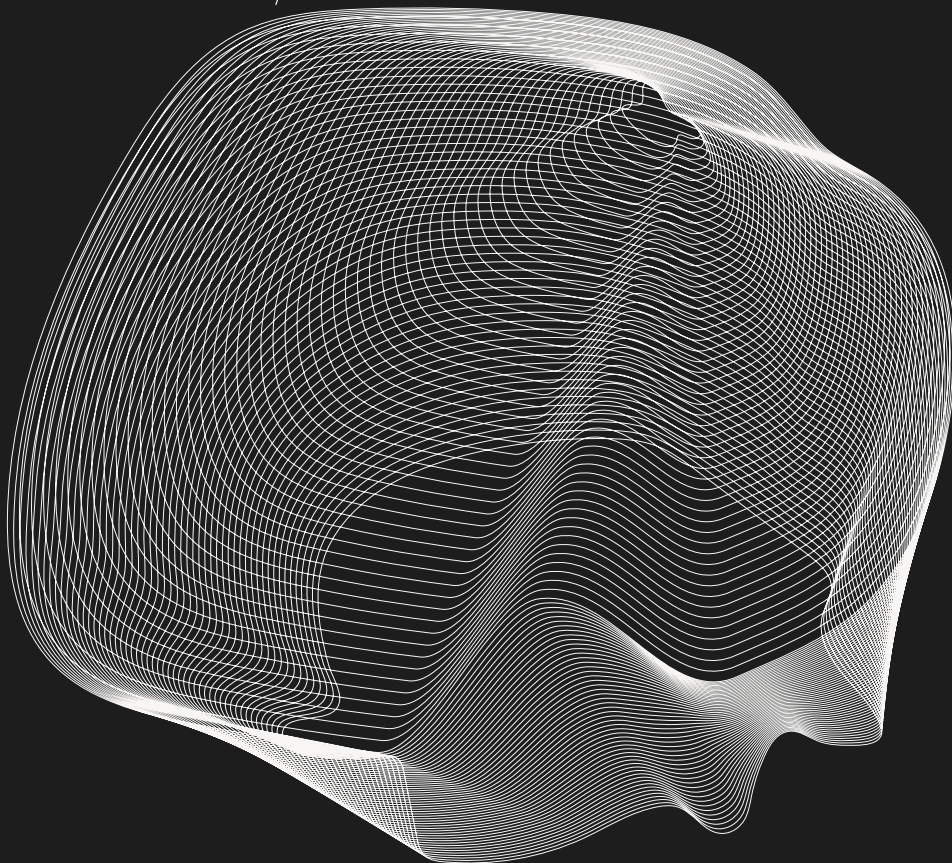


QUANTUM 2042

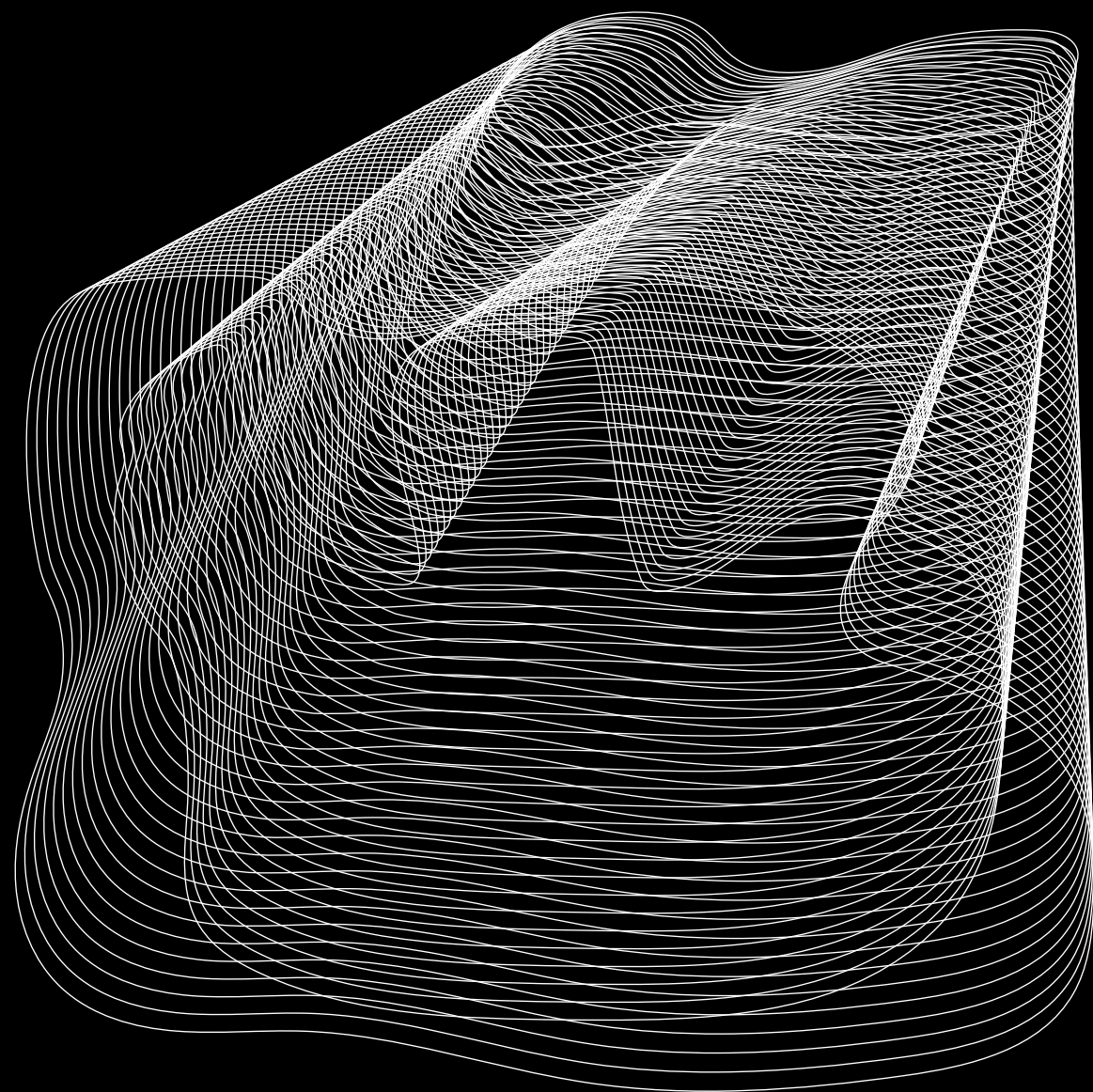
Rapport public

Étude prospective sur les impacts
du calcul quantique en 2042

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$



2
0
4
2



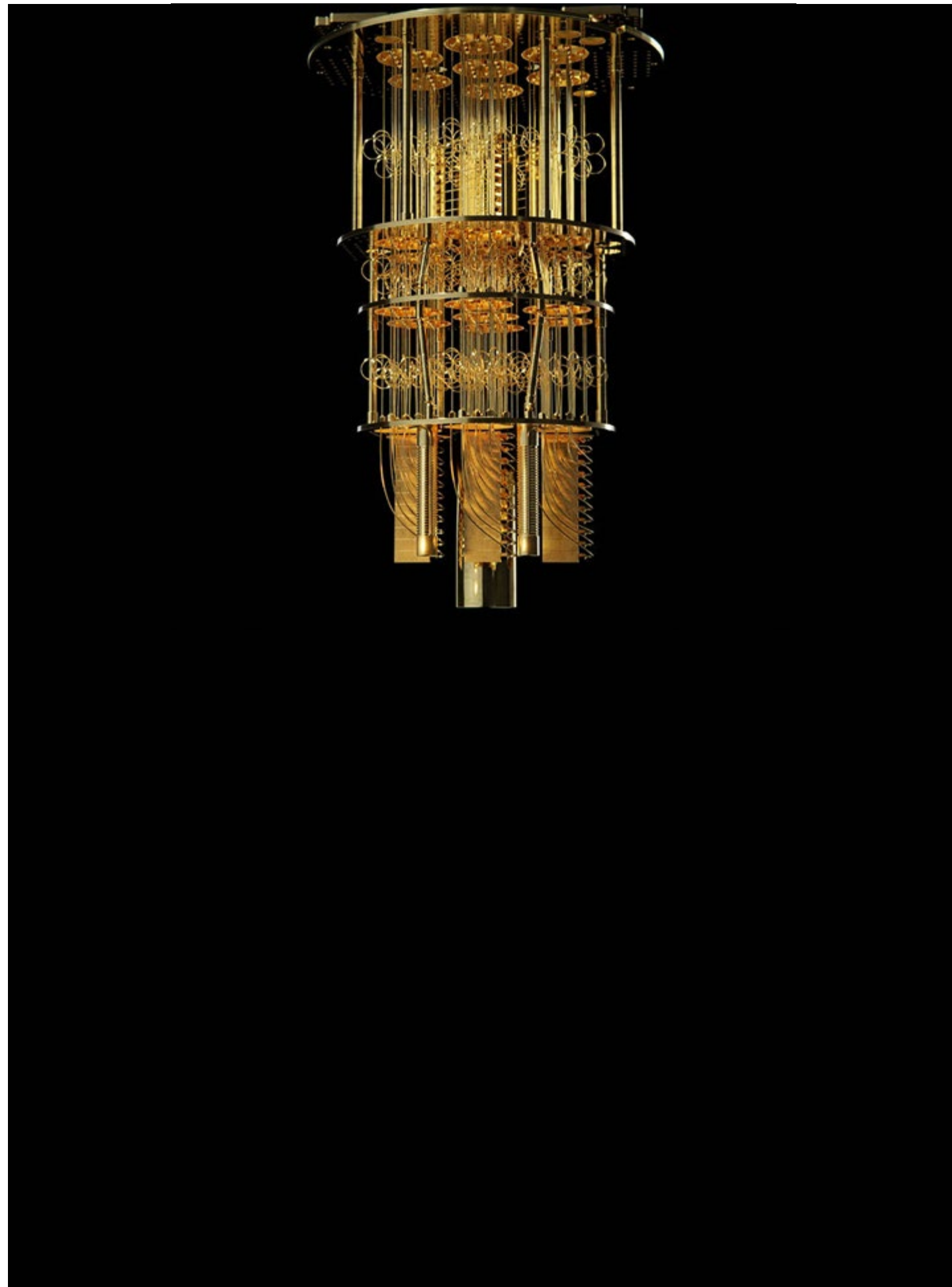
Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce rapport : Luc Gaffet et Delphine Roma d'Air Liquide, Jean Galand d'Enedis, Christopher Arnoll et Pascal Cervoni de Bouygues Telecom, Cesar Roda Neve de Soitec, Didier Caudron de Sanofi, Philippe Dejean de Safran, Valentina Pozzoli de SNCF, Laurent Francez, Sebastien Deschamps et Felix Mouhat de Saint Gobain, Ali El-Hamidi de CACIB, Olivier Hess et Anne-Lise Guilmain d'Eviden, Etienne Decossin d'EDF, Guillaume Leterrier de Valeo, Guillaume Brenaut, Nassima Bammar et Thomas Chapuis de Renault, Daniel vert de Systematics, Florent Staley, Tanguy Sassolas, Jacques-Charles Lafoucrière, Christian Gamrat, Patrick Cappe De Baillon, Richard Fournel, Benedicte Almozini, Philippe Caillol, Christophe Vautey, Valentin Savin et Julie Lepaulle du CEA, ainsi que tous les experts contactés.

Avis aux lecteurs

Ce rapport est issu d'un travail de prospective porté par le CEA Y.SPOT et Futuribles. CEA Y.SPOT est le pôle d'innovation ouverte et de connexion sociétale de la Direction de la Recherche Technologique du CEA. En lien avec Futuribles, centre de prospective qui vise à comprendre les grandes transformations en cours, l'ambition de ce rapport n'est pas d'être un écrit précis, technologique mais un support de réflexion sur les futurs possibles du calcul quantique et notamment les cas d'applications industriels et sociétaux. La prospective n'est pas une prédiction de l'avenir. Elle n'est pas non plus une prévision qui serait le prolongement de tendances actuelles sous forme de « roadmapping ». La prospective s'appuie sur des tendances, signaux faibles et ruptures pour décrire les futurs possibles et aider à la prise de décision stratégique dans un monde incertain et à la planification à long terme. Les travaux présentés dans ce document sont issus d'une production collective qui ne reflète pas nécessairement toutes les opinions des participants ayant contribué et n'engagent ni les organismes dont ils sont issus, ni le CEA.

07	Préface
08 – 09	Executive summary
10–13	Généralité sur le calcul quantique
14	Introduction
15 – 19	Les messages clefs
20 – 21	La méthode prospective
22 – 36	Les scénarios
37 – 44	Les cas d’usage
45 – 47	Le marché des calculateurs
48 – 55	Enquête & retour d’experts
56 – 61	Design fiction
62	Conclusion
63	Recommandation
64 – 68	Annexes



Préface

Depuis plus de trente ans, le CEA est un acteur majeur de la recherche fondamentale et appliquée dans le domaine du calcul quantique. Ses recherches se concentrent notamment sur deux technologies de qubits : les pistes supraconductrices et silicium. L'une des forces du CEA est sa capacité à être présent sur **l'ensemble de la chaîne de valeur du calcul quantique**.

En parallèle des développements technologiques, il nous paraît essentiel d'envisager les impacts à long terme du calcul quantique sur les usages et la société. De plus en plus, il est essentiel d'**aligner la science et les technologies avec les usages et la société, au bénéfice du citoyen**. Nous ne pouvons plus développer des technologies sans nous poser les questions des conséquences et impacts à venir sur la société. C'est pour cela que nous voulons pouvoir nous projeter à long terme et étudier d'ores-et-déjà les conséquences potentielles du calcul quantique sur un certain nombre de filières, aussi bien en terme de marchés que de jeux d'acteurs.

Rien n'est plus riche que de croiser les visions des entreprises et c'est dans cette optique que nous avons choisi d'explorer avec 13 grandes entreprises **la chaîne de la valeur du calcul quantique à long terme**. Devant la multitude d'incertitudes qui résident encore sur l'avènement de tels ordinateurs, il est nécessaire dès aujourd'hui d'envisager les différents futurs possibles.

Philippe Watteau

Directeur Innovation DRT – CEA

EXECUTIVE SUMMARY

Face au nombre d’articles publiés, que cela soit par la presse, les cabinets de conseil ou les journaux scientifiques, il est très difficile actuellement pour les entreprises et industriels de se faire une idée sur les impacts réels à venir du calcul quantique. C’est dans cette optique que le CEA Y.SPOT a décidé de conduire une démarche prospective avec l’aide du cabinet Futuriblespourévaluerl’étatactueldesconnaissances et les différents scénarios et applications possibles à l’horizon 2042. L’originalité de cette étude est qu’elle s’appuie sur **la participation de 13 entreprises¹** couvrant différents secteurs de l’industrie et des services et de nombreux **experts académiques ou issus de start-up**, qui permet de croiser des regards et de partager les retours d’expériences. **Ce rapport est une version publique de cette étude qui reste confidentielle et réservée aux partenaires impliqués dans la démarche.**

Cette étude a permis de faire ressortir **24 messages clefs** qui permettent d’identifier les principaux verrous et jalons scientifiques et techniques. Même s’il ne semble pas exister de barrières scientifiques infranchissables, nous ne sommes qu’au tout début de l’aventure de l’ordinateur quantique et les verrous technologiques à lever restent nombreux et complexes, dont par exemple :

- **Le nombre de qubits physiques intricables** : plusieurs centaines seront nécessaires pour voir apparaître en mode NISQ² les premiers avantages significatifs sur des applications réelles, des milliers seront nécessaires pour l’implémentation de la correction d’erreurs et l’avènement du FTQC².
- **Le nombre de qubits logiques** : atteindre le seuil de 50 doit permettre d’obtenir un avantage quantique théorique.
- **Les taux d’erreurs des processeurs quantiques** : passer sous le seuil de 10^{-3} est nécessaire pour l’implantation de la correction d’erreurs, il faut les réduire davantage encore pour tirer parti du NISQ.
- **L’interconnexion de cœurs quantiques** en conservant les niveaux de fidélité des processeurs.
- La formalisation du concept de mémoire quantique ainsi que son développement.
- **Les progrès dans la découverte ou l’optimisation d’algorithmes** applicables sur les processeurs bruités NISQ (notamment d’optimisation) ou de futures architectures FTQC.

Au vu des trajectoires décrites dans les scénarios retenus, il apparait que **les marchés de déploiement**

industriel du calcul quantique dans les dix prochaines années seront dans :

- La finance (optimisation de portefeuille, gestion de risques, etc.).
- La chimie des petites molécules et les matériaux (nouveaux matériaux, etc.).
- La logistique (tournée des agents, chargement optimal, etc.) si progrès significatifs des calculateurs et algorithmes.
- La santé, si progrès très significatifs des calculateurs et des algorithmes.

En supposant l’existence d’un calculateur quantique universel, à large échelle et tolérant aux erreurs, **les plus grands impacts marché seront sur les secteurs du biomédical et pharmaceutique** (nouvelles molécules, vaccins, etc.) **ainsi que dans la chimie** (batteries, réactions chimiques, engrais, etc.).

L’ensemble de ces jalons et verrous techniques ont permis de poser des **hypothèses validées par des experts**. Le groupe de travail a complété ces hypothèses pour élaborer 4 scénarios, résumés ci-dessous (voir diagramme global p. 34) :

Ces scénarios supposent l’atteinte d’un niveau de maturité technologique différent et sont analysés en fonction de la date à laquelle ils apparaissent probables et à leurs impacts sur l’usage des calculateurs et aux conséquences potentielles sur les acteurs du quantique ou la société.

