agents de l'État que j'ai rencontré assument ce rôle d'anticipateur et de structurant : l'État est le principal promoteur de la promesse et organise la coordination des acteurs autour des bénéfices économiques attendus.

« Il y a une sorte de faille de marché : c'est utile de travailler à développer des ordinateurs, mais pour l'instant ils ne font pas de calculs utiles. C'est pour ça qu'il y a besoin de la puissance publique. On veut avancer sans avoir les hypothèses pour investir, pour faire émerger une filière utile - on l'espère - dans 5-10-15 ans. »

Chargé de mission à la DGE, titulaire d'un doctorat en physique quantique, pour suivre le tissu industriel quantique et la partie de la stratégie nationale qui y réfère
(Entretien du 28/02/2025)

Ce *verbatim*, que j'ai déjà présenté comme justification de l'action de l'État, illustre sa démarche d'anticipation et d'intervention élargie pour diminuer les incertitudes. En soulignant l'existence d'une « faille de marché », l'agent identifie l'absence de valorisation immédiate des ordinateurs quantiques comme une question d'anticipation et d'information : tant que ces ordinateurs quantiques ne produisent pas de calculs utiles, le secteur ne pourra pas attirer seul les financements privés nécessaires à son développement. Dès lors, l'intervention de la puissance publique apparaît comme indispensable pour combler ce déficit : elle permet de soutenir la recherche et le développement « sans avoir les hypothèses pour investir », c'est-à-dire en l'absence de garanties de rentabilité à court terme.

Pourtant, ces multiples interventions pour structurer la filière fragilise sa crédibilité en lui conférant une dimension « artificielle ». Pour de nombreux acteurs, en particulier scientifiques, la configuration actuelle apparaît comme un champ modelé par les politiques publiques plus que par une dynamique spontanée du marché. Certains redoutent l'émergence d'une bulle spéculative : à force de subventions et d'appels d'offres, le secteur pourrait voir éclore un nombre excessif de start-ups dépourvues de viabilité technologique ou économique à long terme. D'autres acteurs, en particulier des industriels, considèrent que la qualité du marketing des jeunes entreprises reste insuffisante pour convaincre un grand public ou des investisseurs institutionnels de la solidité de leur promesse. Enfin, l'État lui-même précise qu'il n'est ni souhaitable ni durable de maintenir une participation majeure à long terme :
« ProqCima [le programme d'accompagnement de l'État pour les start-ups développant un ordinateur quantique] ne pourra pas assurer le besoin en financement complet du développement d'une start-up de très haute technologie comme le quantique. Et il faut quand

même qu'elles arrivent à trouver des investisseurs ou des partenariats industriels qui leur permettent d'aller jusqu'au bout de la viabilité économique, d'un modèle économique qui sera viable. »

Ingénieur DGA responsable du suivi de la filière industrielle quantique, dont fait partie le programme d'accompagnement de start-up développant un ordinateur quantique ProqCima
 (Entretien du 27/03/2025)

L'ingénieur de la DGA souligne d'abord les limites du soutien public au travers du programme ProqCima. Il reconnaît qu'après avoir fourni un soutien initial substantiel, l'État doit déléguer le relais au marché privé. Cette prise de position traduit une volonté de « fermer le cycle » de la valeur, de transformer la filière en un « cercle vertueux » (Frédérique Vidal) et de la rendre autonome du soutien étatique. La *figure IV* schématisé ce cercle constitué des acteurs de la filière mis en réseau par l'État qui soutient toute la chaîne linéaire de l'innovation. Pour fermer le cycle, des investisseurs doivent apporter des capitaux pour permettre l'achat des matières premières et mettre en œuvre la recherche et développement en considérant les applications potentielles de l'ordinateur. L'État injecte donc des fonds pour assurer la crédibilité de la promesse de marché par les start-ups, et exige en retour que ces dernières démontrent rapidement leur capacité à attirer des capitaux privés et à établir des partenariats industriels pérennes.

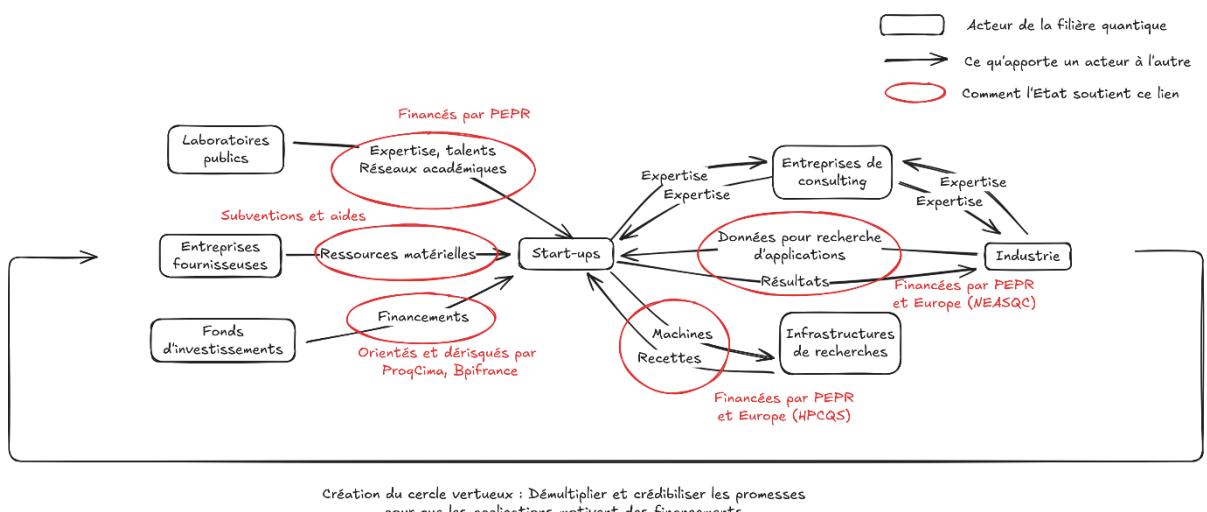


Figure IV : Schéma représentant les différents acteurs de la « filière quantique » et les soutiens de l'État par diverses voies de financements. Les start-ups sont au centre de la stratégie, et tous les dispositifs de l'État visent à soutenir ces acteurs en particulier. Réalisé par l'auteur.

La production des promesses par les start-ups comme vision long terme de l'économie de la filière

Les start-ups, au centre de la filière, mesurent leur réussite par leurs levées de fonds et leur capitalisation. Elles sont responsables de la circulation des promesses de marché auprès de nouveaux investisseurs. Elles mettent en place un ensemble de discours et d'objets, comme des démonstrations, pour faire circuler et créer l'adhésion aux promesses. L'outil majeur utilisé par les start-ups pour crédibiliser ces promesses et attirer de nouveaux investisseurs est la roadmap. Le *partner* du fonds d'investissement sur les technologies quantiques m'explique qu'il s'agit d'un outil faisant partie des critères d'investissement :

« Les critères de choix des sociétés [lors d'un investissement du fonds] sont : d'abord la science. Il faut que l'équipe de recherche soit parmi les meilleures au monde sur le sujet sur lequel elle travaille. Ensuite, l'équipe en elle-même : Est-ce que l'équipe face à nous va réaliser une expérience de labo et la transformer en un prototype, puis la transformer en produits un peu plus industriels. Et enfin, nous regardons vraiment la roadmap, c'est-à-dire les étapes technologiques et les moyens associés qu'il va falloir développer pour développer la techno [...] Nous, le gros travail, une fois qu'on a la science, l'équipe, c'est vraiment de travailler avec eux sur la roadmap, l'argent dont ils ont besoin pour passer telle étape. Et est-ce que chacune de ces étapes, on pense que ça peut représenter quelque chose d'attractif pour faire rentrer de nouveaux investisseurs. »

Partner d'un fonds d'investissement français spécialisé dans les technologies quantiques

(Entretien du 18/04/2025)

Les critères de sélection des sociétés par ce fonds d'investissement sont explicitement définis selon trois axes principaux : la qualité scientifique, la composition de l'équipe et la viabilité de la « roadmap » (feuille de route en anglais) technologique. La roadmap, par sa forme, circule entre les acteurs et en fait objet particulièrement efficace pour faire circuler les promesses. Une feuille de route prospective, ou « roadmap », décrit chronologiquement les étapes de développement technologique et les ressources financières associées. La roadmap d'une start-up traduit la promesse d'application en un calendrier concret, en associant les avancées scientifiques à des jalons de prototypage, de tests en environnement réel et de qualification pour la production industrielle. D'après le *partner* que j'interroge, elle explicite également la promesse de marché en alignant les « moyens » financiers avec des objectifs précis de valorisation et d'attraction de nouveaux investisseurs. L'importance accordée à

cette feuille de route s'explique par son rôle pivot dans les discussions entre start-ups et investisseurs : elle constitue à la fois un outil de communication et un instrument de négociation. La roadmap circule activement dans les réunions de négociation et fait l'objet d'une relecture attentive de la part des investisseurs pour s'assurer de la cohérence du projet et de sa capacité à lever des fonds dans le futur. Un doctorant au sein d'une start-up quantique m'a également précisé avoir relu et ajusté la roadmap de son entreprise afin de valider les chiffres et le contenu. Ne disposant que des roadmaps publiques publiées par plusieurs start-ups, j'en analyse ici un exemplaire afin de montrer comment ces entreprises mettent en scène leur calendrier et formulent leurs promesses à l'adresse d'un large public plutôt que d'investisseurs spécialisés. La roadmap d'Alice et Bob (2024)¹²², une start-up cherchant à construire un ordinateur quantique, est présentée *figure V*.