LA PORTE ÉTROITE Small NISQ & analogique

Ce scénario minimal suppose des progrès dans le développement des calculateurs quantiques limités. La montée en échelle des qubits et la correction d’erreurs font face à des impasses : les calculateurs ne peuvent implanter que des algorithmes à la profondeur de circuit faible ou qui parviennent de manière astucieuse à tolérer un certain niveau de bruit. Malgré des premières démonstrations d’avantages quantiques en vitesse et en consommation énergétique sur des problèmes de très petite taille, les progrès algorithmiques sont insuffisants pour ouvrir largement le champ des applications. Les experts consultés considèrent à 61,5 % que ce premier niveau technologique sera atteint dès 2025 et à 84,5 % d’ici 2032. Si ce scénario n’était pas dépassé à cette date, il se traduirait par une réduction considérable de la dynamique du domaine dans le domaine privé, les financements étatiques se maintenant néanmoins dans la recherche.

¹ Air Liquide, Bouygues Telecom, Crédit Agricole Corporate and Investment Bank, EDF, Enedis, Eviden, Safran, Saint-Gobain, Sanofi, SNCF, Soitec, Valeo, Renault

² Pour la définition des acronymes, se reporter au Glossaire en Annexe 1

EXTENSION DU DOMAINE DU QUANTIQUE Large NISQ & analogique

Dans ce second scénario, les processeurs analogiques et NISQ progressent considérablement jusqu’à compter ~10 000 qubits physiques, contrairement au premier scénario où ce nombre stagnait au seuil du millier de qubits. On parvient à monter en échelle le nombre de qubits sans trop dégrader les taux d’erreurs ($10^{-3}/10^{-5}$). Des avancées sont également réalisées dans la mitigation d’erreurs et le couplage avec le calcul haute performance (HPC), permettant ainsi d’optimiser les performances des machines analogiques ou l’implémentation des algorithmes à plus grande profondeur de circuit dans les machines NISQ. Des avancées algorithmiques majeures ont également lieu, afin de réduire leur profondeur et améliorer leur tolérance au bruit. Les applications industrielles se structurent davantage, notamment dans la finance, les télécommunications et la santé, avec des avantages en vitesse et en énergie. Cependant, l’absence de correction d’erreurs demeure un obstacle majeur, comme dans le premier scénario, limitant la fidélité des calculs et entravant la montée en échelle des processeurs. Les experts consultés considèrent que ce niveau technologique sera atteint d’ici 2025 pour 19 % d’entre eux, d’ici 2032 pour 77 % et 92 % d’ici 2042. S’il n’est atteint qu’en fin de période, une réduction des investissements serait probable et pourrait toucher les projets FTQC en raison de l’impasse sur la correction d’erreurs, entraînant une consolidation verticale des acteurs.

LES PORTES DU FTQC SONT OUVERTES La suprématie quantique arrive

Dans ce scénario, le calcul quantique tolérant aux fautes (FTQC) fait son apparition grâce à une avancée significative dans la correction d’erreurs, permettant une montée en échelle des qubits et l’implémentation d’algorithmes profonds sans dégradation de la fidélité des calculs. Les processeurs quantiques parviennent à exploiter jusqu’à 100 qubits logiques et les premières interconnexions entre cœurs quantiques apparaissent, signes d’une maturation technologique progressive. Les machines à portes coexistent avec des machines analogiques. Ces dernières se spécialisent sur des problématiques d’optimisation pour lesquelles elles pourraient maintenir un avantage de coût ou de consommation énergétique. La miniaturisation de la chaîne de commandes favorise ces progrès, bien que l’industrialisation à grande échelle soit entravée par des coûts élevés. Les experts consultés estiment pour 50 % d’entre eux que ce scénario sera atteint en 2032, et pour 81 % d’ici 2042.

Dans ce scénario, il est anticipé une potentielle

consolidation horizontale du marché, notamment autour de quelques acteurs « winner takes all » ou grandes nations.

LE SAUT QUANTIQUE En route vers le Very Large Scale Quantum Computing

Dans ce scénario, le calcul quantique tolérant aux fautes (FTQC) fait un bond significatif, franchissant le seuil des 100 qubits logiques et ouvrant la voie vers l’exploitation de systèmes aux milliers de qubits logiques (VLSQ) sur la fin de période voire au-delà pour un développement large. L’industrialisation de la chaîne de commandes et la réduction drastique des coûts de production permettent un contrôle sur des centaines de milliers de qubits. L’avènement de la mémoire quantique (QRAM) et d’une architecture modulaire de processeurs quantiques constituent des avancées notables. Les performances atteintes permettent de traiter des problèmes majeurs avec des applications industrielles dans des secteurs très divers. Les experts consultés estiment pour 15 % d’entre eux que ce scénario sera atteint en 2032 et 53,5 % en 2042. Des applications emblématiques du quantique comme le déchiffrement des systèmes de cryptographie RSA-2048 demeurent hors d’accès. Le marché se segmente avec une gamme variée de machines quantiques, rendant la technologie plus accessible aux entreprises. Cependant l’industrialisation et la montée en échelle pourraient nécessiter une consolidation verticale majeure importante. L’impact social et politique du quantique devient tangible, avec des apports et des bénéfices très concrets pour le citoyen (médecine de précision, optimisation de trajets de transport, amélioration de l’autonomie des voitures électriques, etc.), mais aussi des risques potentiels, par exemple le développement d’usages malveillants (cybercriminalité, déstabilisation des marchés financiers, etc.).

Tout comme l’IA, le calcul quantique apparaît comme **un catalyseur des transformations digitales à venir**. C’est une évolution sur laquelle les entreprises devront se positionner et anticiper, quand bien même ces technologies ne deviendront que graduellement matures dans les 20 ans à venir. Cependant, les changements induits dans les organisations seront tels qu’il semble d’ores et déjà nécessaire d’acquérir une connaissance sur le sujet pour **pouvoir se préparer et se positionner**. Pour cela, les grands groupes français doivent rapidement évaluer l’intérêt stratégique du calcul quantique pour leur activité.

GÉNÉRALITÉS SUR LE CALCUL QUANTIQUE

Introduction à la physique quantique

Afin de bien comprendre les jalons d’enchaînement des scénarios de cette étude, il est nécessaire de comprendre quelques notions de base sur le calcul quantique.

La physique quantique regroupe l’ensemble des lois qui s’appliquent dans le monde de l’infiniment petit : atomes, particules, photons, électrons. On parle ainsi de la première « révolution quantique »¹, qui a permis au milieu du XX^e siècle la mise au point des matériaux semi-conducteurs, de la supraconductivité et de toute l’électronique moderne. Les applications sont aujourd’hui très nombreuses, de l’électronique (transistors, cellules photovoltaïques) à l’optique (Lasers, Leds) en passant par la médecine (Imagerie par Résonance Magnétique, Tomographie par Emission de Positron), etc.

La deuxième révolution quantique, en cours actuellement, se rapporte au développement de systèmes utilisant directement les propriétés de superposition et d’intrication des états quantiques. Elle ouvre la voie à la métrologie quantique, aux communications quantiques et au calcul quantique.

Par rapport aux phénomènes physiques observables dans le monde macroscopique, les lois de la physique quantique sont paradoxales et contre-intuitives. Quelques exemples :

- **L’intrication** : est le fait que deux objets intriqués, qu’ils soient proches ou loin l’un de l’autre, doivent être considérés comme un tout unique.
- **Dualité onde – corpuscule** : un objet quantique peut être interprété à la fois comme une onde et une particule.
- **Principe d’incertitude d’Heisenberg** : il est impossible de mesurer avec précision simultanément la position et la vitesse d’un objet quantique.
- **Non clonage** : il est impossible de copier à l’identique l’état d’un objet quantique quand cet état est inconnu.
- **Effet tunnel** : la nature ondulatoire des objets quantiques leur permet de traverser des barrières énergétiques.

Dans les chapitres suivants, nous allons présenter très succinctement les concepts de base du calcul quantique. Par ailleurs, un glossaire est proposé en fin de rapport (annexe 1) pour retrouver rapidement la définition de certains termes.

Qubits

En informatique classique, l’unité fondamentale d’information est le bit, qui ne peut prendre que 2 valeurs : 0 ou 1. Par analogie, on nomme l’unité fondamentale d’information du calcul quantique **le qubit**.

Le qubit présente 3 propriétés fondamentales

- **La superposition** : c’est la capacité d’une particule à être dans plusieurs états quantiques en même temps : l’état de la particule est une superposition de tous ces états quantiques.
- **L’intrication** : on parle d’intrication quantique quand 2 ou plusieurs particules sont liées de telle sorte qu’il est impossible pour elles d’êtres décrites de façon indépendantes, même si elles sont à distance.
- **Observation** : la superposition et l’intrication existent tant que les particules quantiques ne sont ni observées ni mesurées. Observer ou mesurer un état quantique permet d’obtenir une information, mais entraine un « effondrement » du système quantique et donc la disparition de l’intrication et de la superposition.

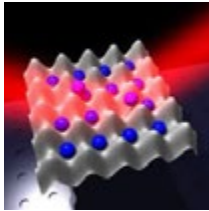
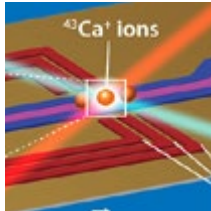
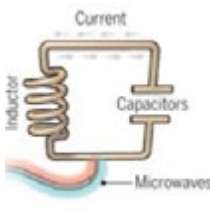
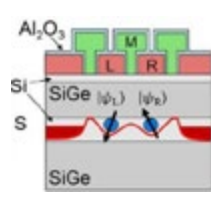
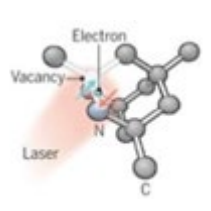
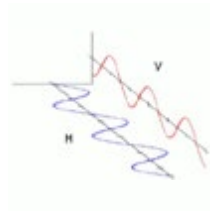
Différents objets physiques et technologies peuvent être employés **pour réaliser un qubit : atomes, ions, électrons, spins, photons, etc.** À chaque technologie correspond une machine quantique différente qui a chacune ses avantages et inconvénients : temps de cohérence, vitesse, densité, taux d’erreurs, etc.

Les différents types de machines quantiques

Les machines quantiques peuvent être séparées en 2 catégories :

- La première est la catégorie des **calculateurs analogiques**³, qui utilisent le principe physique de recuit quantique (annealing en anglais). On initialise un système de qubits dans une configuration énergétique qui représente par analogie le problème à résoudre. En laissant évoluer le système vers son état d’énergie minimum, on obtient théoriquement la solution du problème. Les calculateurs analogiques ne permettent de répondre qu’à certains types de problèmes.
- La deuxième catégorie est celle des **ordinateurs à portes quantiques**⁴. On encode les données d’entrée puis on applique des opérations logiques sur les qubits selon un algorithme prédéfini, jusqu’à la mesure qui donne la solution recherchée. Quand on utilise des qubits « standards », donc bruités, on parle d’un calculateur NISQ (Noisy Intermediate Quantum Computing). Quand on utilise des qubits « logiques » ou « parfaits », on parle alors de FTQC (Fault Tolerant Quantum Computer). Cette architecture de calculateurs est généraliste car elle permet de résoudre à priori un très grand nombre de problèmes.

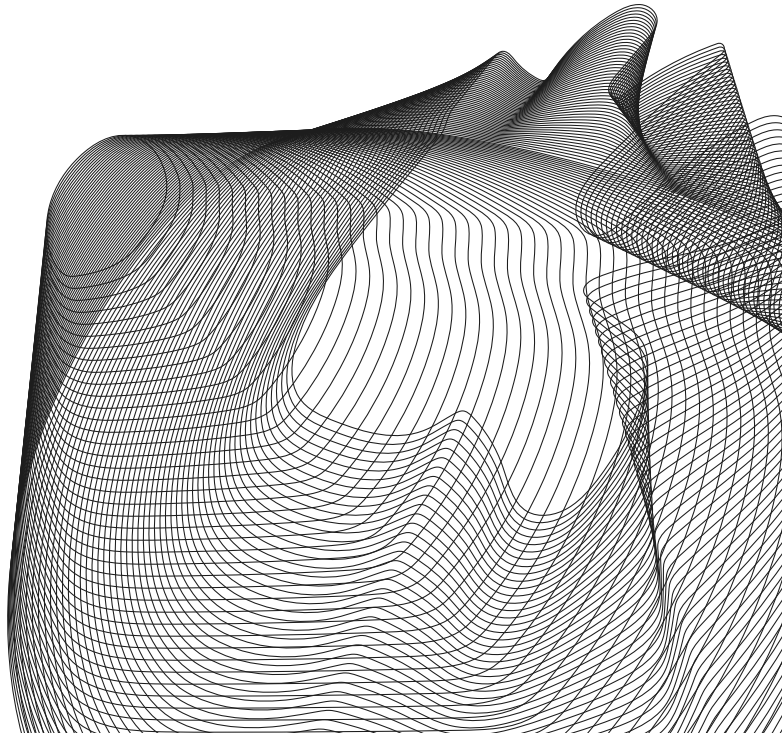
Figure 1 : Principales technologies utilisées pour la création de qubits.

atomes froids	ions piégés	supraconducteurs	spins d'électrons	centre VN	photons
 Src : chicagoquantum.org	 Src : APS-Alan Stonebraker	 Src : factbasedinsight.com	 Src : O. Ezratty	 Src : factbasedinsight.com	 Src : EDF
niveau d'énergie atomique		boucle de courant	spin d'électron		polarisation des photons

¹ Voir <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/il-etait-deux-fois-la-revolution-quantique-9293.php>

² <https://www.oezratty.net/wordpress/2023/understanding-quantum-technologies-2023/>

³ et ⁴ Voir Glossaire en annexe 1



Qubits physiques et qubits logiques

Les qubits sont par nature des objets physiques instables, très sensibles aux perturbations de l’environnement. Ces perturbations vont entraîner des changements dans l’état des qubits, entraîner des erreurs, qui vont s’accumuler tout au long du calcul.

Pour contrer cela, il est possible d’associer plusieurs qubits physiques et d’appliquer un code correcteur d’erreurs au système. Dans ce cas, cet ensemble de qubits va se comporter comme un seul qubit dit « logique », qui va présenter un taux d’erreurs beaucoup plus faible. L’objectif est de pouvoir créer des qubits logiques « parfaits », générant un taux d’erreurs inférieur à 10^{-12} , limite communément admise par les experts du domaine.

Le calcul quantique

Principes

Le calcul quantique est basé sur le développement et l’utilisation d’algorithmes spécifiques qui tirent parti de la superposition et de l’intrication d’états quantiques. Contrairement à l’algorithmie classique qui traite les données de manière séquentielle, les algorithmes quantiques utilisent le parallélisme intrinsèque de la mécanique quantique pour explorer simultanément tout un domaine de valeurs et donc « paralléliser » certaines étapes du calcul.

Le développement d’algorithmes quantiques doit tenir compte de limitations spécifiques. Ainsi, le **théorème du non clonage** rend impossible de copier les états quantiques. De plus, comme il est impossible de mesurer un qubit sans le détruire, on ne peut pas utiliser sa valeur pour implémenter des tests ou des boucles conditionnelles dans l’algorithme quantique. Enfin, la nature probabiliste des résultats implique une répétition des calculs.

Ces algorithmes permettent théoriquement à l’ordinateur quantique de résoudre des cas d’usages réels pour lesquels les algorithmes classiques ne sont pas satisfaisants en termes de vitesse, consommation énergétique ou précision.

Limitations actuelles

Le calcul quantique présente donc théoriquement des avantages très importants pour **accélérer le calcul intensif en parallélisant certaines étapes. Pour certaines classes de problème on attend une accélération polynomiale voire exponentielle en fonction de la taille de ce problème.** Cependant, l’ordinateur quantique fait aujourd’hui face à de nombreuses limitations.

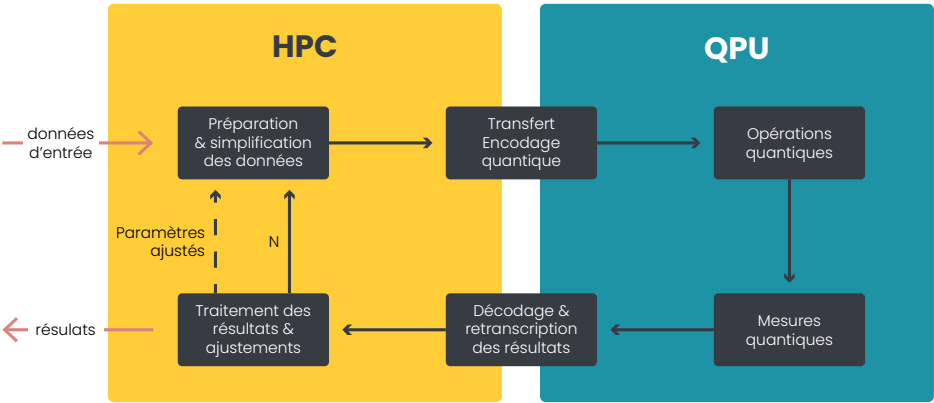


Figure 3 : Décomposition d'un algorithme quantique.

En l’absence de mémoire quantique, un algorithme intégrant du calcul quantique peut être décomposé en plusieurs phases, représentées par la figure ci-contre.

Pour juger de l’avantage quantique, **il faut évaluer l’ensemble de la chaîne, depuis l’entrée des données jusqu’à l’obtention des résultats.** Ceci n’est pas toujours fait, voire complètement éludé dans les annonces d’avantage quantique théorique d’un algorithme. L’accélération quantique peut ainsi être complètement invalidée par le temps nécessaire pour effectuer une des étapes du cycle de traitement.

Il y a d’autres limitations pratiques à l’utilisation des algorithmes quantiques. Ainsi, **si le nombre de qubits disponibles est très limité, il faut opérer une simplification drastique du problème,** réduisant de facto l’intérêt de sa résolution. Par conséquent, les machines quantiques ne peuvent pas aujourd’hui traiter de larges jeux de données en entrée.

Par ailleurs, la mise en application des algorithmes quantiques sera étroitement liée aux caractéristiques des machines utilisées. Chaque algorithme nécessite un nombre minimal d’opérations pour aboutir à un résultat, en relation avec la taille du problème. En mode NISQ, la qualité des qubits va imposer des limitations. **Si le temps de cohérence des qubits est trop court ou si la fidélité des qubits est trop faible, il sera alors impossible de réaliser l’ensemble des opérations nécessaires.**

Cas d’utilisation du calcul quantique

Au vu des connaissances actuelles en mathématiques et en algorithmie, nous pouvons identifier des grandes classes de problèmes qui peuvent bénéficier des calculs massivement parallèles et pour lesquels une machine quantique pourrait théoriquement être avantageuse :

- **L’optimisation combinatoire** : consistant à simuler un système avec un ensemble de qubits et le faire converger vers un optimum (trajet, planification, coût, graphes, etc.).
- **La simulation physique au niveau atomique** : en application du cas précédent pour calculer l’état fondamental (celui de plus faible énergie) d’une molécule ou d’un ensemble d’atomes (chimie quantique).
- **La factorisation de grands nombres en facteurs premiers** : l’asymétrie de difficulté entre la multiplication et la factorisation de grands nombres est actuellement à la base de la sécurité et du cryptage d’informations, en particulier sur Internet (protocole RSA¹). Accélérer significativement le calcul de factorisation générerait donc une faille majeure dans la sécurité des systèmes informatiques.
- **La recherche dans des bases de données**, structurées ou non.
- **La classification (« clusterisation »)**, utilisée pour accélérer les algorithmes de machine learning.
- **La résolution d’équations aux dérivées partielles** : on essaie d’utiliser le parallélisme du calcul quantique pour améliorer et/ou accélérer les simulations de phénomènes multi-physiques (résistance des matériaux, thermique, mécanique des fluides, etc.).

¹ Cet algorithme a été décrit en 1977 par Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman

INTRODUCTION

Les technologies quantiques sont perçues comme stratégiques et font l’objet d’impulsions publiques considérables au sein des pays technologiquement avancés. Ce domaine particulier où recherche et technologie recherche avancent de concert, est très actif, et sujet à de nombreux développements et à des publications quasi quotidiennes. L’écosystème des acteurs du quantique est également marqué par des évolutions rapides. Une des caractéristiques des technologies émergentes comme le calcul quantique est **le poids considérable des représentations et de l’économie de la promesse**, ainsi que des effets d’annonce associés à un jeu d’acteurs politico-stratégique mondial. Ceci, dans un contexte de dynamique bien réel est propice à la production de visions performatives (sans preuves), de discours contradictoires ou déstabilisants.

Afin d’y voir plus clair, nous avons décidé d’adopter l’approche prospective par scénario avec l’aide du cabinet de conseil Futuribles. Notre but n’est donc pas de proposer une approche exhaustive du sujet, mais d’apporter **un éclairage sur les trajectoires d’évolution possibles et cohérentes à l’horizon des vingt prochaines années**. L’objectif est d’apporter des clefs de lecture et de montrer quels sont **les jalons à surveiller dans le futur** pour être à même de détecter les points de bascule d’un scénario à l’autre. L’originalité de notre étude est qu’elle s’appuie sur les retours de cas d’usages de 13 grands groupes qui ont réfléchi chacun dans leurs métiers aux conséquences que pouvaient avoir le calcul quantique.

Nous nous sommes livrés à une projection du marché de la vente de machines quantiques à l’horizon 2042 incluant un certain nombre d’hypothèses que nous détaillons. Il est encore très difficile d’évaluer de façon quantitative les bénéfices que cela pourra engendrer pour les entreprises utilisatrices et les modèles économiques associés. Nous avons décidé de ne pas les publier dans cette étude.

Nous avons également, à l’aide de designers, essayé d’évaluer l’impact sociétal de cette technologie sur les citoyens et la vie de tous les jours par une approche de design fiction. A l’aide de quelques exemples d’objets du quotidien qui pourraient exister en 2042, nous avons tenté de brosser les conséquences positives ou négatives que le quantique pourrait avoir.

MESSAGES CLEFS

À l’issue de cette étude, nous avons sélectionné **22 messages clefs** que nous avons voulu mettre en avant. Nous avons fait le choix de les classer par grandes thématiques et non par ordre de priorité. Certains peuvent passer pour des évidences, d’autres sont plus soumis à controverses, mais cette courte sélection a le mérite de souligner les **notions à avoir en tête sur le calcul quantique aujourd’hui**.

Messages généraux

01

Le calcul quantique n’a pas vocation à remplacer l’intégralité du calcul classique.

L’avantage attendu du **calcul quantique est limité à certains problèmes mathématiques et physiques** pour lesquels les propriétés d’intrication et de superposition peuvent être mobilisées. En l’absence de machines librement disponibles pour les tester « grandeur nature », peu d’algorithmes quantiques ont pu être développés et testés. Les pistes les plus encourageantes actuellement sont la résolution des problèmes d’optimisation pour la chimie, la finance (analyse stochastique). Sur les applications courantes du HPC, simulation physique, mécanique du solide et des fluides, il existe peu de résultats aujourd’hui mais des pistes sont à creuser.

02

Dans les prochaines années, les progrès vers le calcul quantique reposeront d’une part sur l’accroissement du nombre de qubits et d’autre part sur l’amélioration de leur fidélité.

Ces deux progrès sont indispensables à la mise en œuvre de la correction d’erreurs ou au passage à l’échelle des problèmes NISQ. Il est **impossible de prévoir laquelle des technologies de qubits en développement actuellement y parviendra en premier**.

03

La logique du calcul quantique, calcul tensoriel massif, contribue déjà à développer de nouvelles méthodes d’appréhension du calcul classique et continuera à être à l’origine de progrès lors des prochaines années (quantum-inspired avec les réseaux de tenseurs notamment).

04

Dans les 5 à 10 prochaines années, la plupart des grandes organisations publiques et privées ayant des besoins de calculs devront être préparées au développement de cas d’usages de calcul quantique. La mise en œuvre dépendra cependant des matériels disponibles.

On observe la structuration d’un écosystème quantique permettant aux organisations d’expérimenter et de se préparer aux applications potentielles du calcul quantique, notamment grâce aux émulateurs, aux banques de cas d’usages, etc. **Les émulateurs permettent actuellement de travailler avec l’équivalent de 30 à 40 qubits « parfaits¹ », totalement intricables, à cohérence infinie, avec une capacité unique d’accéder à l’état « quantique » de la machine.** A moyen terme, tous les cas d’usages pouvant être implémentés

¹ La capacité d’émuler 40 qubits parfaits est très supérieure au meilleur hardware d’aujourd’hui.

sur des machines quantiques plus ou moins bruitées seront « prêts ». A plus long terme, des environnements de développement informatique permettront d’évaluer le potentiel de cas d’usages pour le FTQC.

05
Des besoins de main d’œuvre seront nécessaires pour accompagner la révolution quantique dans les 10 années à venir.

Dans un contexte d’apprentissage progressif et de compétition mondiale pour les compétences dans le domaine, des investissements anticipés seront nécessaires. Parmi les compétences à développer, le premier niveau sera les compétences amont liées au développement des technologies quantiques : hardware (scientifiques et ingénieurs en technologies quantiques), et software (informaticiens pour l’implémentation des algorithmes et le passage de problèmes physiques à des problèmes mathématiques). Par ailleurs, des **compétences supplémentaires seront à intégrer au sein des entreprises pour reformuler les cas d’usages** en problèmes compatibles avec le calcul quantique.

06
La disponibilité de matériels (le hardware) et piles logicielles sont nécessaires pour l’accélération du développement des algorithmes, puis leur qualification. Les organisations partenaires soulignent la nécessité d’un environnement de développement plus mûr (soft et hard) afin de mieux pouvoir explorer les cas d’usages et les avantages quantiques associés.

07
Les progrès en matière d’algorithmie quantique, de combinaison d’algorithmes (y compris classique-quantique) sont nécessaires pour optimiser les applications potentielles d’un calculateur quantique.

Aujourd’hui, seuls quelques algorithmes sont opérationnels dont notamment les algorithmes d’optimisation combinatoire. Ils sont **limités dans l’utilisation à des cas simplifiés** pour le moment. Pour d’autres applications complexes comme la résolution d’Équations à Dérivées Partielles (EDP) ou les simulations physico-chimiques, des ruptures algorithmiques sont nécessaires.

08
Les premières démonstrations d’avantages des calculateurs quantiques sont en voie d’être réalisées.

Les processeurs quantiques sont porteurs d’avantages potentiels en vitesse, consommation énergétique, ou précision. Il sera fondamental pour le développement du calcul quantique à finalité pratique de démontrer dans les prochaines années ces avantages sur des tailles de problèmes s’approchant des applications industrielles. **À ce jour, il n’y a que de très rares cas de calcul quantique ayant montré un avantage pratique**, c’est-à-dire significatif en coût, vitesse, ou consommation énergétique par rapport aux outils classiques². Il est à noter que d’autres voies que le calcul quantique se développent en parallèle et pourraient être compétitives (Digital annealer de Fujitsu³, processeurs photoniques AIM de Microsoft⁴ ou de Mythic AI⁵).

² Publication d’optimisation de portefeuille d’investissement 3X plus rapide ne consommant que 3kwh : « Financial Risk Management on a Neutral Atom Quantum Processor, Lucas Leclerc & al., arXiv:2212.03223v1 – 6 dec 2022 »

³ <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-fujitsu-propose-une-machine-presque-quantique-avec-le-digital-annealer-2-75355.html>

⁴ <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/aim/>

⁵ <https://mythic.ai/technology/analog-computing/>

Machines & technologies

09
Les matériels à portes tolérants aux erreurs et universels programmables FTQC avec un nombre significatif de qubits logiques (> 100) sont indispensables pour commencer à traiter des problèmes particulièrement intéressants pour les industriels (notamment dans la simulation chimie-matériaux).

10
Même s’il ne semble pas exister de barrières scientifiques infranchissables, nous ne sommes qu’au tout début de l’aventure de l’ordinateur quantique et les verrous technologiques à lever sont très nombreux. L’effort pour tous les lever sera comparable à celui du développement des ordinateurs classiques. Les plus saillants sont :

- L’augmentation du nombre de qubits et la réduction de leur **taux d’erreurs à moins de 10⁻³ voire 10⁻⁴**.
- La **correction d’erreurs est le véritable juge de paix** pour s’affranchir des limites des calculateurs bruités NISQ et basculer vers les machines FTQC. Si des solutions mathématiques existent, leur implantation matérielle reste un des défis majeurs à relever au niveau technologique.
- La capacité à **développer et industrialiser la chaîne de commandes** présente des défis majeurs en termes d’adressage et de bruit. À terme, ces chaines de commandes doivent permettre d’initialiser, de contrôler et de mesurer un nombre important de qubits physiques (de 100 000 à 10 millions).
- La connexion rapide et efficace entre ordinateur classique et calculateur quantique pour **limiter le goulot d’étranglement de l’échange de données**.
- Des **progrès dans les technologies habilitantes** sont aussi nécessaires dans les domaines de la cryogénie, des composants électroniques et de la photonique.

11
En l’absence de mémoire quantique (QRAM), les algorithmes quantiques seront focalisés sur des problèmes à forte intensité de calcul nécessitant un faible volume de données d’entrée. La question de la faisabilité de cette QRAM reste entière, tant du point de vue technique que scientifique.

12
Certaines technologies de qubits (supra, atomes froids, ions piégés, etc.) seront limitées pour passer à l’échelle par la connectivité entre qubits et leur densité maximale sur un même cœur. Une solution pourrait passer par l’interconnexion entre cœurs quantiques.

13
Les différents types de calculateurs à porte et analogiques coexisteront dans les dix prochaines années (supra, ions piégés, silicium, etc.), sauf rupture scientifique (winner-takes all) ou crises majeures (« hiver » des financements).

Nous sommes actuellement dans une phase d’expérimentation, qui devrait se poursuivre dans les prochaines années avant que des logiques de sélection sur la base des performances technologiques se mettent en place. Avant la mise en place du FTQC, il est probable que **certaines technologies de qubits soient plus à même de résoudre certains types de problèmes**. Cette spécialisation pourrait également résulter des modèles économiques et des jeux d’acteurs, tant chez les constructeurs que les usagers.

En première estimation, il ne semble pas y avoir de problématique majeure liée à la consommation énergétique du Quantum Computing.

Au contraire, la consommation énergétique du calcul quantique pourrait constituer un avantage par rapport au calcul classique à l'ère du NISQ et de l'analogique (d'autant plus que le nombre de calculateurs restera limité à quelques milliers même dans les trajectoires les plus optimistes). Cela ne signifie pas que le quantique ne soulèvera pas des enjeux d'acceptabilité sociale sur ses impacts environnementaux. Dans un premier temps au moins, le développement du calcul quantique donnera lieu à une augmentation des besoins énergétiques dans la mesure où ces calculateurs seront connectés à des supercalculateurs dimensionnés indépendamment.

Passage au stade industriel

Au-delà de la disponibilité de matériels et logiciels industriels, le passage à un niveau industriel des usages du calcul quantique, c'est-à-dire reproductible à grande échelle, et avec un modèle économique affermi, repose sur plusieurs éléments clefs :

- Le développement d'algorithmes quantiques adaptés à leur cas d'usage.
- L'apprentissage et la formation des ingénieurs à l'algorithmie quantique.
- La disponibilité d'émulateurs quantiques pour mettre au point et tester les algorithmes dans des conditions optimales.
- La création de capacités quantiques dans des centres de calculs sponsorisés par les États (HQI pour la France) au-delà des outils « en ligne » proposés par les opérateurs globaux (IBM, Google, Microsoft, etc.).

La crédibilité des feuilles de route des acteurs du quantique sera éprouvée dans les 5 prochaines années.

Les acteurs du quantique (IBM, Microsoft, IQM, etc.) présentent des feuilles de route très ambitieuses aux horizons 2027-2029 dans leur marche vers le FTQC, avec des sauts considérables à opérer. Il convient d'être particulièrement vigilant au sujet des étapes à franchir dans ces roadmaps et l'annonce de leur franchissement. L'absence d'un glossaire commun entre les acteurs du quantique, de benchmarks de référence largement approuvés par l'industrie, amène à relativiser certaines annonces. Des métriques destinées à comparer les performances sont néanmoins développées : BACQ , QV (Quantique Volume), QSCORE (Quantum Score), etc. De plus, le respect de ces feuilles de route ambitieuses est incertain, et pourrait rebuter à terme les investisseurs dans un contexte de resserrement des conditions d'accès au financement.

Cas d'usages, applications et leurs incidences

Les marchés de déploiement industriel dans les dix prochaines années sont :

- **La finance** (optimisation de portefeuille, gestion de risques, etc.).
- **La chimie des petites molécules et les matériaux** (nouveaux matériaux, etc.).
- **La logistique** (tournée des agents, chargement optimal, etc.) si progrès significatifs.
- **La santé**, si progrès très significatifs.

Dans les 15 prochaines années, les impacts économiques potentiels des calculs quantiques sur les filières et organisations industrielles (y compris services) sont anticipés comme étant essentiellement de l'ordre de l'amélioration des performances et des processus, non de la disruption.

Selon les cas d'usages potentiels identifiés avec les partenaires (une centaine), la plupart d'entre eux ont des incidences limitées sur les modèles d'affaires, soit du fait de leur nature (optimisation, etc.), soit du fait de l'accès très probablement partagé à ces outils pour les organisations d'un même secteur (aspects réglementaires pour éviter les biais de concurrence, notamment dans des secteurs régulés).

En supposant l'existence d'un calculateur quantique universel à large échelle et tolérant aux erreurs, les plus grands impacts marché seront sur les secteurs du biomédical et pharmaceutique (nouvelles molécules, vaccins, etc.) ainsi que dans la chimie (batteries, réactions chimiques, engrais, etc.).

Les évolutions structurelles de secteurs d'activités dans les 15-20 prochaines années seront par ailleurs majeures, dans le cadre des transitions et des ruptures en cours sur les technologies et les modèles d'affaires. Le couplage entre les supercalculateurs, processeurs quantiques et les progrès de l'IA seront des leviers pour accompagner ces disruptions (véhicules autonomes, pilotage de productions décentralisées d'énergie, etc.).

Aspects éthiques et géopolitiques

Les applications du calcul quantique en termes de recherche, d'optimisation, de simulation ne présentent pas d'enjeux éthiques particuliers qui ne soient inclus dans les usages existants de l'IA ou du HPC.

On observe une course au calcul quantique entre les principales puissances mondiales. Le quantique est perçu comme un enjeu de souveraineté majeur au vu de ses implications stratégiques potentiellement critiques (économique, militaire, etc.).

Cela pose la question des perspectives de diffusion internationale de l'innovation et des technologies quantiques, avec un risque de confinement au sein de blocs géopolitiques rivaux, voire des États. Au-delà de ces aspects géopolitiques, la question de l'accès inégal à des technologies clefs de calcul quantique dans certains domaines régulés est susceptible de créer une concurrence faussée. Les législateurs dans ce contexte pourraient viser un accès homogène aux calculateurs.

L'image du « quantique » : la faible connaissance du sujet et des enjeux est un frein, y compris dans le monde des scientifiques, des ingénieurs et des affaires.

Un travail de pédagogie apparaît nécessaire pour favoriser l'acceptabilité sociale du quantique, et répondre aux potentiels discours rejetant ces technologies sur la base d'argumentaires plus ou moins fantasmés (impact environnemental, accroissement des inégalités et du contrôle social, etc.). Il est important dans le futur de faire savoir comment le calcul quantique pourra répondre aux défis sociétaux du futur pour tout le monde : meilleure gestion de l'énergie, compréhension du climat, santé, nouveaux matériaux, etc.