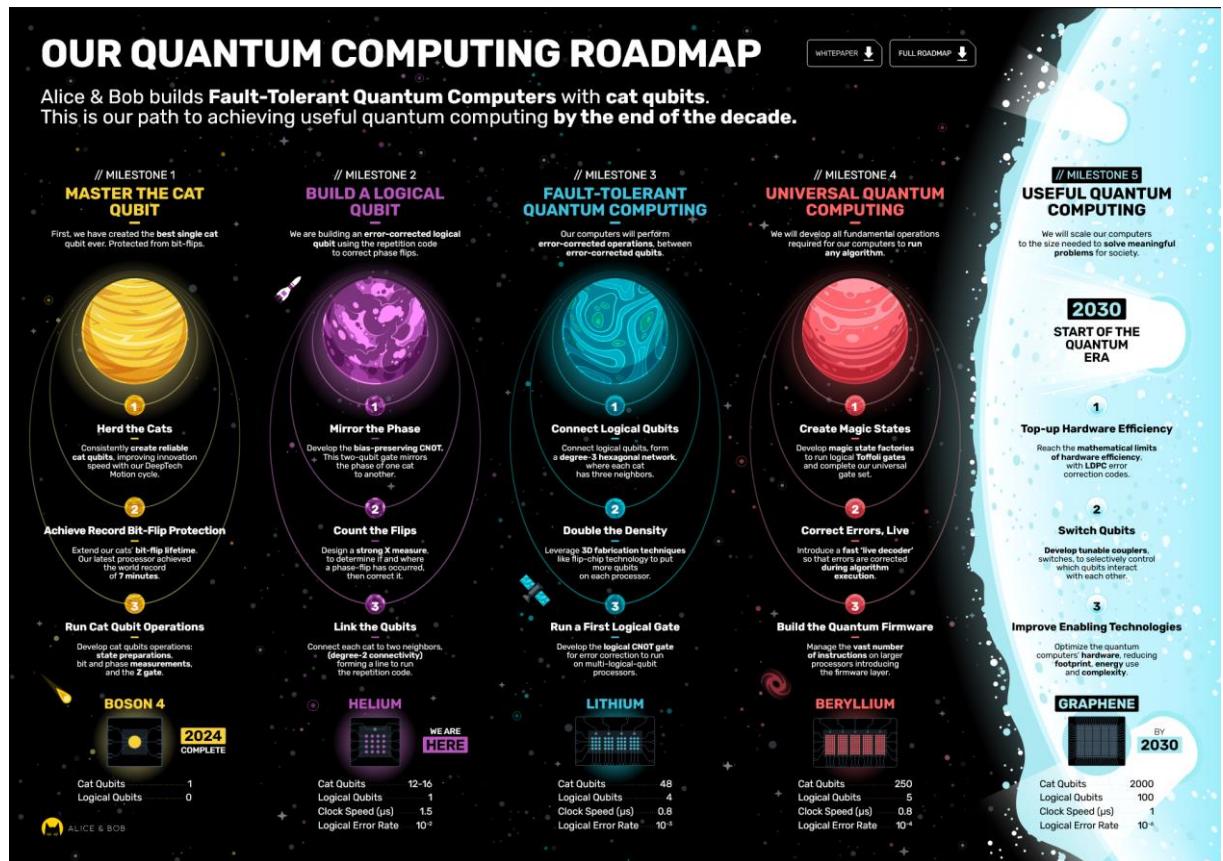


Figure V : roadmap de la start-up Alice et Bob qui construisent un ordinateur quantique. Disponible sur leur site internet¹²³.

¹²² Alice et Bob, « Our quantum computing roadmap », <https://alice-bob.com/wp-content/uploads/2024/12/Alice-Bob-Roadmap.pdf>, consulté le 23/05/2025.

¹²³ Ibid.

Cette roadmap, diffusée publiquement en anglais sous la forme d'un document d'une page pour en faciliter la circulation, est également disponible en « version longue » qui explicite chacune de ses étapes. Elle se distingue d'emblée par une identité graphique très marquée : couleurs saturées, planètes aux allures de science-fiction, satellites et fusées évoluant dans un décor intersidéral. Avant même que le texte ne formule la moindre promesse, l'iconographie place donc le récit de la start-up dans un horizon technique grandiose.

Le document s'ouvre sur trois informations mises en évidence : d'abord l'objectif de construire un *fault-tolerant quantum computer*, c'est-à-dire un ordinateur quantique universel, capable d'exécuter tout type d'algorithme. Ensuite, il mentionne la voie technologique retenue, les *cat qubits* (« qubits de chat »), qui constituent l'unité physique de calcul développée par l'entreprise. Enfin, le document présente l'horizon temporel, « *by the end of the decade* », qui situe l'aboutissement attendu à l'échéance 2030. En deux phrases, la start-up associe ainsi un but, une solution technique et un calendrier, posant les bases de la promesse d'application qu'elle énonce.

Pour matérialiser cet objectif, la roadmap déploie cinq *milestones* figurés par des planètes. Chacune est entourée de trois défis technologiques représentés sur des orbites distinctes, de sorte que l'itinéraire s'apparente à un voyage spatial : l'entreprise progresse de planète en planète, effectuant des « manœuvres » pour gagner l'élan nécessaire à l'étape suivante. À chaque palier, un pictogramme laisse apparaître un nombre croissant de points lumineux symbolisant l'augmentation du nombre de qubits que l'ordinateur quantique devrait contenir. Quatre indicateurs chiffrés sont donnés pour chaque étape : le nombre total de qubits, nombre de qubits logiques (c'est-à-dire exploitables comme unité de calcul car peu soumis aux erreurs), la fréquence de calcul et le taux d'erreurs. Ces chiffres présentent une amélioration graduelle quantitative au fil des verrous franchis.

La première étape est déjà marquée « *complete* », la start-up se situe officiellement à la deuxième, tandis que la cinquième porte le titre évocateur de *start of the quantum era*. Par cette formule, l'entreprise laisse entendre que l'avènement de son ordinateur inaugurerait une nouvelle période de l'histoire technologique, dans le prolongement des notions de « seconde révolution quantique » ou de « suprématie quantique ». Ce document condense ainsi les ressorts de *démonstration* analysés au chapitre 1 : en utilisant des compétences à la fois techniques et graphiques, il met en récit le projet comme un périple intersidéral vers un espace inédit, légitimant et crédibilisant les attentes suscitées.

L'amplification du régime d'économie des promesses par l'anticipation des désillusions

Les start-ups sont conçues pour produire des promesses, tandis que l'État bâtit leur légitimité et leur crédibilité en mobilisant les réseaux d'acteurs et de ressources qui les entourent. Ces entreprises deviennent alors responsables de déployer ces promesses par des *démonstrations* ou des discours d'anticipation, comme les roadmaps. Ce rôle de promoteur, confié à des acteurs eux-mêmes soutenus par l'État dans des configurations parfois artificielles, fragilise le réseau. Mes enquêtes montrent, comme chez Borup et al. (2006), des moments de déception et de limitation des ressources disponibles. Borup et al. décrivent les attentes technoscientifiques comme un cycle oscillant entre engouement et désillusion : les promesses mobilisent d'abord capitaux et compétences, puis s'étiolent lorsque les résultats tardent, exposant les acteurs à un décrochage brutal. Cette dynamique a été intégrée par des acteurs de l'innovation, comme le groupe Gartner qui a créé le modèle du « cycle de la hype » (voir *figure VI*), sous la forme d'une courbe reliant diverses étapes du « le pic des attentes » au « gouffre de la désillusion ». Ce modèle illustre comment des acteurs peuvent s'approprier des concepts tels que le cycle présenté par Borup et al. (2006).

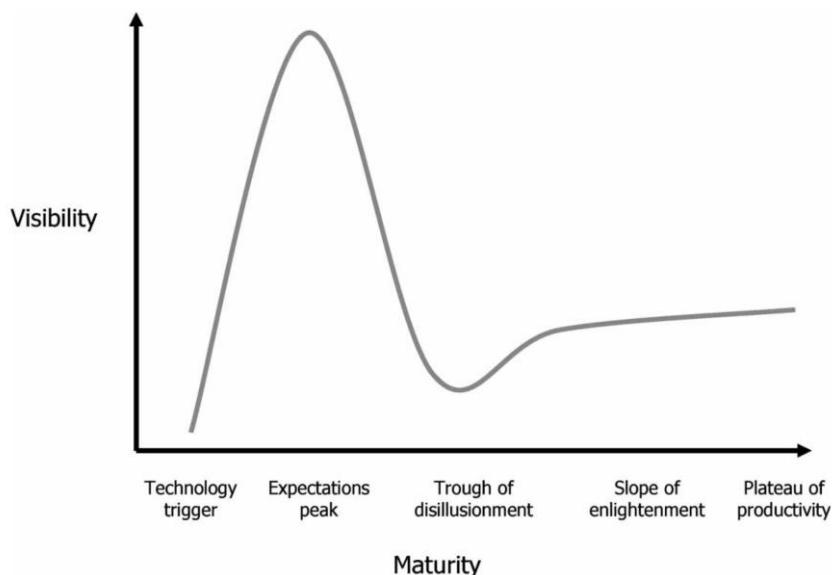


Figure VI : modèle du « cycle de la hype » développé par le groupe Gartner pour décrire la trajectoire des innovations technologiques. Figure issue de Borup et al (2006)¹²⁴.

¹²⁴ Reprend la figure 1 issue de Borup, Mads, Brown ,Nik, Konrad ,Kornelia, et Harro and Van Lente, « The sociology of expectations in science and technology », *Technology Analysis & Strategic Management*, 2006, 18(3-4): 291. <https://doi.org/10.1080/09537320600777002>.