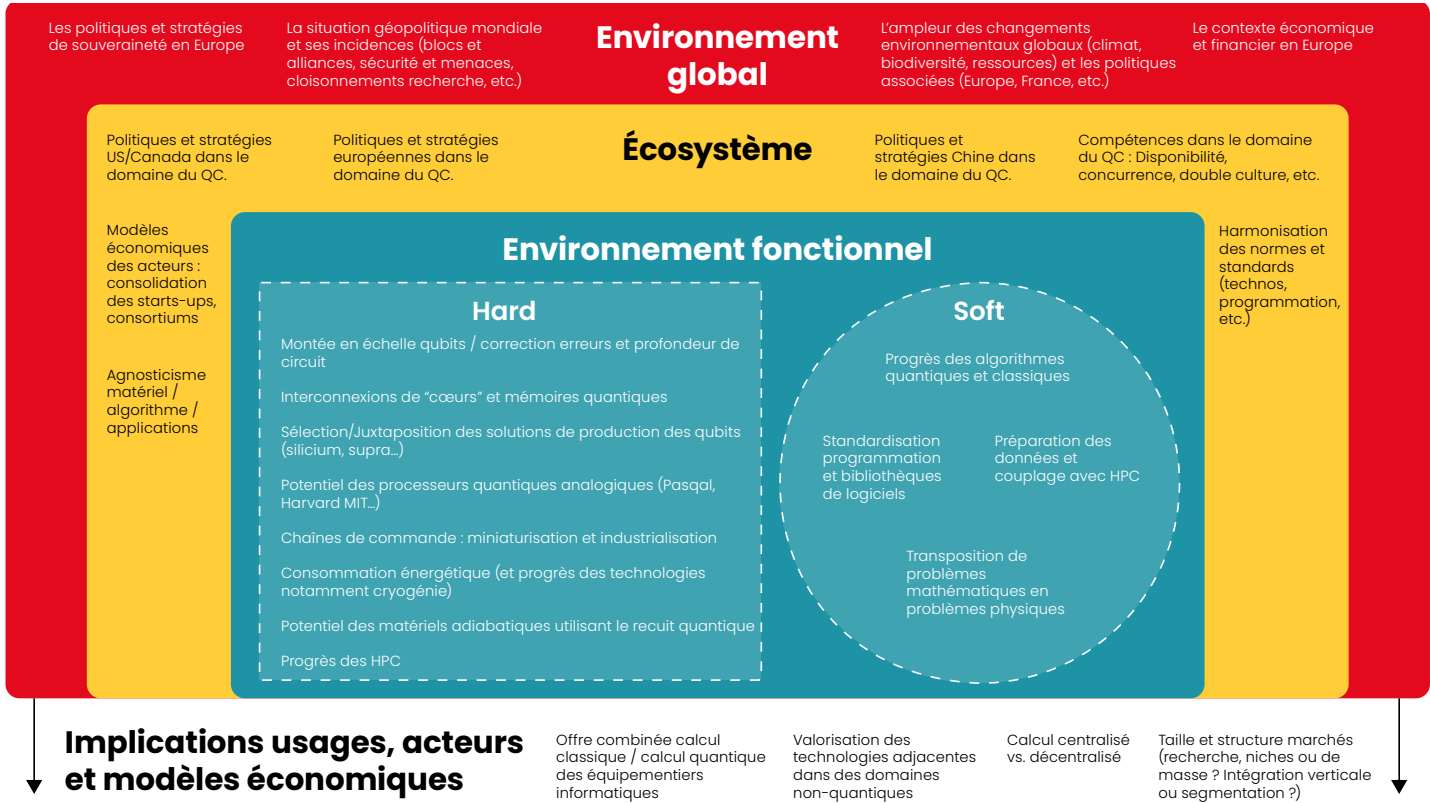
LA MÉTHODE PROSPECTIVE

Dans un domaine en émergence et rempli d’incertitudes la méthode prospective est particulièrement adaptée à ce genre d’études. Nous nous sommes appuyés sur le cabinet de conseil Futuribles par une approche basée sur l’**analyse morphologique** par scénarios¹ qui permet d’évaluer différents futurs possibles ou vraisemblables. C’est un travail collaboratif qui a impliqué la participation de 13 grandes entreprises de différents secteurs d’activités, mais aussi des experts du monde académique, consultants, fabricants ou start-up. Ce travail a commencé en décembre 2022 pour une durée de 12 mois comprenant un cycle de 8 réunions plénières et 4 visites de sites (laboratoires, centres de calcul et start-up). Notre démarche se concentre sur un **périmètre français**, mais adopte une perspective globale, en intégrant dans l’analyse les développements en cours ou à venir sur les « points chauds » liés au calcul quantique à l’international. L’un des avantages de cette étude prospective est qu’elle peut être réactualisée en modifiant les jalons et verrous identifiés dans les scénarios.

Système prospectif

La première étape a été d’établir une première vision large du système prospectif, prenant en compte les évolutions de l’environnement global, de l’écosystème et des acteurs, les aspects technologiques et scientifiques, usages et incidences. La **version complète du système comprend 140 variables**.

¹ <https://www.futuribles.com/lanalyse-morphologique/>



Après hiérarchisation nous avons simplifié le système à l’aide de **15 variables réparties en quatre grands domaines** (liste des variables cf. annexe 2).

Chaque variable a fait l’objet d’une fiche détaillée décrivant les grands verrous du calcul quantique sur lesquels nous avons émis des jeux d’hypothèses et jalons (rapport confidentiel). C’est à partir de ces hypothèses que nous avons construit nos différents scénarios.

La construction des scénarios

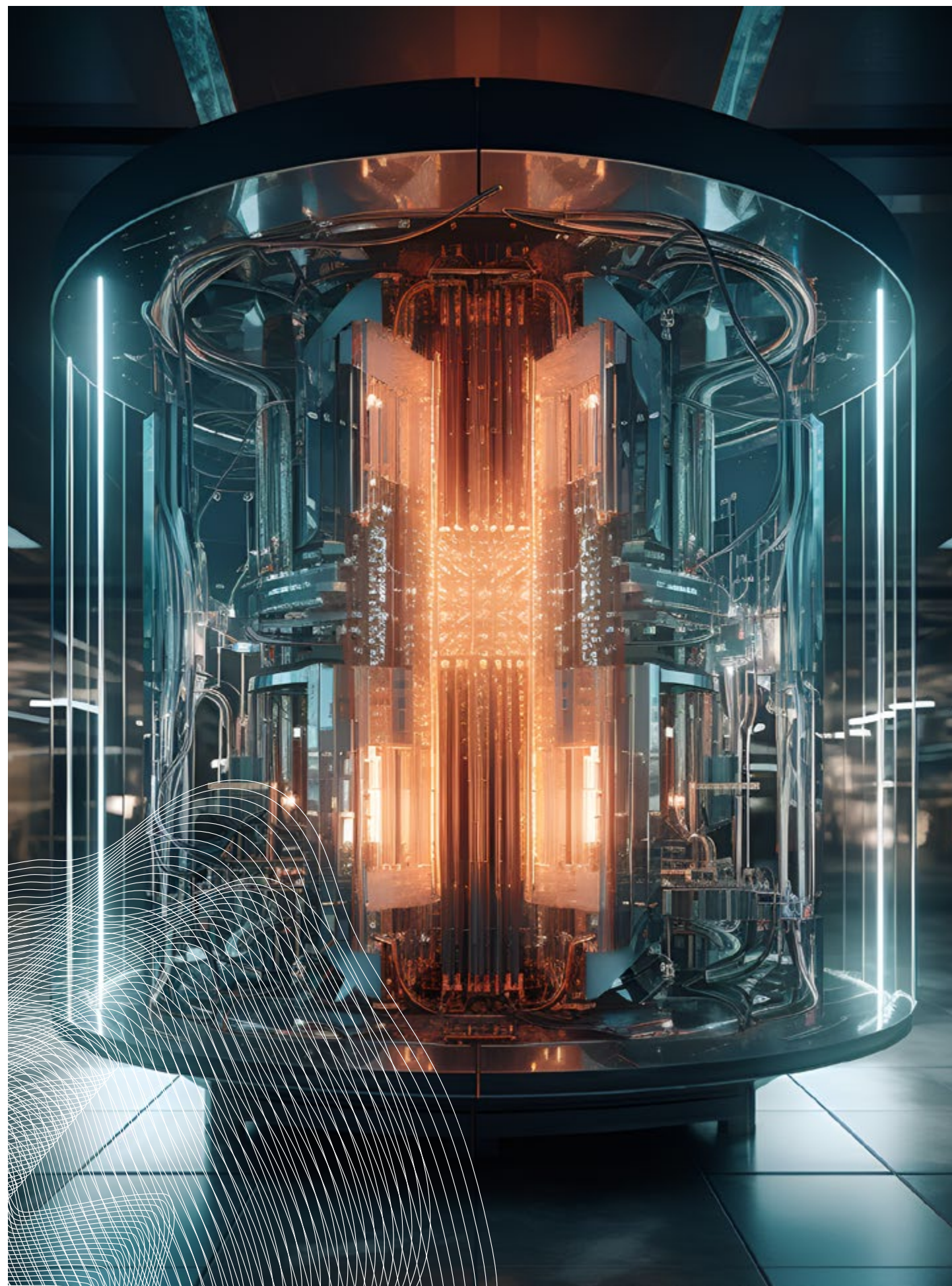
Nous avons construit **4 scénarios issus des grandes tendances et hypothèses identifiées** pour chaque variable du système prospectif. La construction de ces scénarios se base sur des hypothèses pivots issues principalement des domaines techno-scientifiques. Ces paramètres hardware et software constituent les éléments de basculement d’un scénario à un autre (qui se traduisent principalement par les évolutions du nombre de qubits et des taux d’erreurs). Les hypothèses issues des autres variables ont permis d’esquisser les jeux d’acteurs économiques ainsi que des contextes globaux pour chacun des scénarios.

Les cas d’usages

Dans le cadre d’ateliers, nous avons demandé aux **partenaires de positionner leurs cas d’usages** dans les différents scénarios en fonction de leur secteur d’activités (transport/logistique, finance, chimie/matériaux, télécoms, énergie, santé, etc.). Ces informations précieuses nous ont permis d’évaluer l’impact du calcul quantique du point de vue des utilisateurs industriels/entreprises, notamment en fonction des performances requises des calculateurs pour traiter le problème mathématique associé (taille, type d’algorithme, profondeur de calcul, taux d’erreurs, etc.).

Approches économique et marché

À partir d’interviews de fabricants de matériel pour le calcul quantique (machines, technologies habilitantes, etc.) nous avons posé un certain nombre d’**hypothèses marché sur l’évolution du nombre de systèmes quantiques**. Appliqués aux différents scénarios, nous avons évalué un encadrement du marché du calcul quantique se limitant à la vente de systèmes quantiques et leurs services associés (ex : cloud, etc.) mais nous n’avons pas évalué l’impact des externalités positives (amélioration des process et augmentation des chiffres d’affaires des utilisateurs), difficile à appréhender.



LES SCÉNARIOS

Les quatre scénarios se traduisent par différents **jalons de performances des calculateurs (nombre de qubits, taux erreurs, etc.)** résultant de la disponibilité, de la qualité et de **la montée en échelle de plusieurs technologies habilitantes** (chaîne de commandes, interconnexion, mémoire quantique, etc.). Il convient d'ajouter à ces paramètres relatifs aux matériels, ceux relatifs aux progrès dans l'algorithmie quantique et dans l'environnement logiciel au sens large.

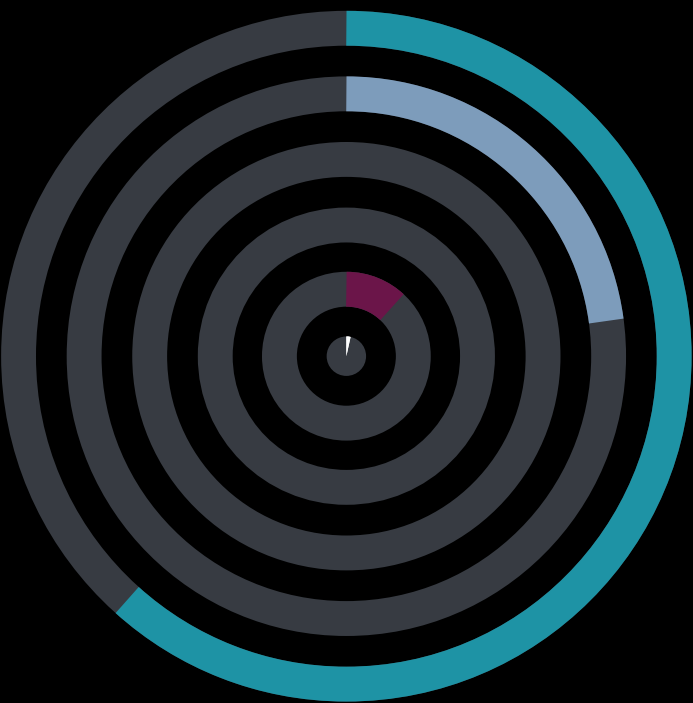
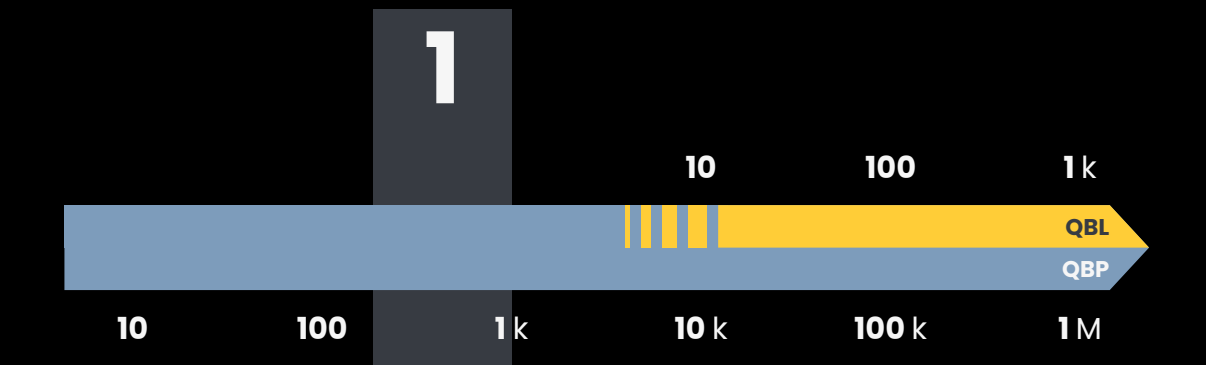
En effet, les performances des calculateurs conditionnent les algorithmes pouvant être implémentés avec des résultats exploitables, d'autant plus dans un contexte où les calculateurs à portes demeureraient nettement bruités (NISQ). A l'inverse, les algorithmes quantiques ont des exigences plus ou moins fortes en termes de profondeur de circuit (nombre de portes logiques, de cycles de calculs, etc.) et de préparation des données, qui conditionnent les types de machines sur lesquels ils peuvent être implémentés. Schématiquement, pour un problème exploitant un nombre de qubits donné, plus la profondeur de circuit d'un algorithme est importante, plus il est nécessaire de disposer de qubits aux taux d'erreurs limités.

La recherche algorithmique quantique étant un champ de recherche actif, nos scénarios intègrent des **hypothèses de progrès dans la découverte d'algorithmes à la profondeur de circuit limitée**, ou qui parviennent par des approches astucieuses à obtenir des résultats exploitables malgré le bruit (tolérance au bruit). Nous n'avons pas formulé d'hypothèses algorithmiques en rupture profonde, remettant en cause les types de problèmes adressables par le calcul quantique.

Pour chaque scénario, nous avons identifié précisément les jalons techno-scientifiques nécessaires à leur réalisation, ainsi que les applications et cas d'usage principaux. Nous avons également inclus ces scénarios dans des contextes globaux intégrant les impacts économiques et sociétaux. Un pourcentage de vraisemblance quant à l'atteinte ou le dépassement du scénario d'ici à 2042 est indiqué, basé sur une enquête menée auprès du groupe de travail constitué par les partenaires.

SCÉNARIO 1 - LA PORTE ÉTROITE

Small NISQ & analogique



% des membres du GT pensant que le scénario sera atteint :

61.5 D'ICI 2025

23 D'ICI 2032

00 D'ICI 2042

00 EN 2050 OU APRÈS

11.5 JAMAIS

04 NE SE PRONONCE PAS

% des membres du GT pensant que le scénario sera atteint ou dépassé en 2042

2042 I

84.5 %

Descriptif général

Dans ce scénario, l'informatique quantique prend la forme de « Mini-NISQ » et de processeurs analogiques. Les calculateurs tolérants aux erreurs (FTQC) demeurent inaccessibles. Pour cause, l'augmentation du nombre de qubits physiques se fait au détriment de leur fidélité. L'implémentation des méthodes de **correction d'erreurs n'est pas efficace**. En conséquence, l'industrie **ne parvient pas à dépasser le seuil de 1 000 qubits intricables** avec un niveau de bruit suffisamment faible (taux erreur supérieur à 10^{-3}). En termes d'applications, les processeurs quantiques de ce scénario sont principalement utilisés pour de l'optimisation sur **des problèmes à très faible volume de données mais forte intensité de calcul**. Malgré ces limitations, on observe des avantages en termes de vitesse (accélération linéaire) et de consommation énergétique pour des applications simples. Dans ce contexte, **le matériel analogique apparaît fortement pertinent**. Les limitations des performances des calculateurs sont accentuées par les progrès insuffisants de la recherche algorithmique. **Le nombre d'algorithmes à faible profondeur de circuit demeure réduit**, ce qui limite les possibilités d'implémentation sur le Mini-NISQ. Cette double impasse matérielle et logicielle alimente un cercle vicieux où la recherche algorithmique stagne en raison de l'impossibilité de tester en conditions réelles les calculs envisagés. **Il existe donc une porte étroite pour les applications du calcul quantique**, mais l'ouvrir davantage nécessite de faire sauter de nouveaux verrous.

Les jalons techno-scientifiques

- < 1000 qubits physiques bruités et intricables.
- Taux erreurs opération entre 2 qubits physiques $> 10^{-3}$.
- Correction d'erreurs non efficace.
- Quelques qubits logiques non utiles car très bruités.
- Transfert de données classiques/quantiques limité par un faible couplage avec le HPC.
- Développements algorithmiques limités.

Potentiel de calcul & avantages

Le NISQ est utilisé pour des problèmes de **taille limitée**, exploitant quelques **algorithmes tolérants au bruit et de faible profondeur**.