Le secteur du quantique anticipe lui-aussi cette dynamique, comme je l'ai observé chez plusieurs acteurs scientifiques, administratifs ou industriels qui mentionnent le risque d'un « hiver quantique ». L'un des enquêtés redoute que la filière n'ait pas été pensée pour poursuivre ses développements une fois que le régime des promesses se sera épuisé :

« Tout le monde annonce depuis quelque temps l'hiver quantique. [...] l'IA a connu trois hivers avant d'être enfin sur les rails. Et le phénomène était un peu comparable. C'est-à-dire qu'il y a 30 ans, on disait que les systèmes experts allaient remplacer les médecins, ou à peu près tout. Il y a eu de gros investissements, des déceptions, donc la technologie a été boudée. Et puis de temps en temps l'intérêt revenait. Beaucoup se disent qu'il va y avoir l'hiver quantique. Ne survivront alors que ceux qui ont les poches profondes ou qui sont les plus frugaux. Et puis, l'intérêt reviendra un jour, ou pas. Sauf que dans notre cas, chez les start-ups, c'est du capital risque [c'est-à-dire de l'investissement dans le capital d'une entreprise]. Donc, ils préfèrent vite jeter une boîte plutôt que continuer à mettre la main au portefeuille. »

Chef de division quantique dans une entreprise de conseil en calcul quantique pour des industries, spécialisé en informatique et en calcul haute performance pour le quantique

(Entretien du 31/03/2025)

Ce chef de division quantique dans une grande entreprise anticipe un « hiver » quantique, calqué sur le modèle des « hivers » observés dans d'autres domaines technologiques. Cardon et al. (2018)¹²⁵ décrivent ces périodes comme celles qui succèdent à de grandes annonces et promesses scientifiques ne donnant pas de résultats à la hauteur des attentes. Après un pic de publications qu'ils analysent comme un changement de paradigme, les innovations peinent à se concrétiser, entraînant un désengagement progressif des financements académiques et un ralentissement des recherches jusqu'à ce qu'un nouveau paradigme refasse surface et suscite à nouveau des résultats préliminaires prometteurs. De nombreux acteurs du secteur quantique redoutent de la même manière une diminution prolongée des financements. Selon ce chef de division, le principal risque qu'incarne cet « hiver quantique » est la réduction du soutien financier de l'État : lorsque les promesses perdent

¹²⁵ Cardon, Dominique, Jean-Philippe Cointet, et Antoine Mazières, « La revanche des neurones: L'invention des machines inductives et la controverse de l'intelligence artificielle », *Réseaux*, 2018, 211(5): 173-220. <https://doi.org/10.3917/res.211.0173>.

leur force de légitimation, ni l'intervention publique ni la réalisation des attentes ne sont justifiées à la hauteur de ce qu'elles étaient. Dans ce scénario, les start-ups seraient les premières affectées, car elles disposent d'une faible trésorerie pour poursuivre le développement de l'ordinateur quantique. La concentration des moyens, financiers mais aussi en matière d'infrastructure de recherche ou de ressources humaines affecterait l'ensemble des acteurs et de la filière. Sur son blog, le consultant Olivier Ezratty¹²⁶, analyse les intérêts et les limites de la « hype quantique » :

*« Les hypes ne sont pas mauvaises en soi puisqu'elles créent une émulation, stimulent les innovations et contribuent à attirer de nouveaux talents. Cela fonctionne lorsque les scientifiques et les fournisseurs apportent des progrès et des innovations de manière continue après un pic d'attentes. Elle échoue lorsque les surpromesses et l'absence de résultats perdurent trop longtemps. Elle peut réduire le financement de la recherche et de l'innovation à moyen et long terme. »*¹²⁷

La crainte d'un « hiver quantique » représente donc moins la peur d'un échec technologique que le risque de la fin du régime d'économie de la promesse du secteur quantique. Dans le billet de blog d'Ezratty, les start-ups sont présentées comme des victimes de ces hivers : « Les startups concernées ont échoué avant même d'avoir pu commencer à commercialiser leur matériel »¹²⁸. La concentration des moyens par un acteur étatique, en investissant sur des acteurs à l'interface entre réseaux académiques et industriels et adossés à des filières, focalise également le risque sur des acteurs peu protégés contre les fluctuations financières.

Certains acteurs industriels s'intéressent au quantique sans participer pleinement à la filière : ils préfèrent organiser une interface via des contrats courts, académiques et limitant les

¹²⁶ Olivier Ezratty, ingénieur de formation, a travaillé dans les télécommunications avant de se tourner vers l'écriture et l'expertise technologique. Depuis 2021, il publie chaque année un rapport volumineux (plus de 1 500 pages pour la dernière édition) sur l'état des technologies quantiques : Ezratty, Olivier, « Understanding Quantum Technologies », <https://www.oezratty.net/wordpress/2024/understanding-quantum-technologies-2024>, 2024, consulté le 13/01/2025. Il intervient également comme expert invité dans plusieurs arènes institutionnelles, dont l'Académie des technologies : Lambert, Catherie, Thierry Bonhomme et Gérard Roucaïrol, « État de l'art de l'ordinateur quantique tolérant aux fautes », Académie des Technologies , 2025, https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/06/202505_ordinateur_quantique.pdf, consulté le 11 aout 2025.

¹²⁷ Ezratty, Olivier, « Comment atténuer les effets indésirables de la hype quantique ? », <https://www.oezratty.net/wordpress/2022/comment-attenuer-les-effets-indesirables-de-la-hype-quantique>, 2022, consulté le 06/06/2025.

¹²⁸ *Ibid.*

risques d'investissement, afin d'éviter une exposition trop large par rapport à la crédibilité et à l'anticipation des promesses. Le même chef de division quantique accompagne de potentiels clients en leur présentant les capacités, les échelles temporelles de développement et les usages des ordinateurs quantiques. Comme il le décrit, les acteurs se détachent plus qu'ils ne se rapprochent des start-ups devant l'incertitude, en particulier temporelle, des bénéfices pour leur activité :

« Aujourd'hui, je ne connais personne [aucun industriel visé par les promesses d'applications de l'ordinateur quantique] qui se lance vraiment dans le quantique. Ça reste vraiment un sujet de veille. Auparavant, il y avait des entreprises qui voulaient faire de la veille mais ils ne trouvaient personne pour les accompagner. Nous les avons conseillés de prendre des doctorants. [...] [L'objectif était] d'avoir les bons interlocuteurs en face. Par exemple, EDF ou Total ont maintenant des doctorants, ils ont un réseau académique qui leur permet de maintenir la veille sur cette activité. Ils ne sont absolument pas dans une perspective d'investissement massif. »

Chef de division quantique dans une entreprise de conseil en calcul quantique pour des industries, spécialisé en informatique et en calcul haute performance pour le quantique

(Entretien du 31/03/2025)

Ce chargé de la division quantique souligne la participation très limitée des industriels dans le développement du quantique. Ces acteurs ne s'engagent pas dans la recherche appliquée ni dans la fabrication de cas d'usage, mais maintiennent plutôt une posture de « veille ». Leur implication se limite à financer des doctorants et à tisser un réseau académique pour suivre les avancées scientifiques, sans pour autant passer de commandes ambitieuses ni prévoir des déploiements à grande échelle. Cette attitude essentiellement académique plutôt qu'opérationnelle montre les limites des promesses qui cherchent à les atteindre. Sans rejeter les promesses qui leur sont faites par les start-ups, ces acteurs préfèrent ne pas engager d'investissements lourds tant que les technologies restent incertaines.

Cette posture correspond à une forme alternative de circulation des promesses : au lieu de s'inscrire dans le régime économique de l'investissement massif, ces acteurs restent en retrait, sans être tout à fait désengagés. Ce comportement introduit de nouvelles temporalités dans la filière. Alors que ces acteurs ne considèrent qu'un horizon de trois à cinq ans (d'après le chef de division), ils instaurent un nouveau rythme de collaboration avec la filière et en particulier les start-ups qui prévoient leur premier ordinateur en 2030.

Cette réticence d'une partie du monde industriel fait l'objet d'un travail constant de la part des start-ups pour engager ces acteurs à travers des promesses. Elles s'efforcent de souligner l'urgence, de précipiter l'action et de convaincre qu'un ordinateur quantique viable apparaîtra « bientôt ». Si tous les acteurs que j'ai rencontrés considèrent qu'un jour un ordinateur quantique existera et offrira certaines applications, la plupart d'entre eux se demandent : « quand ? ». Pour légitimer leur projet et justifier de nouveaux financements, les start-ups misent donc sur une stratégie de mise sous pression temporelle. De la même manière, un agent du SGDSN présente le problème de l'ordinateur non comme un problème d'incertitude sur les capacités de l'ordinateur quantique qui sont toutes prises pour acquis, mais plutôt une question de temporalité qui permet de justifier l'administration de passer à l'action. L'investisseur que j'ai rencontré m'a également indiqué qu'il s'agissait de l'unique question qui se pose :

« *Le sujet, ce n'est pas est-ce que [l'ordinateur quantique] va arriver ? Le sujet, c'est quand ?* »

Partner d'un fonds d'investissement français spécialisé dans les technologies quantiques
(Entretien du 18/04/2025)

Comme l'ont souligné Joly et Renard (2022)¹²⁹, les promesses technoscientifiques sont des moyens de stabiliser l'avenir en coordonnant les acteurs. Ces énoncés peuvent induire des changements à long terme et créer des irréversibilités. Pourtant, pour rester efficace, elles doivent évoluer selon un régime d'historicité spécifique. Joly et Renard mobilisent cette notion introduite par d'Hartog (2003)¹³⁰ pour décrire le rapport d'une société au présent, au passé et au futur. Selon eux, les promesses s'inscrivent dans le régime en cours pour atteindre leur objectif de performance et de réduction de l'incertitude. Depuis les années 1990, nous aurions quitté un régime « moderniste », fondé sur une perspective positive et ouverte du futur, admettant qu'un progrès technique, quelle que soit la technologie, améliore la qualité de vie. Nous serions entrés dans régime présentiste qui se caractérise par une vision de l'avenir comme menaçant et fragile, nécessitant de diriger l'innovation pour en garantir les

¹²⁹ Joly, Pierre-Benoît et Claire Le Renard, « Les leçons d'une exploration dans le passé », in Dandurand, Guillaume, Florence Lussier-Lejeune, Daniel Letendre, et Marie-Jean Meurs, *Attentes et promesses technoscientifiques*, Editions Les Presses de l'Université de Montréal, 2022, 27-49. <https://doi.org/10.1515/9782760645028>.

¹³⁰ Hartog, François, *Régimes d'historicité. Présentisme et expériences du temps*, Editions Seuil, 2003.

effets positifs et sa durabilité. Ce changement de régime implique que les promesses doivent à la fois justifier la légitimité du projet, car le progrès technique n'est plus une justification en soi, et assurer leur crédibilité auprès d'un nombre d'individus élargi intégrés dans le pilotage de l'innovation. Dans ce régime, les promesses doivent anticiper les effets des technologies pour présenter un futur afin de le discuter, le remettre en question et l'adopter. La construction de cet horizon d'attente dans ce régime accorde donc une place importante à l'urgence, à l'accélération et à la nouveauté pour stabiliser les incertitudes.