L'analogique permet de traiter **certains problèmes plus complexes que le NISQ** avec un espace de pertinence commerciale

Des avantages quantiques en vitesse (accélération linéaire / début polynomial) et de consommation énergétique pour des applications simples avec des jeux de données simplifiés ou petits :

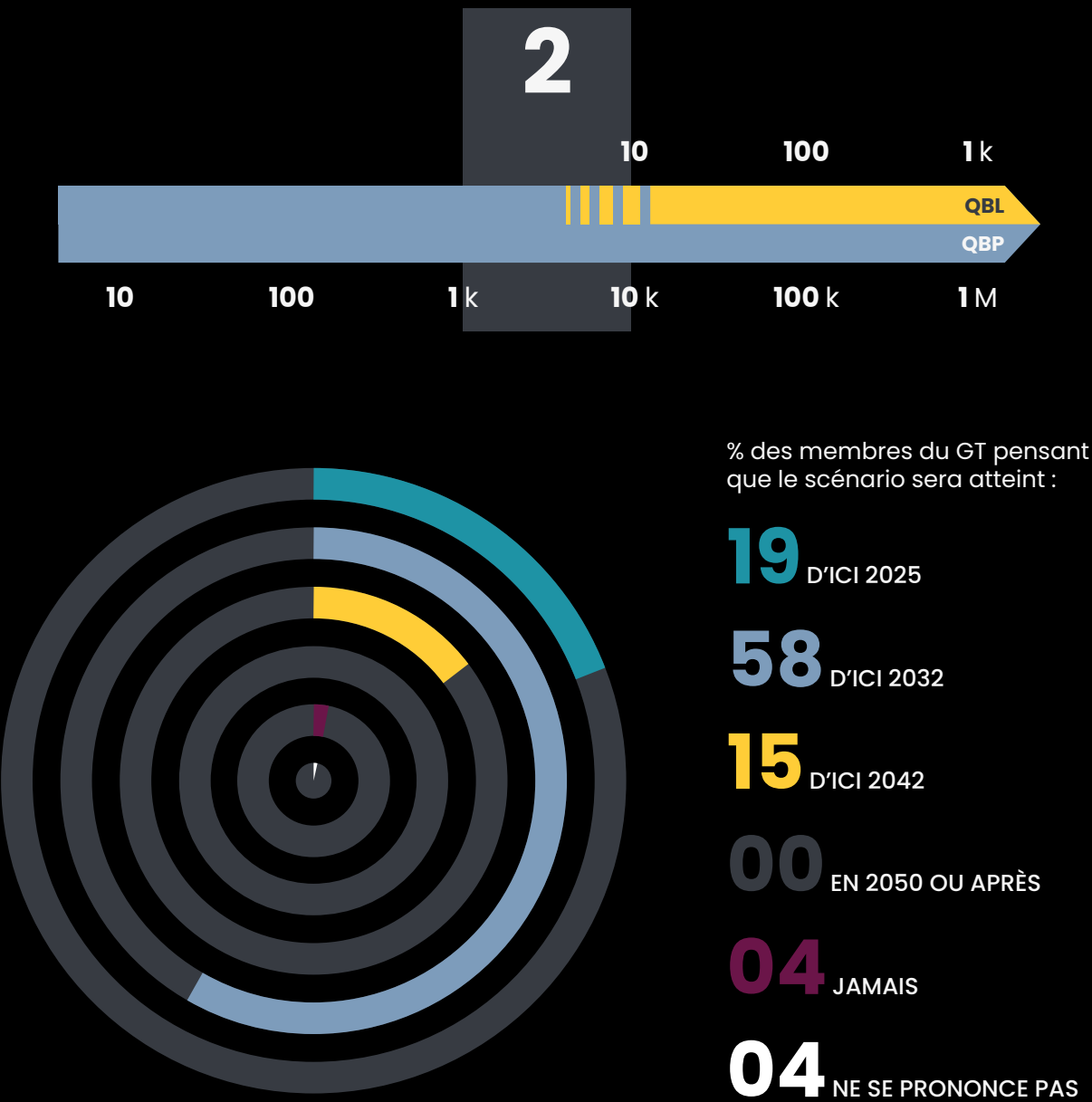
- Optimisation avec peu de degrés de liberté : logistique (tournées), transport (organisation de sièges voyageurs), finance (évaluation risques clients, etc.), pharma (préparation études cliniques et ordonnancement de batch).
- Préparation données ML et clustering à très petite échelle.

Impacts économiques et sociétaux

L'absence de percées majeures conduirait si ce scénario se réalise durablement à **une réduction des financements** et rapidement à **une concentration horizontale des acteurs**. Certains abandonnent (start-up, etc.) ou se font racheter par d'autres qui étendent leur portefeuille technologique. Certains GAFAM abandonnent les investissements sur le quantique ou cèdent leur activités. Dans ce scénario, il y a coexistence des machines NISQ et analogiques. Les machines NISQ et analogiques seront couplées à de grands centre HPC et sont dans des gammes de prix équivalentes aux machines actuelles. Les financements étatiques se maintiennent (recherche, sécurité/militaire).

SCÉNARIO 2 • EXTENSION DU DOMAINE QUANTIQUE

Large NISQ & analogique



% des membres du GT pensant que le scénario sera atteint ou dépassé en 2042

2042 I

92 %

Descriptif général

Dans le deuxième scénario, le paysage de l'informatique quantique est caractérisé par des systèmes analogiques profonds et **des processeurs à portes NISQ capables de gérer jusqu'à 10 000 qubits physiques**. Cette période est témoin d'une **amélioration de la fidélité des qubits** et d'une avancée dans la réduction des erreurs (réduction taux d'erreurs cependant limitée à 10^{-5}). Ce scénario bénéficie d'une dynamique de progrès continus et conjoints du NISQ, du HPC et de l'algorithmie. Des ruptures ont lieu dans la **découverte d'algorithmes tolérants au bruit et à la profondeur de circuit limitée**. Parallèlement, on observe des avancées fortes dans la **mitigation d'erreurs et le couplage avec le HPC**, qui permettent d'optimiser **l'implantation d'algorithmes de plus grande profondeur**. Du fait du nombre plus important de qubits physiques disponibles, **les processeurs quantiques analogiques permettent de résoudre des cas d'usages de plus en plus complexes** par rapport au scénario 1. Les systèmes **NISQ et analogique coexistent** dans ce scénario et sont donc en concurrence sur certains usages. Les processeurs quantiques de ce scénario démontrent des **avantages en termes de vitesse (jusqu'à une accélération polynomiale), de précision des algorithmes heuristiques et de consommation énergétique**. Cependant, leurs applications restent très spécifiques (optimisation, simulation à petite échelle, assistance machine learning et clustering, etc.).

Malgré ces avancées, **le verrou de la correction d'erreurs n'est toujours pas levé** : le nombre de qubits adressables par la chaîne de commandes fait face à un plafond, conduisant à un risque de stagnation dans les progrès des processeurs quantiques. Si ce scénario correspond à l'état de l'art en 2042, il sera probablement difficile d'optimiser davantage la fidélité des calculs à portes et de continuer la montée en échelle du NISQ. L'extension du domaine du quantique au-delà de ce scénario est une lutte contre les obstacles technologiques et scientifiques.

Les jalons techno-scientifiques

- Analogique et NISQ « profonds » (< 10 000 qubits physiques).
- Taux erreurs opération entre 2 qubits physiques compris entre 10^{-3} et 10^{-5} .
- Progrès de la mitigation d'erreurs mais correction d'erreurs non efficace.
- Quelques dizaines de qubits logiques non utiles car encore imparfaits ou en nombre insuffisant.
- Progrès de la chaîne de commande pour piloter des milliers de qubits physiques.

- Meilleur couplage avec le HPC pour optimiser la préparation de données.

Potentiel de calcul & avantages

NISQ sur des problèmes de petite taille, principalement heuristiques.

Analogique tirant parti des progrès du NISQ sur la connectivité, le contrôle des qubits, voire la mitigation d'erreurs et permettant de traiter des problèmes d'optimisation et simulation de petite/moyenne taille. Les applications au stade industriel se structurent avec des avantages en vitesse (jusqu'au polynomial) et consommation d'énergie, mais restent très spécifiques :

Optimisation avec davantage de degrés de liberté : finance (optimisation dynamique d'un portefeuille d'actif et prévision de marchés), télécommunications (placement d'antennes dans les réseaux), transports (adaptation planifiée de plans de transport).

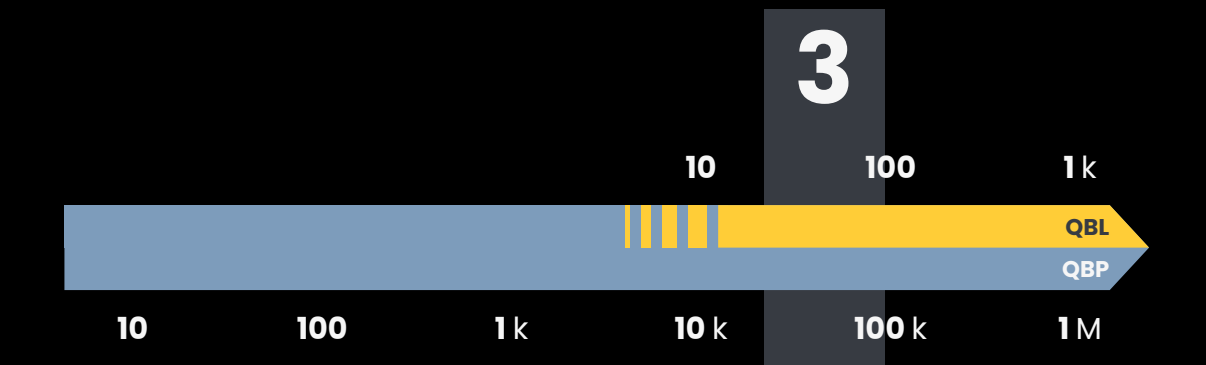
- Simulation moléculaire à petite échelle : santé (interaction moléculaire & affinités avec des solvants), chimie (modélisation de propriétés de matériaux < 100 atomes).
- Préparation données ML et clustering à petite échelle.
- Recherche fondamentale.

Impacts économiques et contextes sociétaux

Impacts sur les « process » industriels mais pas de révolution sur les métiers sauf sur la **finance et la santé où les impacts peuvent être majeurs**. L'assèchement des financements publics pourrait freiner le développement du calcul quantique. On assisterait de plus en plus à une **concentration verticale des acteurs** pour offrir des solutions complètes pour les clients. Comme dans le scénario précédent, il y a **coexistence des machines NISQ et analogiques**. Les machines NISQ et analogiques seraient couplées à de grands centres HPC et dans des gammes de prix équivalentes aux machines actuelles.

SCÉNARIO 3 • LES PORTES DU FTQC SONT OUVERTES

La suprématie quantique arrive



% des membres du GT pensant que le scénario sera atteint :

00 D'ICI 2025

50 D'ICI 2032

31 D'ICI 2042

15 EN 2050 OU APRÈS

00 JAMAIS

04 NE SE PRONONCE PAS

% des membres du GT pensant que le scénario sera atteint ou dépassé en 2042

2042 I

81 %

Descriptif général

Ce scénario marque le **début des processeurs quantiques tolérants aux erreurs (FTQC)**. Les progrès dans le contrôle des qubits, la miniaturisation de la chaîne de commandes et les **premières interconnexions de cœurs quantiques** permettent d'adresser des dizaines de milliers de qubits. **Les verrous techno-scientifiques sont levés sur la correction d'erreurs** et le théorème du seuil est mis en application, ce qui permet la montée en échelle du nombre de qubits sans dégrader la fidélité des calculs.

Les potentialités des applications FTQC ne sont, cependant, pas pleinement réalisées en raison du **nombre de qubits logiques qui ne dépasse pas encore la centaine** dans ce scénario. Plusieurs blocages peuvent en être la cause : industrialisation de la chaîne de commandes limitée en raison de coûts élevés et d'inerties de développement, limitation dans le nombre d'interconnexions de cœurs quantiques. **L'absence de QRAM à large échelle** reste également un verrou majeur dans le développement des applications à fort volume de données. La nature des problèmes traités demeure similaire à celle du scénario 2, mais **l'avantage en vitesse du calcul quantique devient plus prononcé**, atteignant des niveaux super-polynomiaux pour certaines applications. La nature déterministe des algorithmes FTQC permettent de **trouver des solutions exactes à des problèmes inaccessibles jusqu'alors**. **Les systèmes analogiques continuent de bénéficier des progrès en matière de mise à l'échelle et d'amélioration de la fidélité**, mais leur pertinence commence à diminuer au vu des progrès du FTQC. Les principaux obstacles sur la correction d'erreurs et la chaîne de commandes ayant été levés, les portes du FTQC sont bel et bien ouvertes !

Les jalons techno-scientifiques

- Taux d'erreurs qubits physiques $< 10^{-5}$.
- Rupture sur la correction d'erreurs favorisée par la montée en échelle de qubits moins sensibles à certains types d'erreurs ou de nouvelles méthodes de correction d'erreurs.
- Moins de 100 qubits logiques avec un taux d'erreurs en-dessous de 10^{-12} .
- Montée en échelle des qubits permise par la miniaturisation des composants de la chaîne de commandes et la montée en échelle de la production.
- Interconnexions entre quelques cœurs quantiques.
- Meilleur couplage avec le HPC.

Potentiel de calcul & avantages

Les potentialités des algorithmes FTQC sont inégalement exploitées en raison d'un nombre de qubits logiques encore limité.

La nature des problèmes traités varierait peu par rapport au scénario 2, toutefois, l'avantage de vitesse du quantique s'accroît (**jusqu'à super-polynomial**) et la **suprématie quantique serait atteinte sur des cas d'usages (à dimension pratique)**.

L'analogique profite des progrès de scalabilité/ fidélité des qubits, mais son espace de pertinence se réduit au vu des progrès des calculateurs à porte. Il pourrait maintenir un avantage de consommation énergétique et de coût par rapport au FTQC.

Exemples de cas d'usages :

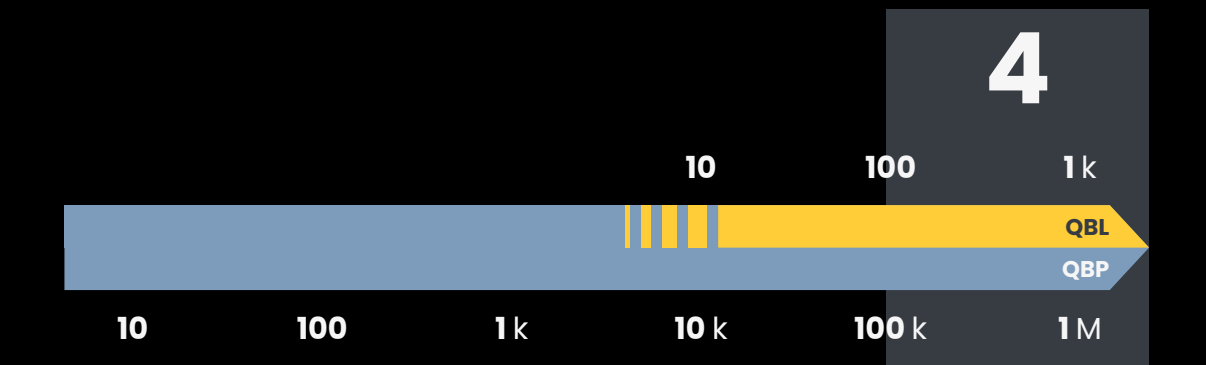
- Optimisation : Santé (processus chimique à base de fluides - Lattice Boltzmann), Transport (adaptation d'aléas dans le transport), Finances (pricing de produits dérivés), etc.
- Simulation aérodynamique simple.
- Préparation de données Machine Learning et clustering à grande échelle.
- Recherche fondamentale.

Impacts économiques et contextes sociétaux

Les grands groupes sont prêts pour l'avènement du FTQC (cas d'usages identifiés, acquisitions solutions hardware et logicielles, RH, etc.) mais pas encore pour l'industrialisation des processeurs en raison de coûts élevés et d'inerties de développement, notamment sur la chaîne de commande. Il y a une consolidation des acteurs du marché, indiquant une maturation du secteur. Le **contexte d'un monde de blocs** pourrait renforcer le poids des acteurs publics, de la **recherche militaire**, les solutions et matériels du calcul quantique étant **concentrés autour de quelques acteurs « winner takes all » / pôles par grandes nations**. Les machines à portes coexistent avec des machines analogiques possédant un nombre de qubits physiques importants qui les rendent de plus en plus pertinentes sur des problèmes d'optimisation. Nous estimons que dans ce cas de figure, **l'arrivée des machines quantiques générera une croissance additionnelle du marché du HPC**. Le prix des machines quantiques restera cependant dans le même ordre de grandeur qu'au scénario précédent.

SCÉNARIO 4 • LE SAUT QUANTIQUE

En route vers le Very Large Scale Computing



% des membres du GT pensant que le scénario sera atteint :

00 D'ICI 2025

15 D'ICI 2032

38.5 D'ICI 2042

38.5 EN 2050 OU APRÈS

00 JAMAIS

08 NE SE PRONONCE PAS

% des membres du GT pensant que le scénario sera atteint ou dépassé en 2042

53.5 % | 2042

Descriptif général

Dans ce dernier scénario, le FTQC fait un bond en avant, s'embarquant sur une trajectoire vers le calcul quantique à très grande échelle (VLSQ). Les processeurs quantiques sont désormais capables d'adresser **des centaines de qubits logiques** en raison de l'industrialisation de la chaîne de commandes et de la mise en place d'une **architecture modulaire permettant d'interconnecter des cœurs sans limite**. La voie apparaît libre pour le développement de processeurs aux milliers de qubits logiques. Toutefois, le temps nécessaire au dépassement des verrous clés pour ce scénario et à la montée en échelle de la production industrielle rendent peu probable le développement du VLSQ d'ici à 2042. Les progrès du FTQC ouvrent l'accès à de nouveaux types de problèmes et sur des tailles de données plus importantes. **L'avènement de la mémoire quantique (QRAM)** offre notamment de nouvelles perspectives pour les applications nécessitant un fort volume de données (recherche et adressage). L'avantage en vitesse du FTQC devient encore plus significatif, avec une accélération exponentielle rendue possible par les avancées dans l'algorithmie et la mise à l'échelle des qubits. **Les systèmes analogiques** sont confrontés **au défi de la spécialisation et de la réduction des coûts pour survivre face à l'avancée du FTQC**. Ils persistent dans des applications de niche, offrant des avantages en termes d'énergie ou de coût par rapport au FTQC. Le saut quantique est réalisé, des perspectives nouvelles sont ouvertes pour l'informatique.