Pour le cas quantique, cette question prépondérante se pose dans chacune des arènes que j'ai visitées, qu'elles soient administratives, industrielles, scientifiques ou financières. Les promesses du quantique sont marquées par l'anticipation : elles tirent de force des projets de recherche vers des lieux d'industrialisation ; elles présentent aux financeurs et aux industriels une filière encore inachevée afin qu'elle se déploie plus rapidement ; elles engagent tous les acteurs potentiellement concernés par les effets de cette technologie et mènent un vaste travail d'intéressement pour préparer la place du quantique dans la société.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre met en lumière la façon dont la stratégie nationale quantique transforme la filière en une architecture centrée sur les start-ups, et comment cette nouvelle configuration met en œuvre le régime des promesses en façonnant les relations et les enjeux de coordination entre recherche, industrie, finance et pouvoir public. Alors que les chapitres précédents exploraient la genèse des promesses d'applications et de marché, ce volet a montré comment, une fois traduites en instruments concrets, ces promesses structurent l'innovation linéaire et font peser sur les start-ups la double charge de la démonstration technique et de l'attraction de financements. Cette focalisation a des conséquences tant sur les pratiques des acteurs que sur la dynamique des promesses au sein de la filière, mettant en crise et amplifiant les promesses d'applications comme de marché par des start-ups responsables de faire tourner les promesses dans un modèle cyclique de l'innovation.

J'ai présenté trois dispositifs publics majeurs qui, chacun à leur manière, placent les start-ups au centre de la filière vis-à-vis d'acteurs de la recherche et de l'industrie. Le programme ProqCima, piloté par la DGA, soutient financièrement mais aussi organisationnelle les start-ups et leur intégration dans le réseau d'acteurs des technologies quantiques. Le Programme

Etablissement d'Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) réoriente les laboratoires publics vers des projets dont les résultats sont pensés pour le bénéfice des start-ups, redessinant les pratiques académiques pour mieux répondre aux impératifs de marché. Enfin, le projet européen HPCQS fédère sciences fondamentales et acteurs du calcul haute performance dans des consortiums transnationaux, intégrant les start-ups comme pivots de l'industrialisation des preuves de concept. Ensemble, ces instruments illustrent comment l'État reconfigure activement les pratiques de réseaux déjà existants pour faire émerger de nouveaux acteurs et accélérer l'innovation.

J'ai également mis en perspective les effets collectifs de cette mise en réseau sur le régime d'économie des promesses. Alors que l'État entend à terme se retirer, laissant le marché privé prendre le relais, il crée d'abord une dépendance forte des start-ups vis-à-vis de financements publics dont l'ampleur a configuré pourtant leurs modèles d'affaires et leurs calendriers de développement. Les start-ups s'activent donc à promouvoir l'innovation en développant des démonstrations et des projections pour les investisseurs et les partenaires qui de leur côté redoutent une bulle ou un « hiver quantique ». Quand ces acteurs choisissent un autre mode d'engagement dans l'ordinateur quantique, les start-ups continuent d'entretenir l'urgence et la crédibilité des promesses pour maintenir le régime d'économie. Ce travail fait évoluer les promesses vers une anticipation toujours plus lointaine qui deviennent moins des éléments de légitimation de la vision technologique qu'un moyen d'intéressement promoteur d'une rupture continue.

Conclusion générale

En introduction, je présentais la question qui a sous-tendus toute notre enquête : Comment les promesses de l'ordinateur quantique structurent-elles les réseaux d'acteurs scientifiques, administratifs et industriels par les attentes d'avantages sociaux et économiques pour orienter la trajectoire de cette technologie en France ? J'ai conduit ma démonstration en trois parties.

Dans la première partie, j'ai caractérisé les activités de projection des acteurs développant cette technologie en montrant notamment comment elles formulaient des promesses qui orientaient la trajectoire de développement de l'ordinateur quantique. Ces « activités créatrices » (Joly, 2015) se retrouvent dans les pratiques de l'informatique fondamentale par la recherche d'un avantage quantifié dans des algorithmes quantiques. Ces algorithmes formulent et répondent à des problèmes, ce qui permet aux scientifiques d'énoncer des promesses d'applications pour l'ordinateur qui parviendra à les exécuter. Ces promesses circulent alors hors du laboratoire, promues par les entreprises qui développent des ordinateurs quantiques lors de démonstrations (Rosenthal, 2019) de l'avantage quantique. Celles-ci s'appuient sur des publications scientifiques sur lesquelles les industries communiquent largement en mobilisant diverses compétences et qui traduisent les résultats scientifiques en horizon d'attente vers d'autres sphères non-spécialistes pour enrôler et acquérir de nouvelles ressources. Ce mécanisme de communication privilégie l'emballage médiatique et l'amplification des promesses à l'origine de bulles spéculatives. Celles-ci masquent les consensus tout en consolidant le pouvoir de quelques acteurs industriel aux capacités médiatiques étendues.

Dans une seconde partie, j'ai déterminé comment un horizon d'attente partagé se construit de façon collaborative, à travers l'exemple de la promesse de marché qui circule au sein des administrations européennes et françaises. J'ai alors identifié trois rapports d'adhésion des acteurs administratifs à la promesse de marché. Quand la Commission Européenne voit dans les technologies quantiques un secteur d'activité compétitivement plus propice à développer un marché avec des retombées économiques, l'État français s'y intéresse pour réaliser une réforme dans sa politique techno-scientifique et dans ce cadre prend pour inspiration les arguments de l'Union Européenne (Kolopp, 2018). Sur l'ordinateur quantique spécifiquement, la promesse de marché se justifie mal en des termes économiques, ce qui

amène les agents de l'État à formuler un pari distordu forçant l'action publique. Le postulat de compétitivité économique de ce pari en fait un outil rhétorique pour justifier une politique néolibérale.

Dans la dernière partie, j'ai montré comment la promesse de marché a façonné des instruments publics (Lascoumes et Le Galès, 2004) qui ont placé les start-ups développant un ordinateur quantique au centre de la filière tout en y concentrant les ressources disponibles et les pratiques des autres acteurs. En contrepartie, les start-ups sont responsables de promouvoir l'innovation et faire circuler les promesses pour autonomiser la filière, au risque de ne pas convaincre assez largement et de la faire s'effondrer. Cette privatisation de l'innovation, portée par des structures extrêmement dépendantes de leur environnement, oriente non seulement la recherche vers des technologies selon la boussole du marché, mais aussi menace les résultats, investissements et réseaux déjà établis par la recherche scientifique.

Ces résultats appellent des précisions sur les limites de l'enquête. J'ai privilégié dans l'enquête certains espaces à d'autres. En particulier, l'essentiel de mes observations et entretiens étaient auprès d'informaticiens ce qui m'a donné une vision réduite des travaux en physique pour construire matériellement un ordinateur. Une étude des pratiques de recherches dans la construction de prototypes permettrait d'identifier comment non seulement les algorithmes, mais aussi la machine et ses circuits sont configurés pour réaliser les promesses d'applications.

Par ailleurs, cette enquête ne donne pas assez la parole aux start-ups elles-mêmes. J'ai abordé les start-ups par leurs productions scientifiques et médiatiques et les rapports qu'ils entretiennent avec les espaces scientifiques et administratifs. Si cette perspective permet d'identifier la circulation des promesses, elle n'est pas suffisante pour aborder leurs effets dans les activités de recrutement, de stratégie et de développement de ces acteurs centraux que j'ai seulement esquissé.

En concentrant l'enquête sur l'ordinateur quantique, j'ai montré comment les promesses orientent son développement. Toutefois, cette focale resserrée ne m'a pas permis d'interroger pleinement les liens de cette technologie avec d'autres. En particulier, les technologies quantiques et le calcul haute performance sont des domaines de recherche qui interagissent grandement avec ceux de l'ordinateur, comme j'ai pu l'aborder par la notion de comparaison

et d'avantage quantique. En revanche, j'ai peu discuté des effets des promesses technoscientifiques pour le développement de ces filières, et en particulier sur leurs financements. Les promesses de l'ordinateur quantique mobilisent pourtant des ressources et limitent le développement de ces autres domaines dans une mesure que je n'ai pas pu préciser dans cette enquête. En s'inspirant des travaux sur *l'undone science*, introduits par David J. Hess (2016)¹³¹, on peut déplacer le regard porté sur les promesses. Cette approche interroge les choix sélectifs de champ de recherche qui laisse en friche d'autres domaines. Hess analyse, par exemple, comment des orientations de financement et des priorités politiques façonnent non seulement les savoirs produits mais également les ignorances maintenues, volontairement ou non, dans un régime d'« économie de l'ignorance ». Les promesses technoscientifiques ne renvoient donc pas uniquement à une anticipation de rupture, mais aussi à un mécanisme qui oriente l'attention, organise les croyances et les ignorances sur le développement technologique et invisibilise des voies alternatives.

Dans le cas du quantique, les promesses attachées à l'ordinateur jouent ce rôle d'attraction et de concentration en mobilisant ressources et acteurs au détriment d'autres pans des technologies quantiques ou d'autres champs de recherche. Si le régime d'économie de la promesse peut être lu comme une forme de marché d'investisseurs où certaines promesses s'imposent par leur crédibilité vis-à-vis des bénéfices économiques potentiels et leur capacité à incarner un futur désirable, le cadre de l'économie de l'ignorance permet d'analyser d'autres promesses, moins spectaculaires ou moins porteuses d'imaginaire de rupture. En considérant l'organisation des croyances, il devient possible d'interroger des ensembles de promesses plutôt que d'analyser de manière segmentée de multiples promesses comme j'ai pu le proposer.

L'économie de *l'undone science* invite ainsi à considérer les promesses non seulement dans ce qu'elles rendent possibles, mais aussi dans ce qu'elles occultent. Dans la lignée de Joly (2010), on peut alors envisager d'autres régimes d'orientation de la recherche davantage à l'écoute de mouvements sociaux, comme l'expérimentation collective, pour articuler plus directement l'innovation technologique aux besoins exprimés par la société et éviter une organisation des croyances et ignorances aux bénéfices politiques ou financiers.

¹³¹ Hess, David J., *Undone Science: Social Movements, Mobilized Publics, and Industrial Transitions*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016.

Annexes

Annexe I : Ensemble des observations et entretiens réalisés dans le cadre de l'enquête.

Date collecte	Type collecte	Lieu	Langue	Participants - Organisations	Durée (min)
12/11/2024	Observation	IRIF	Français	Chercheurs et chercheuses de l'IRIF	120
13/11/2024	Observation	Sorbonne campus Jussieu	Français - Anglais	Scientifiques de l'académie ou de l'industrie et étudiant.es en quête de postes	90
20/11/2024	Entretien semi-directif	IRIF	Anglais	Chercheur informatique quantique à l'IRIF	55
28/11/2024	Entretien semi-directif	IRIF	Français	Chercheur informatique quantique à l'IRIF	67
28/11/2024	Observation	Université Paris Cité	Anglais	Chercheur informatique quantique à l'INRIA	47
03/12/2024	Observation	IRIF	Anglais	Chercheur et doctorant en informatique fondamentale à l'IRIF	54
05/12/2024	Observation	IRIF	Anglais	Chercheur de l'IRIF et chercheuse néerlandaise au CWI, en informatique fondamentale	64
06/12/2024	Observation	IRIF	Français	Chercheuse en informatique fondamentale à l'IRIF avec des agentes de médiation scientifique du palais de la découverte	136
08/01/2025	Entretien semi-directif	IRIF	Français	Chercheuse en informatique fondamentale à l'IRIF	82
22/01/2025	Observation	De Rue De Cirque	Français	Chercheuse en informatique fondamentale de l'IRIF et équipe de jongleurs professionnels	71
31/01/2025	Entretien semi-directif	Veriqloud	Français	CEO d'une startup dans la cryptographie quantique	74
31/01/2025	Observation	Palais de la Découverte	Français	Deux médiatrices scientifiques du palais de la découverte et une chercheuse en informatique fondamentale	120
11/02/2025	Observation	Distanciel	Français	Scientifiques et experts industriels de la physique et de l'informatique de l'ordinateur quantique	120
17/02/2025	Entretien semi-directif	Café La Bombonière	Français	Ancienne ministre de la recherche	5
19/02/2025	Entretien semi-directif	Distanciel	Français	Doctorant en correction d'erreurs quantiques en CIFRE dans une start-up développant un ordinateur quantique	58
20/02/2025	Entretien semi-directif	SGDSN	Français	Ingénieur de l'armement au Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (SGDSN)	54
27/02/2025	Entretien semi-directif	Distanciel	Français	Chercheur en HPC au CEA	80
28/02/2025	Entretien semi-directif	DGE	Français	Agent de la Direction Générale des Entreprises sur le quantique	60
10/03/2025	Entretien semi-directif	Distanciel	Français	Ancienne ministre de la recherche	62

27/03/2025	Entretien semi-directif	Café Le PC	Français	Ingénieur de l'armement à la Direction Générale de l'Armement (DGA)	60
31/03/2025	Entretien semi-directif	Distanciel	Français	Ingénieur à Atos-Eviden en charge de la division quantique	70
07/04/2025	Entretien semi-directif	Distanciel	Français	Ancien conseiller de Frédérique Vidal et chercheur CEA chargé de la division recherche technique	45
14/04/2025	Entretien semi-directif	IRIF	Français	Chercheur en informatique fondamentale à l'IRIF, CEO d'une start-up dans la finance et co-rédacteur du rapport Fortezza	40
18/04/2025	Entretien semi-directif	Distanciel	Français	Partner du fonds d'investissement Quantonation	28

Annexe II : Document d'information et formulaire de consentement pour les entretiens en dehors de l'IRIF

Formulaire de consentement pour la participation au projet de recherche et pour le traitement de vos données personnelles

Titre du projet de recherche	Economie de la promesse de l'ordinateur quantique
Responsables de la recherche	Antoine Sérandour
Information de contact	Par mail : antoine.serandour@ehess.fr Par téléphone : 06 67 31 26 97 Par courrier : 52 rue de la division du General Leclerc

Vous trouverez dans la suite du document une description détaillée de l'objet de cette recherche ainsi que des informations sur les modalités de participation à celle-ci. Ces informations vous sont fournies afin de vous aider à décider si vous souhaitez participer à la recherche dans les conditions décrites.

1. Description du projet de recherche

Ce projet porte sur la production et la circulation de promesses dans différents espaces scientifiques, administratifs et industriels. Le projet a pour objectif de comprendre comment sont formulés les attendus de l'ordinateur quantique, et comment des décallages peuvent apparaître entre ces différents espaces.

2. Votre participation

2.1 Qu'est-ce qu'implique participer à cette étude ?

La participation à l'étude implique des traitements de données à caractère personnel. Ces traitements sont décrits en détail dans les parties suivantes. En signant le formulaire de consentement, vous consentez à ce que l'équipe de recherche recueille et utilise des informations vous concernant (décris infra) dans le cadre du projet de recherche.

2.2. Pourquoi suis-je contacté pour participer à cette étude ?

Vous êtes contacté(e) dans le cadre de cette recherche car vous travaillez dans l'industrie, l'administration ou le secteur scientifique sur des thématiques proches de l'ordinateur quantique.

2.3. À quelles activités vais-je prendre part et comment se déroulent-elles ?

Dans le cadre de cette recherche, vous participerez à un entretien mené par les chercheurs. Ils vous poseront une série de questions afin de :

- Comprendre votre vision de l'ordinateur quantique
- Identifier vos rapports avec d'autres acteurs de l'ordinateur quantique en France
- Documenter vos activités en lien avec l'ordinateur quantique

L'entretien durera environ une heure. Selon votre préférence, l'entretien aura lieu :

- en face à face dans une salle réservée pour cette activité où l'entretien pourra être réalisé en toute tranquillité et en privé. Le lieu précis devra être défini avec vous.
- en utilisant la solution de visioconférence Google Meet. Dans ce cas, il est préférable que vous soyez dans une salle où vous ne serez pas distrait. Le chercheur sera également dans un espace calme.

L'entretien sera enregistré en audio afin de pouvoir rester concentré sur le fond des échanges durant l'entretien, tout en ayant la possibilité de revenir dessus ultérieurement. Les chercheurs prendront toutefois des notes lors de l'entretien afin d'en noter les éléments clés. De plus amples informations sur la façon dont les données collectées sont utilisées sont disponibles dans la section 3 (“Vos données personnelles”).

Lors de l'entretien vous pourrez refuser de répondre à une question à laquelle vous ne souhaitez pas répondre. Vous pourrez également demander à arrêter l'entretien à tout moment.

2.4. Et si je souhaite ne plus participer à ce projet de recherche ?

Si vous avez consenti à participer à cette recherche, vous pouvez décider à tout moment d'arrêter votre participation en informant les chercheurs à l'oral ou via les informations de contact fournies sur ce document.

Vous avez le droit de demander la suppression de vos données. Veuillez vous référer à la section 3 (“Vos données personnelles”) pour plus de détails au cas où vous retireriez votre consentement.

2.5. Et si j'ai une question concernant cette recherche ?

Si vous avez des questions concernant ce projet de recherche, dont vous ne souhaitez pas discuter avec les chercheurs mentionnés dans ce document, vous pouvez contacter :

Rôle	Tuteurs de stage
Personne	David Saulpic et Marie Alauzen
Téléphone	06 59 70 25 88 06 18 46 18 79
Email	david.saulpic@irif.fr marie.alauzen@dauphine.psl.eu
Adresse postale	8 Pl. Aurélie Nemours, 75013 Paris

3. Vos données personnelles

Qui est le responsable du traitement de vos données personnelles ?

Guiseppe Castagna, directeur de l'IRIF est responsable du traitement de vos données personnelles.

Quelles données sont traitées et pour quelles finalités ?

Les chercheurs traitent les informations suivantes vous concernant :

- des informations liées au présent projet de recherche, utilisées notamment pour vous identifier en amont de la prise de contact (identité, fonction, publications, travaux, formation, prises de position) ;
- le présent formulaire de consentement daté et signé ;
- un enregistrement audio de l'entretien qui pourra être transcrit partiellement ou intégralement par les chercheurs ;
- des notes prises lors de l'entretien.

Ces données seront analysées par les chercheurs. Il est prévu que ces résultats de recherche soient publiés et/ou présentés sous diverses formes, tels que des articles académiques et mémoire de recherche. Dans toute publication et/ou présentation, les informations seront fournies de manière à ce que vous ne puissiez pas être identifié. Les informations présentées seront une synthèse des différents documents de recherche recueillis auprès de différents participants. Les chercheurs vous proposeront de lire la restitution de leur enquête en amont de leur publication. Si des citations sont utilisées, un accord vous sera préalablement demandé. Si vous acceptez d'être cité, mais souhaitez préserver l'anonymat, toute information identifiante pourra être effacée ou remplacée.

Comment les données sont-elles sécurisées ?

Les données seront chiffrées et stockées en toute sécurité sur les serveurs de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. Seuls les chercheurs seront autorisés à accéder aux données.

Combien de temps seront conservées les données ?

La fin prévue des entretiens est le 30 mai 2025. Les données seront conservées pour une durée de 3 ans à compter de la fin de la collecte des données afin de permettre l'analyse, la production et la publication des résultats de la recherche - notamment compte tenu des délais de publication académique.

Vos droits

Conformément au RGPD et à la Loi Informatique et Libertés, vous avez sur vos données personnelles les droits suivants :

- **un droit d'accès** : vous pouvez demander la communication des données que les chercheurs ont enregistrées ;
- **un droit de rectification** : vous pouvez demander la rectification des données inexactes ou incomplètes vous concernant. À noter que, les chercheurs peuvent vous fournir le transcript de l'enregistrement.
- **un droit à l'effacement** : vous pouvez demander l'effacement des données personnelles qui vous concernent ;
- **un droit à la limitation** : vous pouvez demander à ce que les chercheurs n'utilisent plus tout ou partie des données vous concernant ;
- **un droit de retirer votre consentement à tout moment** : vous pouvez retirer votre consentement à l'utilisation de vos données personnelles dans le cadre de cette recherche.
- **un droit à la portabilité** : vous pouvez récupérer auprès des chercheurs l'ensemble des données vous concernant dans un format lisible et couramment utilisé.

Pour exercer vos droits, veuillez contacter les chercheurs selon les modalités suivantes :

Par courrier électronique	antoine.serandour@ehess.fr
Par courrier postal	52 rue de la division du général Leclerc

Vous pouvez également contacter le délégué à la protection des données de l'IRIF Sandrine Auger joignable à l'adresse suivante : sandrine.auger@cnrs.fr.