Les jalons techno-scientifiques

- Plus de 100 qubits logiques avec un taux d'erreurs en-dessous de 10^{-12} .
- Industrialisation et chute des prix pour la chaîne de commandes (facteur d'ordre 100).
- Interactions possibles entre de nombreux cœurs quantiques
- Rupture sur la QRAM ouvrant de nouvelles perspectives d'applications.
- Architecture modulaire des systèmes quantiques sans limite d'interconnexions et couplage toujours plus fort avec le HPC pour le traitement de données
- Trajectoire désormais sans obstacle techno-scientifique vers les milliers de qubits logiques (VLSQ), mais inerties de développement à horizon 2042.

Potentiel de calcul & avantages

Nouveaux types de problèmes accessibles et pour des tailles de données plus importantes. **Avantage de vitesse jusqu'à exponentiel** favorisé par des progrès sur les algorithmes FTQC et la montée en

échelle des qubits.

Persistance possible de l'analogique sur certains usages de niche, avec avantage énergétique et/ou de coût par rapport au FTQC. Le traitement rapide de problèmes et à une fréquence élevée permet d'adresser des cas d'usage où la **temporalité est un enjeu critique**.

Exemples de cas d'usages :

- Optimisation : Santé (reconstruction de génomes), Communication (placement d'antennes dans les réseaux), Transport (adaptation d'aléas dans le transport), Finance (pricing de produits dérivés, marché aléatoire), etc.
- Recherche dans une base non indexée : santé (recherche d'une séquence nucléotidique dans un génome).
- Simulation : santé (interaction moléculaire et affinités avec les solvants).
- Préparation données ML et clustering pour l'IA.
- Recherche fondamentale.

La résolution de problèmes de **factorisation des grands nombres et d'équations différentielles partielles** ne ferait plus face à des obstacles techno-scientifiques majeurs, mais ne serait **pas forcément atteinte en 2042** en raison des inerties de montée en échelle des calculateurs.

Impacts économiques et contextes sociétaux

L'IA est omniprésente dans la société et utilise le calcul quantique pour réduire sa consommation énergétique. L'impact social et politique du quantique devient tangible, avec des apports pour la transition énergétique et la santé. La dissémination de la technologie devient de plus en plus contrôlée dans des contextes de détournements malveillants ou de souveraineté. Il pourrait y avoir des **risques potentiels d'incompréhension de la population qui se sent dépassée par la technologie** quantique. Il faut dans ce scénario faire attention aux **segmentations des marchés FTQC : un segment premium destiné aux centres HPC les plus performants** mais ne dépassant pas le prix des meilleurs supercalculateurs et un **segment milieu de gamme avec un prix plus accessible** qui permet de multiplier les volumes vendus. Le marché des **machines analogiques est fortement cannibalisé par l'arrivée des machines à portes et ne peut survivre qu'au prix d'une réduction de coût drastique**. Dans ce scénario, le quantique génère une croissance additionnelle très significative du marché du HPC.

Synthèse : typologie de calculs adressables selon les scénarios

Types de problèmes adressables * : taille du problème	SC1 LA PORTE ÉTROITE	SC2 EXTENSION DU DOMAINE	SC3 LES PORTES DU FTQC	SC4 LE SAUT QUANTIQUE
Optimisation (Annealing & QUBO)	**	***	***	****
Simulation (VQE)		*	**	**
QML (QNN)	*	**	***	****
Recherche & adressage (Grover)				*
Factorisation (Shor)				⌚
Equations différentielles (HHL)				⌚
Avantage de vitesse VS classique	Linéaire	Jusqu'à polynomial	Jusqu'à super polynomial	Suprématie quantique

Nous avons synthétisé les types de problèmes adressables en fonction des scénarios, sans faire la distinction entre les problèmes adressables par types de machines (analogiques ou à portes).

Les problèmes d’optimisation et de Quantum Machine Learning (QML) sont adressables dès le scénario 1 pour de petits jeux de données; puis pour des problèmes de plus en plus complexes avec l’augmentation du nombre de qubits disponibles.

Le nombre de qubits adressables à partir du scénario 2 permet d’envisager des applications dans la simulation physico chimique et le développement de matériaux.

Avec le scénario 4 et l’avènement de la QRAM, on devrait pouvoir traiter avec un avantage quantique les algorithmes de recherches et adressage.

Les problèmes de factorisation des grands nombres nécessitent pour être résolus un nombre considérable de qubits logiques, nombre qui ne sera très probablement pas atteint avant le scénario VLSQ (Very Large Scale Computing). De même, la résolution d’équations différentielles partielles nécessite des performances en précisions et en intensité de calcul très élevées avec un flux de données très important. Ces caractéristiques ne seront probablement pas envisageables avant l’avènement de la QRAM et du VLSQ.

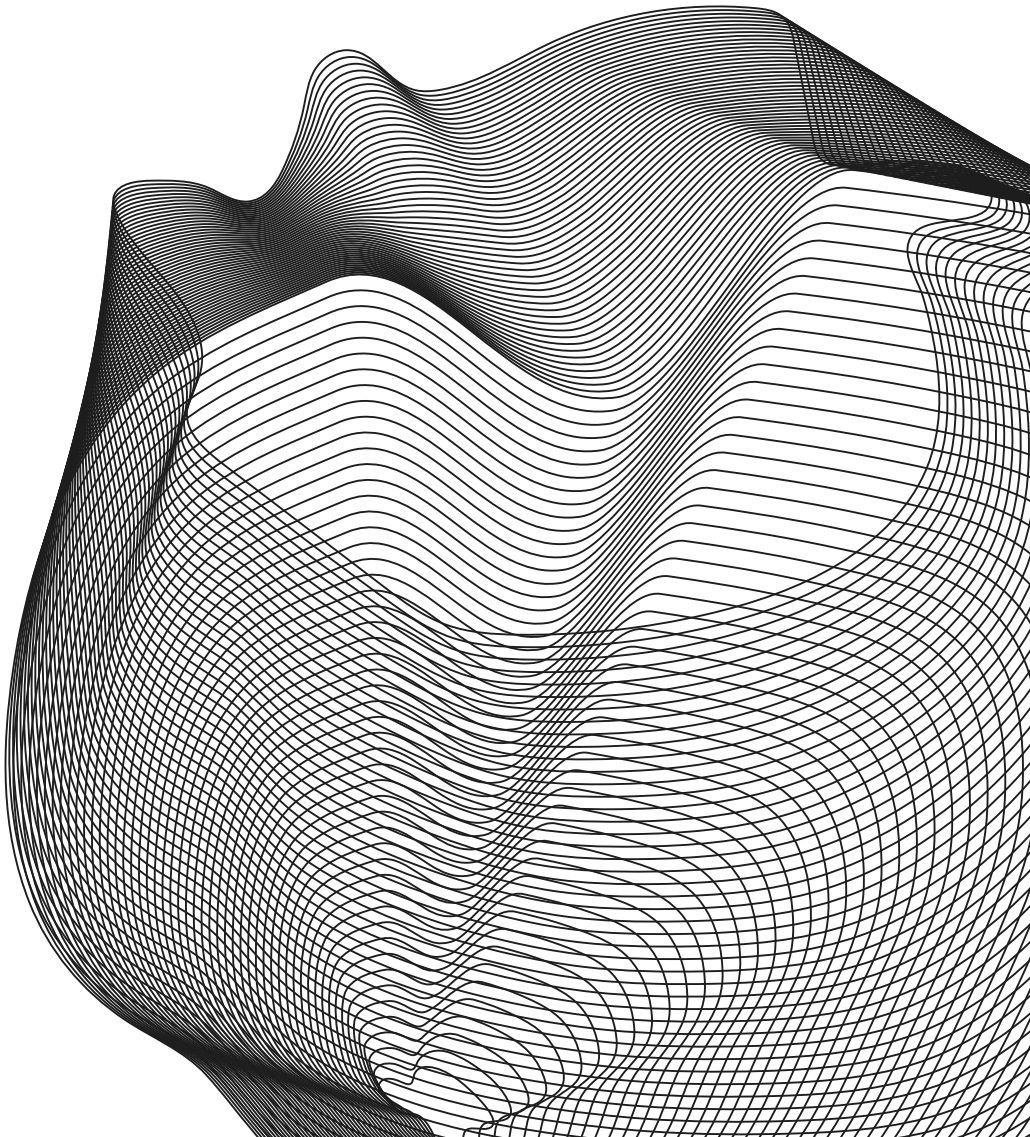
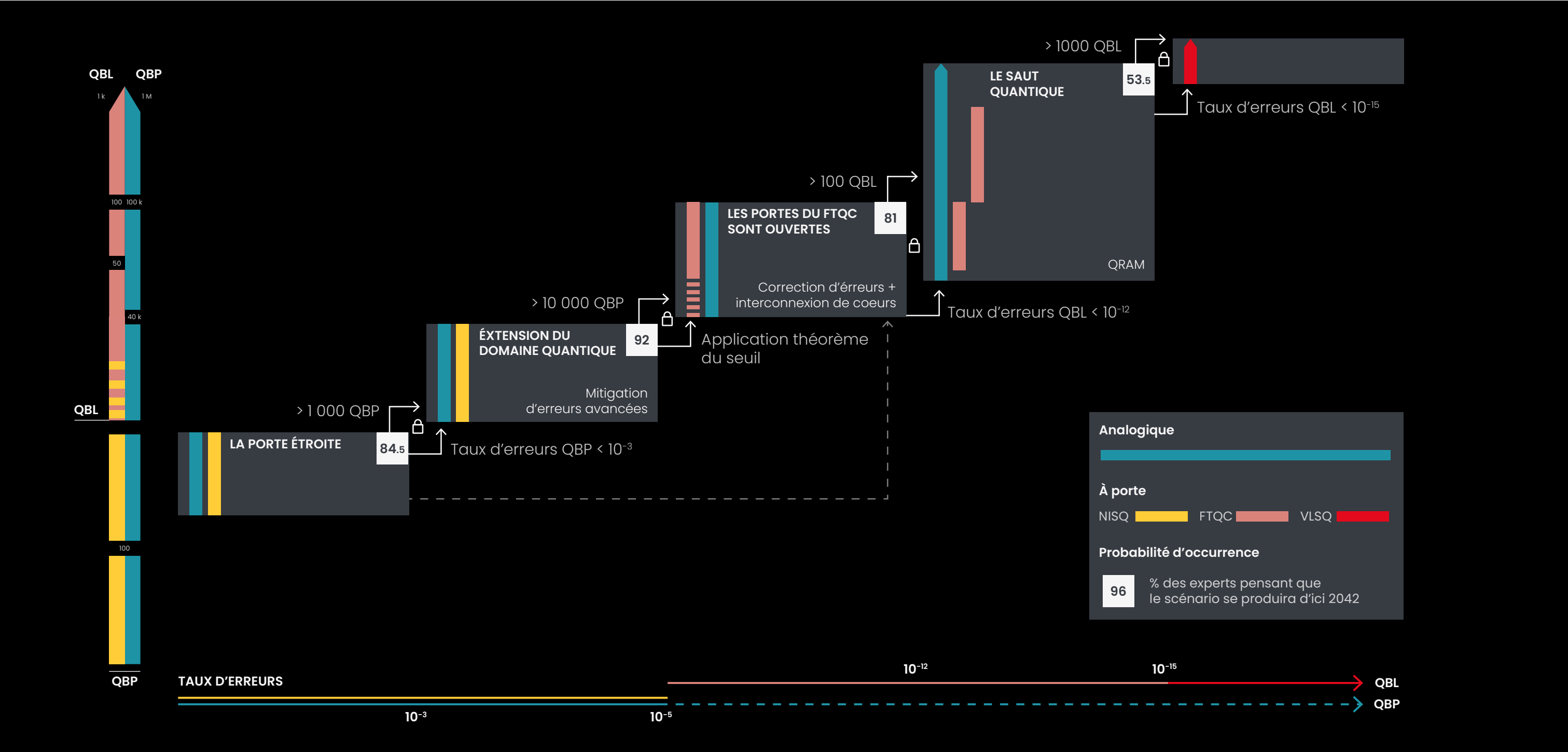


Diagramme des scénarios



Légende du diagramme :

Ces scénarios suivent une logique de progression des performances des calculateurs et des calculs réalisables selon **2 axes importants : le nombre de qubits utilisables et le taux d'erreur de ces qubits**. Nous avons symbolisé avec des couleurs différentes les technologies analogiques (en bleu), NISQ (en jaune), FTQC (en rose) et VLSQ (en rouge).

En abscisse, l'échelle représente le taux d'erreurs des qubits physiques des machines NISQ et analogiques pour les scénarios 1 et 2, puis le taux d'erreurs des qubits logiques FTQC pour les scénarios 3 et 4. A partir du scénario 3, la corrélation entre taux d'erreurs des qubits physiques et logiques peut varier très significativement en fonction des technologies. Le taux d'erreurs des qubits physiques n'est alors plus un facteur discriminant et n'est plus indiqué dans le diagramme (cela reste un facteur pertinent pour différencier les machines analogiques).

Au niveau des ordonnées, l'échelle représente sur un seul axe logarithmique le nombre de qubits physiques et logiques. La correspondance entre qubits physiques (QBP) et qubits logiques (QBL) peut être très variable suivant les technologies. Pour la clarté de la représentation, nous avons pris un overhead de 1 000 (1 000 QBP pour 1 QBL), communément admis comme pertinent lors de la rédaction de ce rapport. L'échelle de QBL n'est donc pas remplie en dessous de 1000 QBP. Par ailleurs, il faut un minimum de 40 qubits logiques pour avoir un avantage par rapport à l'émulation. L'échelle des QBL est donc en pointillé en dessous de 40 000 QBP.

Pour chaque scénario, un indice de vraisemblance de réalisation du scénario en 2042 a été affiché qui correspond à une enquête menée auprès de 24 experts du calcul quantique (liste p.48).

Chaque scénario nécessite une **rupture pour passer de l’un à l’autre**. Les différentes dynamiques de bascule entre scénarios sont symbolisées par des jalons et des ruptures technologiques nécessaires. Dans le scénario 1, *La porte étroite*, où l’analogique et le NISQ sont représentés, les verrous sont la capacité à dépasser des cœurs quantiques à 1 000 qubits physiques et d’avoir un taux d’erreurs de ces qubits inférieur à 10^{-3} . **Le scénario 1, La porte étroite, et le scénario 2, Extension du domaine quantique, ont la même probabilité d’être réalisés d’ici 2042.** Cependant, il est important de souligner qu’un certain nombre d’experts considèrent le scénario 1 comme déjà accompli aujourd’hui ou sur le point de l’être. Selon 11,5 % des experts, ce scénario sera largement dépassé d’ici 2042.

Le scénario 2 permet ainsi des avancées notables dans le calcul et des avantages quantiques dans certains domaines grâce à l’augmentation du nombre de qubits, aux progrès en algorithmie et à la mitigation d’erreurs. L’analogique coexiste toujours avec le NISQ et se révèle de plus en plus pertinente pour certaines applications de niches. Cependant, deux verrous majeurs, que sont la réussite de la correction d’erreurs et l’interconnexion de cœurs quantiques ne sont pas levés. On arrive dans ce scénario à réaliser des **qubits logiques mais encore imparfaits, si bien qu’ils ne sont pas utilisables pour la majorité des problèmes.**

L’avènement du scénario 3 repose sur le passage de ces deux jalons : **la correction d’erreurs et l’interconnexion entre cœurs quantiques**. La correction d’erreurs devient effective grâce à des progrès dans les codes de corrections d’erreurs combinés à une amélioration des taux d’erreurs ($< 10^{-5}$) à la possibilité d’utiliser un plus grand nombre de qubits ($< 10\,000$) permettent **l’application du théorème du seuil** (voir définition glossaire à l’annexe 1). Un jalon très important, également mentionné dans la plupart des « roadmaps » des industriels du quantique, est l’interconnexion entre « cœurs » qui permettrait aussi bien pour les technologies à portes que pour l’analogique de dépasser 10 000 qubits physiques. **Ce scénario est moins vraisemblable (81 %) selon les experts que le scénario 2 mais tout de même assez crédible d’ici 2042.** Il faut noter que **des ruptures sur la correction d’erreurs pourraient permettre un saut du scénario 1 vers le scénario 3**, sans passer par l’étape intermédiaire d’un NISQ « optimisé ». On voit en effet des roadmaps de certains acteurs se projetant sur 100 qubits logiques en 2026¹.

Concernant le saut quantique, ce **scénario 4 est jugé moins vraisemblable en 2042 par les participants et les experts de l’étude (53.5 %)**. Il nécessite en effet de passer la **barre symbolique des 100 qubits logiques** parfaits (c’est à dire avec des taux d’erreurs inférieur à 10^{-12}) au-delà duquel de nombreux problèmes peuvent être traités. Un autre **verrou majeur est l’obtention d’une QRAM** qui rendrait possible le déploiement efficace d’algorithmes comme la recherche dans des bases de données non indexées dont les applications sont nombreuses.

L’atteinte d’un scénario VLSQ n’est pas envisagée en 2042 dans cette étude où l’on se place sur l’utilisation de **plusieurs milliers de qubits logiques parfaits**. Pour l’anecdote, l’algorithme de Shor qui permettrait de casser le code RSA 2048 bits nécessite plusieurs milliers de qubits logiques.