Si l'exercice de vos droits n'est pas respecté ou que vous constatez un manquement dans le traitement de vos données personnelles, vous avez également le droit d'adresser une réclamation à la Commission Nationale Informatique et Libertés (CNIL) via son téléservice (<https://www.cnil.fr/fr/plaintes>) ou par courrier postal en écrivant à CNIL - Service des Plaintes - 3 Place de Fontenoy - TSA 80715 - 75334 PARIS CEDEX 07.

Consentement

Titre	Projet de mémoire de M2 EHESS : L'Economie de la promesse de l'ordinateur quantique
Responsables de la recherche	Antoine Sérandour

En tant que participant, je confirme que :

- J'ai lu et compris la fiche d'information du participant ;
- Je comprends les objectifs et les modalités de réalisation de la recherche décrits dans le projet ;
- Je comprends que je suis libre à tout moment de ne pas poursuivre ma participation au projet sans affecter ma relation avec les chercheurs ou Guiseppe Castagna.

Je consens à :

- participer à un entretien avec les chercheurs ;
- ce que les chercheurs prennent des notes de cet entretien en m'identifiant ;
- ce qu'un enregistrement audio de l'entretien soit fait par les chercheurs ;
- ce que cet entretien serve à la constitution d'une synthèse globale ;
- ce qu'une restitution de l'enquête soit publiée dans un format académique ou grand public (en cas de citation identifiante, votre accord sera préalablement demandé).

Nom du participant :	Fonction :	Entité :
Signature :	Date :	

Liste des figures et tables

Figure I : Transparent lors d'un séminaire devant des étudiants en master de physique.

p. 28

Figure II : photo prise pendant l'observation d'une réunion entre deux médiatrices et une chercheuse en informatique fondamentale pour la construction d'un escape game. La médiatrice présente et annote le panneau introduisant l'ordinateur quantique au public.

p. 32

Figure III : figure extraite de l'article Leclerc et al. (2023), numérotée 8 dans l'article. La figure présente les résultats de l'article pour démontrer l'avantage des algorithmes quantiques face à un algorithme classique pour un cas d'usage d'évaluation du risque de défaut de crédit bancaire.

p. 51

Figure IV : Schéma représentant les différents acteurs de la « filière quantique » et les soutiens de l'État par diverses voies de financements. Les start-ups sont au centre de la stratégie, et tous les dispositifs de l'État visent à soutenir ces acteurs en particulier. Réalisé par l'auteur.

p. 111

Figure V : roadmap de la start-up Alice et Bob qui construisent un ordinateur quantique. Disponible sur leur site internet.

p. 113

Figure VI : modèle du « cycle de la hype » développé par le groupe Gartner pour décrire la trajectoire des innovations technologiques. Figure issue de Borup et al (2006)

p. 115

Table I : Comparaison entre deux phrases du résumé exécutif de deux documents, l'un issu d'un manifeste signé par un large panel de scientifiques et industriels européen et l'autre issu d'un rapport d'expert donnant l'orientation du Quantum Flagship.

p. 73

Abréviations

AT&T : *American Telephone and Telegraph*, grande entreprise américaine des télécommunications, historiquement impliquée dans la recherche en informatique et en physique.

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, organisme national de recherche français spécialisé dans les applications nucléaires et militaires.

CEO : *Chief Executive Officer*, dirigeant principal d'une entreprise (équivalent anglo-saxon du PDG), utilisé dans le mémoire selon la manière de se présenter des enquêtés.

CERN : *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, devenu *Organisation européenne pour la recherche nucléaire*, centre international de recherche en physique des particules basé à Genève.

CIFRE : Conventions Industrielles de Formation par la Recherche, dispositif français finançant des thèses en partenariat entre laboratoire public et entreprise.

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique, organisme national de recherche français couvrant de nombreux disciplines de recherche et champs d'études.

DGA : Direction Générale de l'Armement, service du ministère français des Armées chargé des programmes technologiques et d'innovation de défense.

DGE : Direction Générale des Entreprises, administration du ministère de l'Économie en charge du soutien à l'industrie et à l'innovation, dont l'accompagnement de la filière quantique.

EDF : Électricité de France, entreprise publique française de production et de distribution d'électricité, intéressée par les potentielles applications de l'ordinateur quantique.

HPC : *High Performance Computing*, désigne le calcul haute performance utilisant des supercalculateurs et l'informatique classique.

HPCQS : *High Performance Computer and Quantum Simulator*, projet européen associant calcul haute performance et simulation quantique.

IA : Intelligence Artificielle, champ scientifique et technique visant à développer des systèmes fondés sur l'apprentissage de schéma dans des ensembles de données.

IBM : *International Business Machines Corporation*, entreprise américaine majeure dans le secteur informatique et du calcul quantique.

INRIA : Institut National de Recherche en Sciences et Technologies du Numérique, organisme national de recherche français spécialisé en informatique et mathématiques appliquées.

IRIF : Institut de Recherche en Informatique Fondamentale, laboratoire français rattaché à l'Université Paris Cité et au CNRS où une partie de l'enquête a été réalisée.

NASA : *National Aeronautics and Space Administration*, agence spatiale des États-Unis finançant et développant de nombreuses technologies de rupture comme l'ordinateur quantique.

NISQ : *Noisy Intermediate-Scale Quantum*, terme désignant la génération actuelle d'ordinateurs quantiques, spécialisé en termes de tâches, limités en nombre de qubits et sujets aux erreurs, par opposition à l'ordinateur quantique universel capable d'exécuter plusieurs algorithmes.

NIST : *National Institute of Standards and Technology*, institut fédéral américain de normalisation et de recherche appliquée impliqué dans la production de protocole de chiffrement robustes aux attaques d'ordinateurs quantiques.

NSA : *National Security Agency*, agence américaine de renseignement spécialisée dans la cybersécurité et la cryptanalyse.

PDG : Président Directeur Général, dirigeant principal d'une entreprise en France.

PEPR : Programme et Équipements Prioritaires de Recherche, instrument de financement français de la recherche qui cible des thématiques stratégiques.

Qubits : *Quantum bits*, unités de base de l'information quantique, analogues aux bits classiques mais exploitant les propriétés de la mécanique quantique pour réaliser de nouvelles opérations de calcul par rapport à l'informatique classique.

R&D : Recherche et Développement, ensemble des activités de création et d'innovation technologiques dans une organisation.

RSA : Algorithme de chiffrement asymétrique à clé publique inventé en 1977 par Rivest, Shamir et Adleman.

SGDSN : Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale, service du Premier ministre français chargé de coordonner la sécurité nationale.

SGPI : Secrétariat Général pour l'Investissement, service du Premier ministre français pilotant les programmes d'investissement de l'État.

Bibliographie

Sources primaires

Publications scientifiques

Aharonov, Dorit, and Michael Ben-Or, « Fault-Tolerant Quantum Computation with Constant Error. », *Proceedings of the Twenty-Ninth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 1997, 176–188. ACM. <https://doi.org/10.1137/S0097539799359385>.

Arute, Frank, Kunal Arya, Ryan Babbush, Dave Bacon, Joseph C. Bardin, Rami Barends, Rupak Biswas, et al., « Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor. » *Nature*, 2019, 574 (7779): 505–10. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.

Brassard, Gilles, « Cryptology Column—Quantum Computing: The End of Classical Cryptography? » *SIGACT News*, 1994, 25 (4): 15–21.

Chuang, Isaac L., Neil Gershenfeld, and Mark Kubinec, « Experimental Implementation of Fast Quantum Searching. » *Physical Review Letters*, 1998, 80 (15): 3408–11. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.3408>.

Cirac, Juan I., and Peter Zoller, « Quantum Computations with Cold Trapped Ions. » *Physical Review Letters*, 1995, 74 (20): 4091. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.4091>.

Deutsch, David, « Quantum Theory, the Church–Turing Principle and the Universal Quantum Computer. » *Proceedings of the Royal Society of London A. Mathematical and Physical Sciences*, 1985, 400 (1818): 97–117. <https://doi.org/10.1098/rspa.1985.0070>.

DiVincenzo, David P., « TOPICS IN QUANTUM COMPUTERS. » *arXiv: Mesoscale and Nanoscale Physics*, 1996, 657-677. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/9612126>.

Feynman, Richard P., « Simulating Physics with Computers » *International Journal of Theoretical Physics*, 1981, 21: 467–88. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>.

Gidney, Craig et Martin Ekerå, « How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits », *arXiv*, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.09749>.

Grover, Lov K., “[A fast quantum mechanical algorithm for database search](#) », *Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing*, 1996, 212.

Häffner, H., W. Hänsel, C. Roos, et al., « Scalable Multiparticle Entanglement of Trapped Ions. », *Nature*, 2005, 438: 643–46. <https://doi.org/10.1038/nature04279>.

Haroche, Serge, and Jean-Michel Raimond, « Quantum Computing: Dream or Nightmare? », *Physics Today*, 1996, 49 (8): 51–54. <https://doi.org/10.1063/1.881512>.

Huang, Cupjin, Fang Zhang, Michael Newman, Junjie Cai, Xun Gao, Zhengxiong Tian, Junyin Wu, et al., « Classical Simulation of Quantum Supremacy Circuits. », arXiv, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.06787>.

Kitaev, Aleksei Yur'evich, « Quantum Computations: Algorithms and Error Correction. », *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*, 1997, 52 (6): 53–112. <https://doi.org/10.1070/RM1997v052n06ABEH002155>.

Knill, Emanuel, Raymond Laflamme, and Wojciech H. Zurek., « Resilient Quantum Computation. », *Science*, 1998, 279 (5349): 342–45. <https://doi.org/10.1126/science.279.5349.342>.

Landauer, Rolf, « Is Quantum Mechanics Useful? », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, 1995, 353 (1703): 367–76. <https://doi.org/10.1098/rsta.1995.0106>.

Leclerc, Lucas, Luis Ortiz-Gutierrez, Sebastián Grijalva, Boris Albrecht, Julia R. K. Cline, Vincent E. Elfving, Adrien Signoles, Loic Henriet, Gianni del Bimbo, Usman Ayub Sheikh, Maitree Shah, Luc Andrea, Faysal Ishtiaq, Andoni Duarte, Samuel Mugel, Irene Cáceres, Michel Kurek, Román Orús, Achraf Seddik, Oumaima Hammammi, Hacene Isselnane and Didier M'tamon, « Financial Risk Management on a Neutral Atom Quantum Processor. », *Physical Review Research*, 2023, 5: 043117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.5.043117>.

Pednault, Edwin P. D., John A. Gunnels, Giacomo Nannicini, L. Horesh and Robert L. Wisnieff, « Leveraging Secondary Storage to Simulate Deep 54-qubit Sycamore Circuits. » *arXiv: Quantum Physics*, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.09534>.

Preskill, John, « Reliable Quantum Computers. », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454: 385–410. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0167>.

Preskill, John, « Quantum computing and the entanglement frontier. » *arXiv: Quantum Physics* (2012). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1203.5813>.

Preskill, John, « Quantum Computing 40 Years Later ». arXiv, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.10522>.

Shor, Peter W., « Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring. », *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 1994, 124–34. <https://doi.org/10.1109/SFCS.1994.365700>.

Shor, Peter W., « Scheme for Reducing Decoherence in Quantum Computer Memory. », *Physical Review A*, 1995, 52 (4): R2493. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.52.R2493>.

Troels F. Rønnow, Zhihui Wang, Joshua Job et Sergio Boixo, « Defining and detecting quantum speedup », *Science*, 2014, 345(6195): 420–424.

Turing, Alan, « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », *Proc. London Math. Soc.*, 2(42), 1937, pp. 230-265. <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>.

Unruh, William G., « Maintaining Coherence in Quantum Computers. », *Physical Review A*, 1995, 51 (2): 992. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.51.992>.

Ruiz, Diego, Jérémie Guillaud, Anthony Leverrier, Mazyar Mirrahimi, et Christophe Vuillot. « LDPC-Cat Codes for Low-Overhead Quantum Computing in 2D ». *Nature Communications*, 2025, 16(1): 1040. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56298-8>.

Ouvrages scientifiques publiés

Kalai, Gil., « How Quantum Computers Fail: Quantum Codes, Correlations in Physical Systems, and Noise Accumulation. », arXiv, 2011. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1106.0485>.

Milburn, Gerard, *Schrodinger's machines: The quantum technology reshaping everyday life*, New York, Editions WH Freeman & Co, 1997.

Sites internet

Alice et Bob, « Our quantum computing roadmap », <https://alice-bob.com/wp-content/uploads/2024/12/Alice-Bob-Roadmap.pdf>, consulté le 05/06/2025.

Anonymes, *Décomposition en produit de facteurs premiers*, https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9composition_en_produit_de_facteurs_premiers, 2010, consulté le 01/06/2025.

Chiavarini, Lorenzo, Dealroom research et Felix Ullmer, « Global Quantum Computing startups », 2025, <https://app.dealroom.co/lists/36190/list>, consulté le 30/05/2025.

Commission Européenne, « EU Science and Technology Flagships pick up steam - final inclusive structure announced », 2014, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_14_1005, consulté le 09/06/2025.

Commission Européenne, « Future and Emerging Technologies (FET) flagships », <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/flagships>, consulté le 21/05/2025.

Commission Européenne, « The future is Quantum », <https://qt.eu/>, consulté le 21/05/25.

Crédit Agricole, « Résultats concluants de deux expérimentations conduites en informatique quantique », 2023, <https://www.ca-cib.fr/fr/actualites/resultats-concluants-de-deux-experimentations-conduites-en-informatique-quantique>, consulté le 03/06/2025.

Crédit Agricole, « Informatique quantique : Crédit Agricole CIB acteur français de référence sur la Finance », 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=4osJ3t0h0bw>, consulté le 03/06/2025.

Ezratty, Olivier, « Comment atténuer les effets indésirables de la hype quantique ? », <https://www.oezratty.net/wordpress/2022/comment-attenuer-les-effets-indesirables-de-la-hype-quantique>, 2022, consulté le 06/06/2025.

Ezratty, Olivier, « Understanding Quantum Technologies », <https://www.oezratty.net/wordpress/2024/understanding-quantum-technologies-2024>, 2024, consulté le 13/01/2025.

Larousse, « Algorithme », <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/algorithme/2238>, consulté le 09/06/2025.

Martinis, John, « Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor », *Blog de Google*, 2019, <https://research.google/blog/quantum-supremacy-using-a-programmable-superconducting-processor/>, consulté le 10 aout 2025.

Pasqal, « Publications », <https://www.pasqal.com/publications>, consulté le 03/06/2025.

UNESCO, « 100 ans de quantique, ça n'est qu'un début », <https://quantum2025.org/fr/>, 2025, consulté le 28/08/2025.

Communiqués de presse

Crédit Agricole, Pasqal, Multiverse Computing, « Informatique quantique : résultats concluants de 2 expérimentations conduites par Crédit Agricole CIB en partenariat avec Pasqal et Multiverse Computing sur des cas d'usage réels en finance », https://www.ca-cib.fr/sites/default/files/Communiqu%C3%A9%2520de%2520presse_Cre%C2%CC%2581dit%2520Agricole%2520CIB_Multiverse_Pasqal_26012023_0.pdf, consulté le 03/06/2023.

Ministère des Armées, « COMMUNIQUÉ DE PRESSE DU MINISTÈRE DES ARMÉES », <https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/ministere-armees/06.03.2024%20Lancement%20du%20programme%20Proxima%20et%20notification%20d%E2%80%99accords-cadres%20pour%20le%20d%C3%A9veloppement%20d%E2%80%99ordinateurs%20quantiques%20universels.pdf>, 2024, consulté le 22/05/2025.

Rapports institutionnels

Chen, Lily, Stephen Jordan, Yi-Kai Liu, Dustin Moody, Rene Peralta, Ray Perlner, Daniel SmithTone, « Report on Post-Quantum Cryptography », *NIST publications*, 2016, <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/NIST.IR.8105.pdf>, consulté le 30/05/2025.

Commission Européenne, « Quantum Technologies Flagship Final Report », https://qt.eu/media/pdf/170922_HLSC_Final_Report_online.pdf, 2017, consulté le 09/06/2025.

ENISA, « POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHY : Current state and quantum mitigation », <https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/publications/ENISA%20Report%20-Post-Quantum%20Cryptography%20Current%20state%20and%20quantum%20mitigation-V2.pdf>, 2021, consulté le 08/06/2025.

État français, « Stratégie nationale sur les technologies quantiques », https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/content_migration/document/Dossier_de_Presse_Presentation_de_la_strategie_nationale_sur_les_technologies_quantiques_1372307.pdf, 2021, consulté le 02/06/2025.

État français, « Faire de la France une économie de rupture technologique », https://www.economie.gouv.fr/files/Rapport_college_experts_06_02.pdf, 2020, consulté le 09/06/2025.

Forteza, Paula, Jean-Paul Herteman et Iordanis Kerenidis, « Quantique : le virage que la France ne ratera pas », https://forteza.fr/wp-content/uploads/2020/01/A5_Rapport-quantique-public-BD.pdf, 2020.

Lambert, Catherie, Thierry Bonhomme et Gérard Roucaïrol, « État de l'art de l'ordinateur quantique tolérant aux fautes », Académie des Technologies , 2025, https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/06/202505_ordinateur_quantique.pdf, consulté le 11 aout 2025.

Villani, Cédric, « Donner un sens à l'intelligence artificielle », https://fichiers.acteurspublics.com/redac/pdf/2018/2018-03-28_Rapport-Villani.pdf, 2018, consulté le 26/05/2025.

Presse

Dargan, James, « 21 of the World's Top Quantum Investors in 2024», *Quantum Insider*, 2024, <https://thequantuminsider.com/2022/06/08/quantum-investors/>, consulté le 10 aout 2025.

Décode Media, « [DECODE Quantum] A la rencontre de Tommaso Calarco (Forschungszentrum Jülich) », *Frenchweb*, <https://www.frenchweb.fr/decode-quantum-a-la-rencontre-de-tommaso-calarco-forschungszentrum-julich/446758>, 2024, consulté le 25/05/2025.

Erixon, Fredrik, Andrea Dugo, Dyuti Pandya, Oscar du Roy, « Benchmarking Quantum Technology Performance: Governments, Industry, Academia and their Role in Shaping our Technological Future», European Center for International Political Economy, 2025,

https://ecipe.org/wp-content/uploads/2025/03/ECI_25_PolicyBrief_06-2025_LY03.pdf, consulté le 10/08/2025.

Murgia, Madhumita et Richard Waters, « Google Claims to Have Reached Quantum Supremacy », *The Financial Times*, 20 septembre 2019.

Monflier, Frédéric, « Teratec 2025 : l'Académie des technologies a présenté son rapport sur le calcul quantique tolérant aux fautes », *L'Usine nouvelle*, 23 mai 2025.

Pednault, Edwin, Dmitri Maslov, John Gunnels, Jay Gambetta, « On ‘Quantum Supremacy’ », *IBM Quantum Computing Blog*, 2019, <https://www.ibm.com/quantum/blog/on-quantum-supremacy>, consulté le 26/01/2025.

Shah, Agam, « L'informatique quantique en tête des priorités de Microsoft », *Le Monde Informatique*, 2016, <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-l-informatique-quantique-en-tete-des-priorites-de-microsoft-66581.html>, consulté le 30/05/2025.

Autres

Collectif, « Quantum Manifesto A New Era of Technology », <http://www.qtflagship.cnr.it/wp-content/uploads/2016/10/Quantum-Manifesto.pdf>, consulté le 25/05/2025.

Pascal, Blaise, *Pensées*, Les Belles lettres, 2023.

Références académiques

Cadre d'analyse des promesses et de l'innovation

Audéat, Marc, *Sciences et technologies émergentes: pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Editions Hermann, 2015.

Borup, Mads, Brown, Nik, Konrad, Kornelia, et Harro and Van Lente, « The sociology of expectations in science and technology ». *Technology Analysis & Strategic Management*, 2006, 18(3-4): 285-98. <https://doi.org/10.1080/09537320600777002>.