¹ Quera projette d’augmenter rapidement le nombre de qubits, visant plus de 3 000 qubits physiques en 2025 et plus de 10 000 en 2026

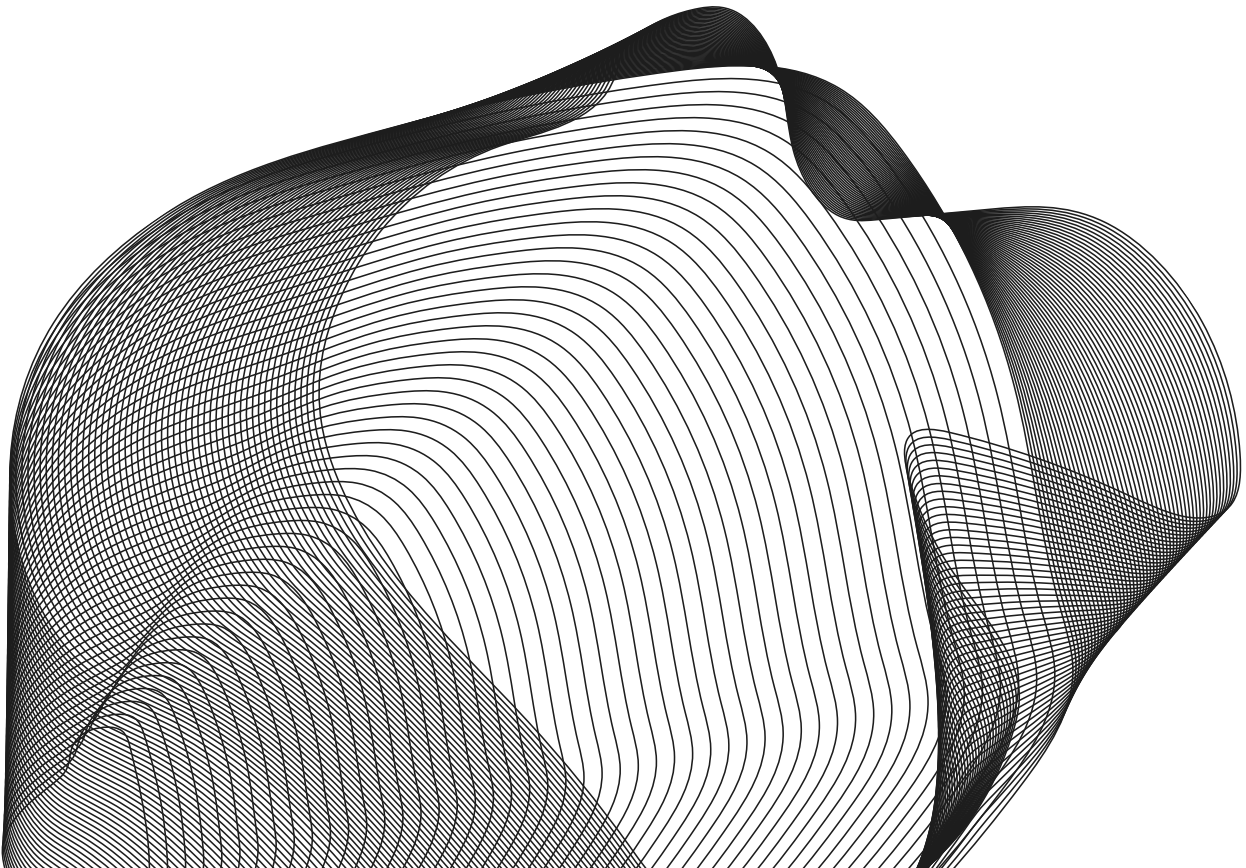
LES CAS D’USAGES

Dans le cadre de nos travaux nous avons exploité exclusivement **les cas d’usages fournis par les membres partenaires**. Nous avons estimé les ressources de calcul nécessaires pour traiter le problème mathématique associé (taille des données, type d’algorithme, profondeur de calcul, taux d’erreurs, etc.). Ensuite nous les avons positionnés au regard des quatre scénarios décrivant les niveaux de performance des calculateurs et les potentiels de calculs.

Une centaine de cas d’usages est identifiée par les partenaires du projet, regroupés en grands secteurs d’activités. **Les analyses présentées ici ne portent que sur les cas d’usages identifiés par les partenaires comme potentiellement problématisables dans le cadre du calcul quantique.** Nous n’avons pas traité tous les cas d’usages que l’on peut voir dans la littérature car certains ne nous semblent pas correspondre aux potentialités du calcul quantique (traitement de données en « temps réel », taille de problème trop importante, etc.).

Ensuite les partenaires ont **évalué l’impact pour leurs secteurs d’activité du traitement des cas d’usage** par le quantique et **les enjeux associés** selon le barème de la grille suivante :

- 0 : impact nul ou très faible.
- 1 : impact faible (améliorations / changements dans les processus).
- 2 : impact moyen (niveau des projets, nouveaux produits, services et territoires de clientèle).
- 3 : impact fort (niveau des grands domaines d’activité et des missions, création, disparition, transformation).
- 4 : crucial (niveau de la survie / métamorphose).





Légende :

La taille des cercles correspond au nombre de cas d'usages qui se cumulent au fur-et-à mesure que l'on avance dans les scénarios. Ainsi, si l'on détecte déjà 2 scénarios pour le transport et la logistique dans le scénario 1, se rajoutent 6 cas d'usages possibles dans le scénario 2, qui viennent faire un total de 8 cas d'usages.

Amélioration / Changement dans les processus

Niveau des projets - Nouveaux produits, services, territoires de clientèles (ou disparition)

Niveau des grands domaines d'activités et des missions

Niveau de la survie / Métamorphose

Chimie, physique & recherche fondamentale

Le calcul quantique permettrait de simuler des systèmes quantiques complexes, ce qui aiderait à étudier des phénomènes fondamentaux tels que **la supraconductivité, la physique des particules, la matière condensée, etc.** Cela contribuerait à des avancées dans la compréhension des lois de la physique qui devraient être partagées. Par exemple, la collaboration mondiale dans la recherche sur la supraconductivité à température ambiante pourrait être significativement accélérée par l'utilisation d'ordinateurs quantiques. En simulant avec précision les matériaux complexes à l'échelle atomique, les chercheurs pourraient découvrir de **nouveaux matériaux** avec des propriétés conduisant potentiellement à des révolutions dans **le stockage d'énergie, ou la production d'énergie propre**, etc. (cf. infra).

Les capacités du calcul quantique pourront non seulement permettre de **mieux simuler** (i.e. trouver une solution approchée) des **problèmes aujourd'hui inaccessibles au calcul classique**, mais peut être à terme de les résoudre (i.e trouver la meilleure solution de façon certaine). L'exemple qui nous a été donné est celui des **problèmes à N-Corps**, qui sont d'une importance majeure en recherche fondamentale, en particulier pour **l'étude des noyaux en physique nucléaire, en physique du solide ou en chimie**.

Energie

Parmi les conséquences des applications du calcul quantique sur le secteur énergétique, on note d'après les travaux du groupe, des apports significatifs et très diversifiés dans les domaines de la **production, du pilotage et en matière d'efficacité énergétique**. On peut citer :

- **L'amélioration de la sûreté des installations**, notamment dans le cadre de simulations complexes. Par exemple la modélisation des réactions nucléaires (conception de réacteurs plus sûrs, plus efficaces) ou des études probabilistes de sûreté.
- **Le pilotage technique du système électrique, l'optimisation de la distribution énergétique**, notamment la planification de réseaux électriques intelligents (réduction des pertes réseau, fiabilité du réseau, etc.), l'optimisation des moyens de production hydrauliques.
- **Le management des systèmes de production et de stockage décentralisés**, l'optimisation des systèmes de stockage (notamment recharge d'un parc de véhicules électriques – vehicle-to-grid).
- **La conception de catalyseurs plus efficaces** (génération d'hydrogène, capture et conversion de CO2, production d'électricité), la simulation de matériaux pour les cellules photoélectriques (amélioration de la conversion de l'énergie solaire en électricité).
- **L'optimisation des parcs d'énergies renouvelables**. Le calcul quantique pourrait permettre de trouver des configurations optimales pour maximiser la capture d'énergie dans les parcs éoliens ou solaires, prenant en compte des variables météorologiques et géographiques notamment.
- Des progrès dans la **recherche sur la fusion nucléaire** : la capacité de simuler des conditions extrêmes pourrait accélérer la recherche sur la fusion nucléaire.

Pour l'activité des entreprises, on note un besoin accru d'experts ou d'ingénieurs pour la simulation et la modélisation (passage de monde physique aux mathématiques, données pouvant être traitées par les systèmes de calcul intégrant des processeurs quantiques). Les opportunités d'innovation dans la conception de nouveaux catalyseurs sont significatives.

En termes d'impacts potentiels pour la société, ces éléments contribuent parmi d'autres à accompagner les politiques de transition vers d'avantage d'efficacité énergétique, une énergie moins carbonée et une réduction des pertes.

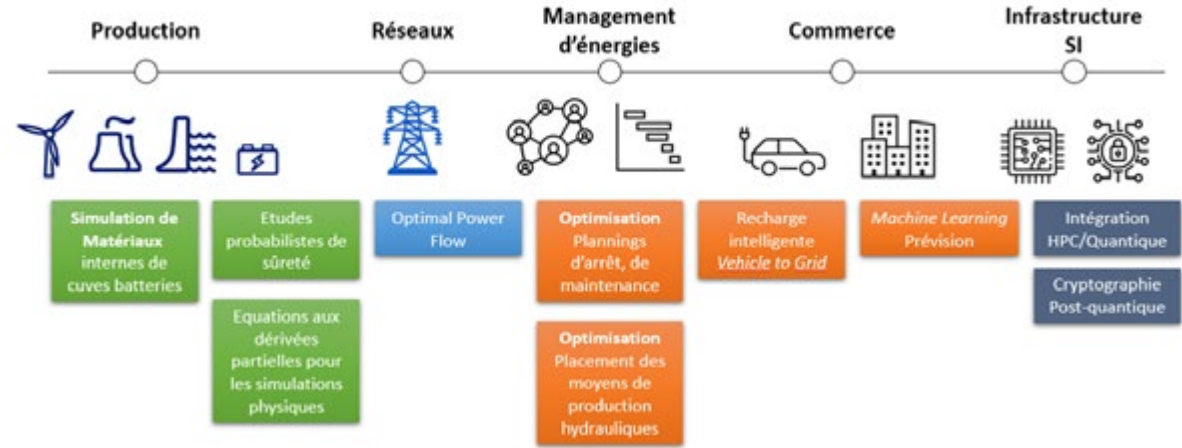


Figure 4 : source EDF, avec leur aimable autorisation.

Santé, pharmaceutique & associés

Dans le domaine de la santé, on note potentiellement :

- **Une accélération dans la mise au point de nouveaux traitements** (molécules, vaccins, etc.) en simulant les interactions moléculaires complexes, à un niveau de détail inégalé. Il s'agit de prédire avec précision comment les composés interagissent avec des cibles biologiques. Cela réduit le besoin de tests en laboratoire, accélère la mise en marché, réduit les coûts, etc.
- **Une optimisation des traitements**, leur personnalisation pour des maladies complexes comme le cancer, le calcul quantique pourrait aider à concevoir des médicaments qui ciblent spécifiquement la biologie du patient, notamment en **fonction des données génétiques** (personne et tumeur), avec donc davantage d'efficacité et moins d'effets secondaires, mais aussi une amélioration des protocoles (ex : planification de radiothérapies).
- **La détection précoce des pathologies** (identification de marqueurs de maladie à un stade précoce), **l'analyse rapide et profonde d'images médicales** (en relation avec les IA).
- **L'analyse génomique avancée** (séquençage, repérage rapide de chaine de nucléotides).
- Avec des calculateurs quantiques très puissants (capacités de traitement considérables et taux d'erreurs très bas), **la modélisation de la structure de protéines**, qui serait une rupture majeure dans la conception de traitements innovants.

Les impacts pour la société peuvent donc être considérables, avec la détection précoce des maladies, améliorant le taux de survie et réduisant les coûts de santé à long terme, la personnalisation des traitements pour réduire les effets secondaires. Il faut aussi noter les apports potentiels dans la lutte contre les pandémies. En cas d'émergence de **nouveaux virus, la vitesse de conception de nouveaux vaccins ou antiviraux serait cruciale**. Le calcul quantique pourrait réduire ce temps de plusieurs années à quelques mois ou semaines.

Pour les entreprises, ces potentiels avantages sont sources de disruption. D'une manière générale, on devrait constater une intensification de la recherche et du développement autour de la simulation moléculaire. En termes de préparation, elle passe par des investissements dans des équipements et des formations spécifiques au calcul quantique, des collaborations étroites entre industries pharmaceutiques et entreprises de technologie quantique.

Transports & logistique
(routier/ferroviaire)

Note : Bien que regroupés ici, les impacts diffèrent en fonction des domaines : logistique, transport ferroviaire, transport routier et secteur automobile.

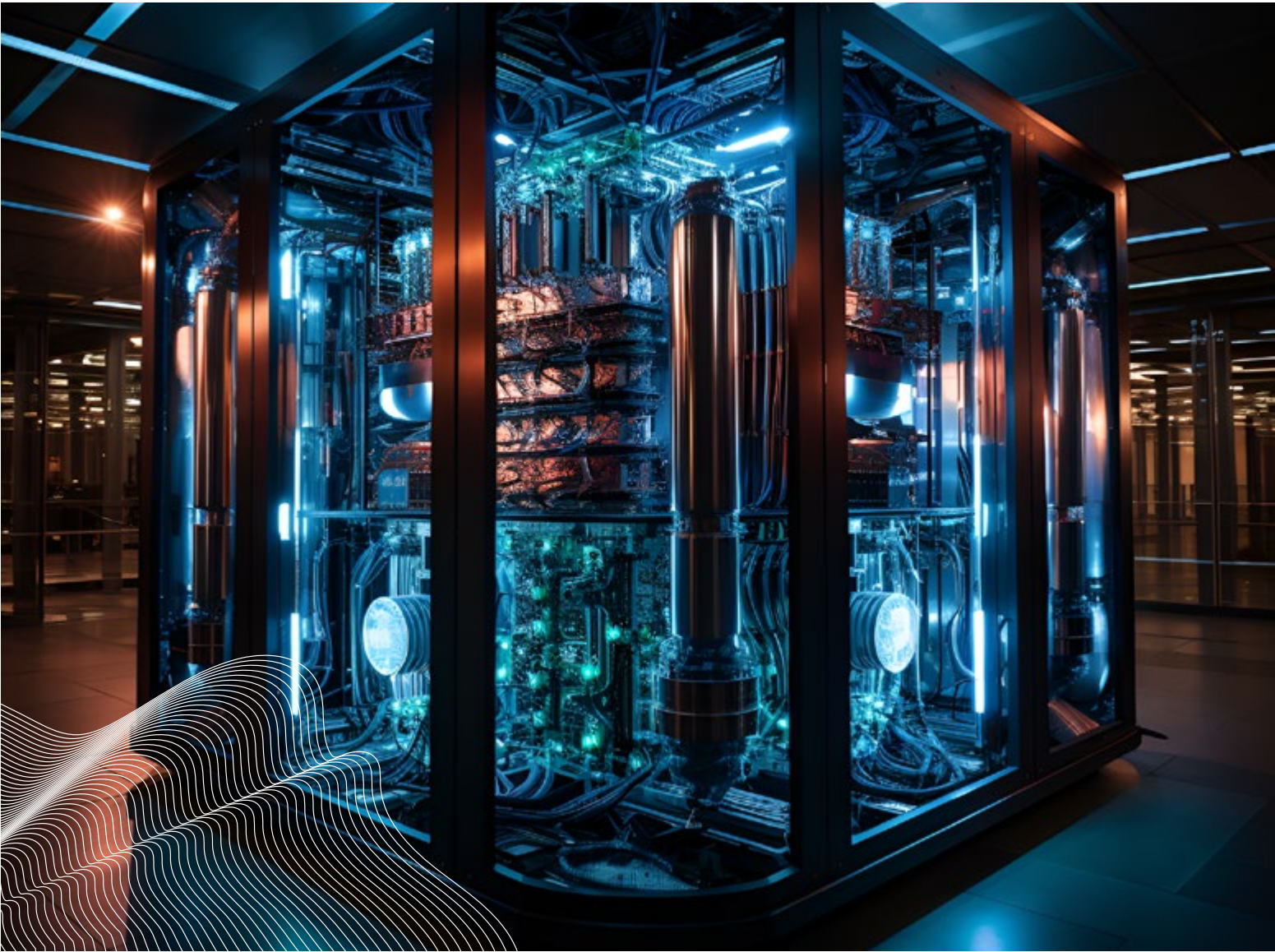
Pour le secteur du **transport ferroviaire**, les apports porteraient sur une amélioration en profondeur de la chaine d’activités ferroviaire (production, exploitation, optimisation des systèmes de contrôle du trafic, gestion de crises et réallocation des trains, maintenance, etc.). Les trains et les ressources pourraient **être réalloués rapidement en fonction des changements de demande, des retards, ou des urgences**, grâce à la capacité du calcul quantique à gérer des scénarios multifactoriels complexes et à l’entraînement amélioré d’IA dédiées. Notons également **les progrès en maintenance prédictive** : en analysant des données de capteurs en temps réel, les IA couplées à des machines quantiques pourraient prédire les défaillances avant qu’elles ne se produisent, **réduisant ainsi les temps d’arrêt et les coûts**. Les IA entraînées régulièrement par des calculs quantiques pourraient être intégrées dans les opérations quotidiennes pour la planification et la surveillance.

Les effets seraient potentiellement importants pour la société, avec l’amélioration de l’efficacité et de la ponctualité des services ferroviaires, et la **réduction des incidents et des retards grâce à une meilleure gestion de crise**.

Dans le domaine des **transports routiers**, les apports potentiels concerneraient la conception de véhicules plus économes en énergie (optimisation batteries, nouveaux matériaux), donc plus accessibles et durables, ainsi que la maintenance prédictive et la dynamique des fluides. A terme, dans le cas de performances élevées du calcul quantique, on peut envisager qu’il soit utilisé pour développer de **nouveaux matériaux légers mais résistants**, améliorant l’efficacité énergétique des véhicules. Il en va de même pour le développement de systèmes de transport intelligent. En intégrant les données de trafic, les conditions météorologiques, et les signaux des véhicules connectés, le calcul quantique en collaboration avec une IA pourrait **optimiser le flux de trafic, réduisant les embouteillages** et les émissions. Ces éléments permettraient également de développer de nouvelles offres de mobilité personnalisées pour les voyageurs, de manière intégrée entre plusieurs modes de transport et avec des services spécifiques.