Dandurand, Guillaume, Florence Lussier-Lejeune, Daniel Letendre, et Marie-Jean Meurs, *Attentes et promesses technoscientifiques*. Edition Les Presses de l'Université de Montréal, 2022, 7-23. <https://doi.org/10.1515/9782760645028>.

- Flichy, Patrice, *L'innovation technique*, Paris, Editions La Découverte, 1995, 9-12.
- Jasanoff, Sheila, et Sang-Hyun Kim, « Containing the Atom: Sociotechnical Imaginaries and Nuclear Power in the United States and South Korea ». *Minerva*, 2009, 47(2): 119-46. <https://doi.org/10.1007/s11024-009-9124-4>.
- Godin, Benoît, « The Linear Model of Innovation: The Historical Construction of an Analytical Framework », *Science, Technology, & Human Values*, 2006, 31(6): 639-667. <https://doi.org/10.1177/0162243906291865>.
- Joly, Pierre-Benoît, « On the Economics of Techno-Scientific Promises ». *Débordements : Mélanges Offerts à Michel Callon*, édité par Madeleine Akrich, Yannick Barthe, Fabian Muniesa, et Philippe Mustar, Paris, Editions Presses des Mines, 2010, 203-222. <https://doi.org/10.4000/books.pressesmines.747>.
- Joly, Pierre-Benoît, « Le régime des promesses technoscientifiques » in Audétat, Marc, *Sciences et technologies émergentes: pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Editions Hermann, 2015, 31-47.
- Joly, Pierre-Benoît et Claire Le Renard, « Les leçons d'une exploration dans le passé », in Dandurand, Guillaume, Florence Lussier-Lejeune, Daniel Letendre, et Marie-Jean Meurs, *Attentes et promesses technoscientifiques*, Editions Les Presses de l'Université de Montréal, 2022, 27-49. <https://doi.org/10.1515/9782760645028>.
- Loeve, Sacha, « La Loi de Moore : enquête critique sur l'économie d'une promesse », in Audétat, Marc, *Sciences et technologies émergentes: pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Editions Hermann, 2015, 91-113.
- Rosenthal, Claude, « Formuler des promesses technologiques à l'aide de démos ». *Socio. La nouvelle revue des sciences sociales*, 2019, 12: 27-47. <https://doi.org/10.4000/socio.4429>.

Innovation et technologies quantiques

- Meinsma, Aletta Lucia, Sanne Willemijn Kristensen, W Gudrun Reijnerse, Ionica Smeets, et Julia Cramer, « Is Everything Quantum ‘Spooky and Weird’? An Exploration of Popular Communication about Quantum Science and Technology in TEDx Talks », *Quantum Science and Technology*, 2023, 8(3): 035004. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/acc968>.

Ponchon, Thibault, « Les enjeux des coopérations science/industrie : le cas des technologies quantiques », thèse de doctorat, en cours.

Roberson, Tara, « Can hype be a force for good? Inviting unexpected engagement with science and technology futures », *Public understanding of science*, 2020, 29(5): 544–552. <https://doi.org/10.1177/0963662520923109>.

Roberson, Tara M., « On the Social Shaping of Quantum Technologies: An Analysis of Emerging Expectations Through Grant Proposals from 2002–2020 ». *Minerva*, 2021, 59(3) : 379-97. <https://doi.org/10.1007/s11024-021-09438-5>.

Roberson, Tara, Joan Leach, et Sujatha Raman, « Talking about Public Good for the Second Quantum Revolution: Analysing Quantum Technology Narratives in the Context of National Strategies », *Quantum Science and Technology*, 2021, 6(2): 025001. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/abc5ab>.

Seskir, Zeki C, Steven Umbrello, Christopher Coenen, et Pieter E Vermaas, « Democratization of Quantum Technologies », *Quantum Science and Technology*, 2023, 8(2): 024005. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/acb6ae>.

Suter, Viktor, Charles Ma, Gina Poehlmann, Miriam Meckel, et Lea Steinacker, « An integrated view of Quantum Technology? Mapping Media, Business, and Policy Narratives », arXiv, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02236>.

Autres références

Akrich, Madeleine, Michel Callon et Bruno Latour, « A quoi tient le succès des innovations ? 1 : L’art de l’intéressement », *Gérer et comprendre, Annales des Mines*, 1988, 11: 4-17.

Akrich, Madeleine, Michel, Callon et Bruno, Latour. *Sociologie de la traduction*. Editions Presses des Mines, 2006. <https://doi.org/10.4000/books.pressesmines.1181>.

Barany, Michael J., et Donald MacKenzie, « Chalk: Materials and Concepts in Mathematics Research », *Representation in Scientific Practice Revisited*, The MIT Press, 2014. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262525381.003.0006>.

Blanchard, Delphine, *Les calculateurs quantiques de 1980 à 2000, des débuts télescopiques entre calcul et physique*, mémoire de master, EHESS, sous la direction d’Emmanuel Bertand, 2020.

Cardon, Dominique, Jean-Philippe Cointet, et Antoine Mazières, « La revanche des neurones: L'invention des machines inductives et la controverse de l'intelligence artificielle », *Réseaux*, 2018, 211(5): 173-220. <https://doi.org/10.3917/res.211.0173>.

Chiapello, Eve et Patrick Gilbert, *Sociologie des outils de gestion : introduction à l'analyse de l'instrumentation de gestion*, Editions La Découverte, 2013.

Doganova, Liliana, *Valoriser la science: les partenariats des start-up technologiques*, Edition Presses des Mines, 2012.

Ensmenger, Nathan, « Making Programming Masculine », *Gender Codes: Why Women are Leaving Computing*, Thomas J. Misa. Wiley, 2010, 115-141.
<https://doi.org/10.1002/9780470619926.ch6>.

Glaser, Barney G. et Anselm L. Strauss, *The Discovery of Grounded Theory : Strategies for Qualitative Research*, Chicago, Editions Aldine Pub., 1967.

Hartog, François, *Régimes d'historicité. Présentisme et expériences du temps*, Editions Seuil, 2003.

Hess, David J., *Undone Science: Social Movements, Mobilized Publics, and Industrial Transitions*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016.

Joly, Pierre-Benoît, Reimagining Innovation, in Lechevalier, Sébastien, *Innovation Beyond Technology: Science for Society and Interdisciplinary Approaches*, Editions Springer, 2019, 25–45.

Kolopp, Sarah, « « La main de l'étranger » ?:Les voies de l'international dans la réforme financière en France : le cas du « souci international » de la direction du Trésor », *Politix*, 2018, 124(4): 161-81. <https://doi.org/10.3917/pox.124.0161>.

Kuhn, Thomas S., et Laure Meyer, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Editions Flammarion, 1983 (première édition 1962).

Lascoumes, Pierre et Patrick Le Gales, *Gouverner par les instruments*, Editions La découverte, 2004.

Latour, Bruno et Steve Woolgar, *La Vie de laboratoire*, Editions de La découvertes, 1996, première édition 1979).

Raimbault, Benjamin, « Faire avec l'industrie », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2023, 17(2). <https://doi.org/10.4000/rac.30114>.

Rosental, Claude. *La société de démonstration*. Vulaines-sur-Seine: Éditions du Croquant, 2019.

Rosental, Claude, « Formuler des promesses technologiques à l'aide de démos », *Socio. La nouvelle revue des sciences sociales*, 2019, 12: 27-47. <https://doi.org/10.4000/socio.4429>.

Sacks, Harvey, Emanuel Schegloff, et Gail Jefferson, « A Simple Systematic for the Organisation of Turn Taking in Conversation ». *Language*, 1974, 50: 696-735. <https://doi.org/10.2307/412243>.

Table des matières

Remerciements	3
Sommaire.....	4
Introduction	5
Cadre théorique pour analyser les promesses du quantique	7
Traitement des promesses dans la littérature sur les « technologies quantiques ».....	11
Travaux pour l'analyse des promesses dans le cas de l'ordinateur quantique	14
Terrains et méthodes	17
Annonce de plan	19
Chapitre 1 : L'émergence des promesses d'applications de l'ordinateur quantique	20
L'anticipation théorique de l'avantage de l'ordinateur quantique comme la promesse d'applications multiples	21
L'algorithme comme élément théorique d'appui pour les promesses	22
La recherche d'algorithmes quantiques présentant un avantage	27
Débats scientifiques sur les algorithmes quantiques « réellement » avantageux dans le futur .	37
La circulation des promesses par les démonstrateurs et prototypes pour intéresser des acteurs et acquérir des ressources	43
Un historique des développements de prototypes d'ordinateurs quantiques	44
Le cas d'une démonstration de l'ordinateur quantique pour le secteur bancaire	48
Le cas de la démonstration de la « suprématie quantique » de Google	58
Conclusion.....	66
Chapitre 2 : La promesse d'un marché des technologies quantiques comme horizon d'attente de l'administration française	68
Les technologies quantiques mises à l'agenda de la politique économique européenne comme un secteur compétitif.....	69
La genèse de la stratégie nationale des technologies quantiques motivée par un « souci de l'international ».....	75
Les motivations et justifications économiques de la création d'un marché : un pari forcé	83
Conclusion.....	91

Chapitre 3 : La mise en œuvre d'une politique techno-scientifique centrée sur les start-ups	93
Les start-ups comme le moteur de la filière au centre des instruments publics	94
La mise en réseau par les instruments publics place les start-ups au centre	95
Le Programme d'accompagnement des start-ups par l'État : ProqCima	98
Le Programme et Equipment Prioritaire de Recherche (PEPR) quantique en soutien à la recherche et développement.....	100
Un projet européen de collaboration entre science et industrie : HPCQS	103
Les effets de la stratégie nationale sur le réseau d'acteurs et le régime d'économie des promesses	107
Le soutien de l'État à la filière comme tension entre force et fragilité financière	108
La production des promesses par les start-ups comme vision long terme de l'économie de la filière	112
L'amplification du régime d'économie des promesses par l'anticipation des désillusions	115
Conclusion.....	120
Conclusion générale.....	122
Annexes.....	125
Annexe I : <i>Ensemble des observations et entretiens réalisés dans le cadre de l'enquête.</i>	125
Annexe II : Document d'information et formulaire de consentement pour les entretiens en dehors de l'IRIF	127
Liste des figures et tables	132
Abréviations	133
Bibliographie	135
Table des matières	146