Sur les activités logistiques, les apports porteraient essentiellement sur de l’amélioration (optimisation de tournées, de gestion de colis, etc.). En calculant des itinéraires plus optimisés, voire optimaux, on réduit les temps de stockage, les ressources nécessaires. Le calcul quantique pourrait minimiser les coûts et les impacts environnementaux du transport de marchandises.

Ici comme dans d’autres secteurs, une dépendance accrue (théorique) vis-à-vis du calcul quantique pourrait exacerber les inégalités entre les acteurs majeurs et les petites entreprises, conduisant potentiellement à un monopole ou à une diminution de la concurrence.



Télécommunications

Dans le domaine des **télécommunications**, les calculs quantiques permettraient une meilleure gestion du positionnement des antennes, la détection de fraude, **une stratégie de prix plus pertinente et efficace**.

Par ailleurs, les algorithmes quantiques pourraient être utilisés pour **détecter des tentatives d’intrusion ou des anomalies dans le trafic de données**, offrant un niveau de sécurité supérieur. Une IA entraînée par calcul quantique pourrait offrir une gestion en temps réel des ressources de réseau, ajustant la bande passante aux besoins.

On note aussi un **risque de consolidation du marché**, où les acteurs les plus performants dans la maîtrise des applications du calcul quantique pourraient **dominer et réduire la concurrence**, influençant potentiellement les prix et l’accessibilité.

Finance (banque/assurance)

Parmi les impacts significatifs, on note **l’optimisation des portefeuilles d’actifs**, des analyses de marchés utilisant des IA plus rapides et plus précises, une **amélioration des modèles de risques**, qui pourraient intégrer une multitude de variables économiques, politiques, et environnementales, offrant une vision bien plus précise du profil de risque d’un investissement.

En cas de performances validées du calcul quantique sur ces cas d’usage, **les acteurs du secteur devront rapidement adopter, voire généraliser les technologies quantiques pour rester compétitif**.

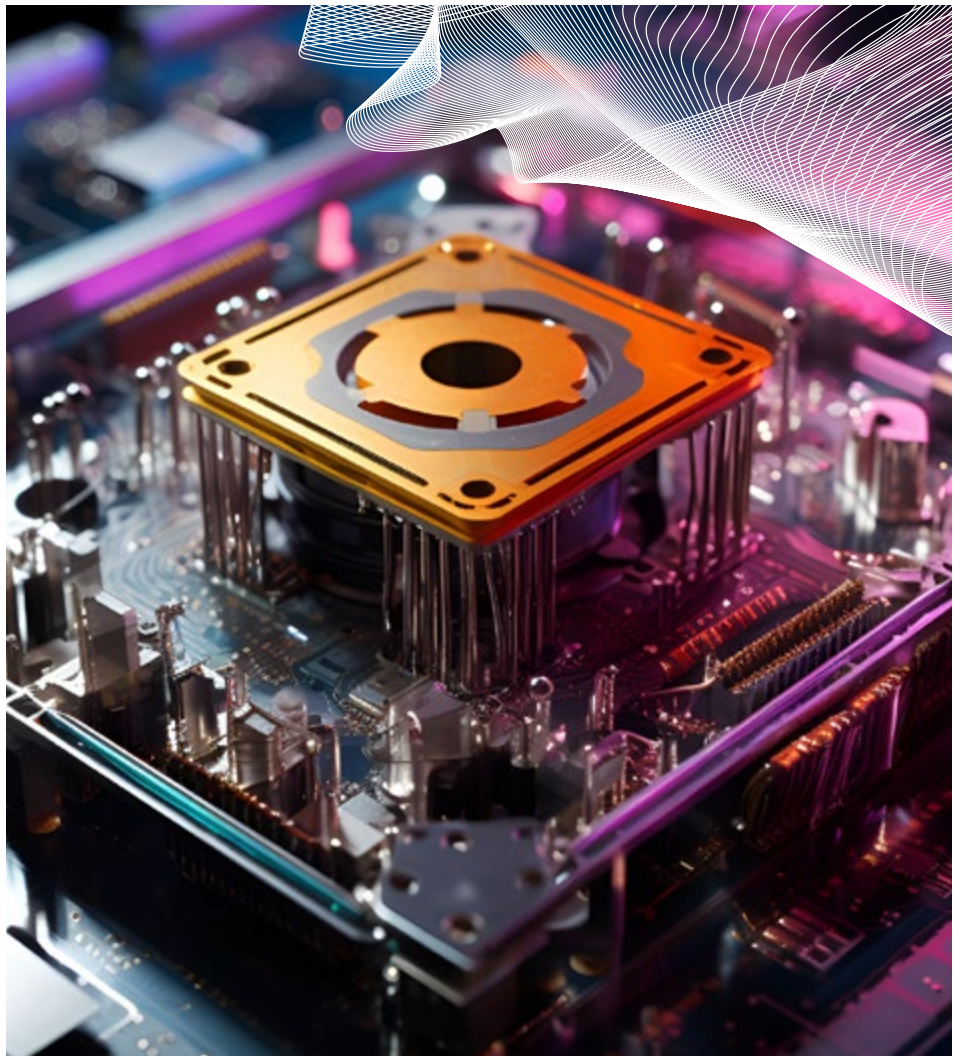
Les impacts sur les activités et performances pourront être très importants et disruptifs (une optimisation de quelques millièmes pouvant avoir des répercussions considérables). Par ailleurs, dans un secteur fortement régulé, il est probable que l’accès aux techniques qui pourraient offrir un avantage concurrentiel décisif soit généralisé. Dans le cas contraire, une distorsion de concurrence serait relevée.

Les impacts socio-économiques seront indirects (réduction des fraudes par anticipation, gestion et optimisation de portefeuille dans un contexte volatil, analyse des risques crédit, etc.). On pourrait envisager des services financiers plus sûrs et abordables grâce à une meilleure gestion des risques.

Synthèse des cas d'usages :

Sur la centaine de cas d'usages remontés par les entreprises partenaires, la plupart d'entre eux ont des **incidences limitées sur les modèles d'affaires**, soit du fait de leur nature (optimisation avec gains limités, etc.), soit du fait de l'accès très probablement partagé à ces outils pour les organisations d'un même secteur (aspects réglementaires pour éviter les biais concurrentiels, notamment dans des secteurs régulés). Dans les 15 prochaines années, les impacts économiques potentiels des calculs quantiques sur les filières et organisations industrielles seront donc **essentiellement de l'ordre de l'amélioration des performances et des processus**, non de la disruption. C'est ce que l'on peut voir dans le secteur des transports ou de l'énergie ou le nombre de cas d'usages croît en fonction de l'avancée technologique des scénarios, mais sans que l'on puisse envisager aujourd'hui une application disruptive.

Cependant, dès le scénario 2, des cas d'usages apparaissent qui, s'ils ne correspondent pas à des ruptures des modèles économiques, sont des **virages cruciaux** qu'il faudra bien négocier pour les acteurs du domaine **de la santé, de la finance et des assurances**. Ces impacts ne font que se renforcer à mesure de la progression dans les scénarios suivants. Dans une moindre mesure mais avec de **forts impacts dans la chimie, les matériaux, les sciences et la recherche**.



¹ https://hyperionresearch.com/wp-content/uploads/2022/11/Hyperion-Research-SC22-HPC-Market_Combined-1.pdf

² <https://www.intersect360.com/wp-content/uploads/Webinar-Intersect360-WW-HPC-AI-Unified-2022-market-size-and-2023-27-forecast.pdf>

³ <https://www.tomshardware.fr/diapo-24-ans-devolution-des-supercalculateurs-puissance-multipliee-par-15-million/>

⁴ <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-15-millions-de-dollars-pour-l-ordinateur-quantique-d-wave-2000q-67179.html>

⁵ <https://thequantuminsider.com/2023/04/10/price-of-a-quantum-computer/>

LE MARCHÉ DES CALCULATEURS QUANTIQUES

« I think there is a market for maybe five computers in the world. »

- Thomas Watson, président d'IBM en 1943

Comme nous l'avons vu précédemment, **les calculateurs quantiques ne pourront vraisemblablement pas se développer de façon indépendante des calculateurs HPC**, nécessaires pour le pré et post traitement des données. Il paraît donc judicieux pour estimer les marchés futurs des processeurs quantiques d'avoir une vision du marché du HPC à horizon 2042.

Le marché du HPC

Les informations sur le marché du HPC sont issues de l'étude d'Hyperion Research¹ et de celle d'Intersect360 Research². Selon ces études, **le marché total du HPC en 2021 était de l'ordre de 35 milliards de dollars** (vente de serveurs, stockage, services, applications, etc.). La partie des hardware HPC représentait selon les sources entre 11 et 15 Md\$ en 2021. Le principal usage des HPC sont la recherche, la sécurité des états, la défense, la finance et la biologie.

Le marché des calculateurs hautes performances est très concentré : en 2021, HPE était leader avec plus de 34 % du marché. Le premier acteur européen était ATOS, 5^e mondial, avec environ 4 % du marché. Selon les sources, la croissance du marché des serveurs HPC est estimée entre 5.6 et 6.9 % par an sur les années 2021-2026.

Sur le marché très haut de gamme, on estime qu'il y aura dans le monde en 2027 de 31 à 45 supercalculateurs Exascale pour une valeur entre 10 et 14 Milliards de \$. Sur une durée de 20 ans, les données collectées montrent que **le prix des supercalculateurs tourne autour de 100 millions d'euros** avec une augmentation ces dernières années sur l'Exascale pour 400 millions d'euros.

En comparaison des machines HPC, **le prix des machines quantiques est de l'ordre de quelques dizaines de millions de \$:**

- 15M\$ pour D-WAVE³.
- Plusieurs dizaines de millions pour la suite IBM comprenant l'ordinateur quantique et les services associés⁴.

Hypothèses

Suite aux discussions que nous avons menées avec les partenaires, nous pouvons proposer quelques hypothèses vraisemblables pour la structuration du marché du calcul quantique :

- **Le marché du HPC + Système quantique ne pourra offrir un potentiel de croissance significatif dans les prochaines années que si le ratio coût/bénéfice est significativement favorable.** Ceci ne sera vrai que si le coût des HPC & systèmes quantiques chute fortement ou si l'application offerte par le HPC & système quantique entraîne une hausse significative du bénéfice pour l'utilisateur final.
- **Les centres de calculs mondiaux majeurs (Tier 0 / Tier 1), déjà possesseurs de HPC hautes performances, seront des « early adopters » du marché du quantique.** Adossés aux Etats et aux grandes entreprises, ils auront les capacités humaines et financières pour intégrer les calculateurs quantiques en propre. Il faut noter que ce marché est réduit. On peut considérer qu'il se limite aux 500 plus grands HPC mondiaux.
- **Au fur et à mesure du développement de nouvelles applications, il sera probablement nécessaire pour les industriels d'avoir un centre de calcul HPC + Systèmes quantiques en interne.** Ça sera principalement le cas pour certaines niches stratégiques, en

particulier dans le cas de données sensibles non partageables (militaire, finance, santé, etc.) ou pour des applications qui demandent un accès régulier et/ou contraint en temps (santé, logistique, transport, etc.). Dans ce cas, avoir une machine en propre serait probablement moins cher et moins risqué pour l'utilisateur final.

- **Pour les utilisateurs moins contraints, l'utilisation du calcul quantique se fera via des opérateurs de services cloud tel IBM, AWS, OVH, etc.**
- **Il n'y a pas aujourd'hui de marché de l'occasion dans le HPC. Il n'y en aura donc probablement pas pour les systèmes quantiques.** Le coût de possession des machines est très cher : de l'ordre de 10 % du prix initial par an. Il n'y a donc pas d'avantage à utiliser une machine obsolète. Les systèmes sont donc remplacés au fur et à mesure par des systèmes plus performants.
- Face à une obsolescence technologique rapide, **le marché sera principalement tiré par le remplacement régulier des machines.** En corollaire, le surcoût dû à l'amortissement rapide du système devra être absorbé par les bénéfices de l'utilisation.
- **L'intégration verticale des acteurs est très probable, afin de consolider la valeur tout le long du processus et de générer des économies d'échelles.** Les principaux investisseurs dans le domaine du quantique sont aujourd'hui bien connus dans tous les domaines de l'informatique : fondeurs (Intel, NVIDIA, etc.), fournisseurs de services (IBM, AWS, OVH), fabricants de HPC (ATOS, etc.). Une concentration des acteurs par fusions & acquisitions est à prévoir au fur et à mesure des développements et de l'émergence des technologies gagnantes.

Scénarios et marché du calcul quantique

La taille projetée du marché du calcul quantique va dépendre de façon très significative du scénario analysé. Nous avons considéré que **les marchés pour les systèmes quantiques seront sensiblement du même ordre de grandeur pour le scénario 1, La porte étroite et le scénario 2, Extension du domaine du quantique.** Nous avons donc construit nos réflexions sur la base de 3 scénarios uniquement.

A. Développement de marché dans le scénario *Porte étroite* et *Extension du domaine du quantique*

Pour mémoire, il n'y a dans ce scénario que des machines NISQ et analogiques, mais pas de FTQC. Il n'y a pas d'interconnexion entre les différents cœurs quantiques, limitant le nombre de qubits physiques à environ 10 000 par machine quantique.

Nous estimons que dans ce cas, **l'arrivée des machines quantiques ne générera pas de croissance additionnelle du marché du HPC.** Autrement dit, il n'y aura pas de ventes supplémentaires de HPC pour adresser les nouveaux cas d'usages accessibles par les machines NISQ ou analogiques. On peut donc estimer que les systèmes quantiques ne se développeront que couplés avec les HPC les plus performants lors des renouvellements. Nous estimons **le volume annuel à quelques centaines de machines quantiques au total.**

Dans ce scénario, le marché est divisé en 2 types : les **machines NISQ et les machines analogiques.** Les machines NISQ et analogiques seront technologiquement comparables, et **seront probablement dans des gammes de prix équivalentes,** dans l'ordre de grandeur des prix actuels.

B. Développement de marché dans le scénario *Les portes du FTQC sont ouvertes*

Dans ce scénario, nous avons accès à des machines quantiques à portes FTQC. Jusqu'à une dizaine de cœurs quantiques (QPU) sont interconnectés permettant de proposer des systèmes quantiques de puissances **inférieures à 100 qubits logiques, mais supérieures à 40 qubits logiques** (limite de ce qui est émuleable actuellement). Même si les applications couvertes par les FTQC sont bien plus importantes que dans le scénario précédent, le nombre limité de qubits logiques et l'absence de QRAM limitent le champ des applications accessibles.

Ces machines à portes coexistent avec des machines analogiques possédant un nombre de qubits physiques importants, de l'ordre de 40 000 à 100 000. **Les machines analogiques sont dédiées à des problèmes d'optimisation** où le nombre important

de qubits permet d'accroître significativement la complexité des problèmes adressés.

Nous estimons que dans ce cas de figure, **l'arrivée des machines quantiques générera une croissance additionnelle du marché du HPC.** Cette croissance est directement transposable aux volumes de renouvellement des ordinateurs quantiques et sera supérieure aux volume des scénarios 1 et 2. Le prix restera cependant dans le même ordre de grandeur que précédemment

Les machines FTQC et analogiques seront technologiquement comparables, et **seront vendues dans des gammes de prix équivalentes.**

C. Développement de marché dans le scénario *Le saut quantique*

Dans ce scénario, les verrous de l'interconnexion et de la QRAM sont levés. Il est alors possible de proposer des **systèmes quantiques FTQC modulaires** à base de cœurs quantiques (QPU) interconnectés, tout en baissant significativement le coût du QPU. On pourrait disposer de machines quantiques FTQC de puissances **atteignant quelques centaines de qubits logiques.** L'approche modulaire et la baisse significative du coût unitaire des QPUs permettraient de segmenter le marché des systèmes FTQC en 2 sous marchés :

- **Un marché haut de gamme,** destiné aux centres HPC les plus performants, avec des systèmes FTQC proposant en 2042 **entre 100 et 1 000 qubits** logiques. La puissance de ces calculateurs permet de traiter des applications inaccessibles à d'autres technologies. Elle est donc **proposée pour un prix élevé** comme une option premium incluse dans la proposition de valeur des nouveaux HPC. Les volumes de ces machines d'exception seront réduits et ne concerneront que **le renouvellement des HPC très haut de gamme.**
- **Un marché moyen de gamme** s'ouvre pour des puissances **entre 40 et 100 qubits logiques.** Ces systèmes sont utilisés pour des applications moins exigeantes. **Le prix plus accessible** de ces machines permet de multiplier les volumes vendus au-delà de plusieurs centaines.

¹ <https://www.yolegroup.com/product/report/quantum-technologies-2023/>

Malgré l'augmentation du nombre de qubits logiques disponibles, **le marché des machines analogiques est fortement cannibalisé par l'arrivée des machines à portes,** plus versatiles et flexibles. Pour s'adapter, **ce marché se concentre sur des applications très spécifiques et spécialisées** (optimisations rapides et récurrentes par exemple), proposant des volumes importants. Ceci ne peut se faire **qu'au prix d'une réduction de coût drastique.**

Du fait de la levée de verrous majeurs, il serait possible de déployer les systèmes quantiques de façon massive pour de nombreuses applications. On pourrait espérer que ce scénario **génère une croissance additionnelle très significative du marché du HPC.**

ENQUÊTE & RETOURS D'EXPERTS

Nous avons mené une enquête auprès d'experts de différents domaines du calcul quantique : algorithmie, chaine de commande, cryogénie, hardware, correction d'erreurs, HPC (liste ci-dessous). Une partie venant de laboratoires académiques, les autres du secteur privé (fabricants, sociétés de service et consultants).

Nous avons voulu avoir l'avis sur la vraisemblance de réalisation de nos scénarios en 2042 d'une part, et leur opinion sur un certain nombre de propositions ou d'affirmations qui faisaient controverses d'autres part.

Les experts ayant répondu à l'enquête :

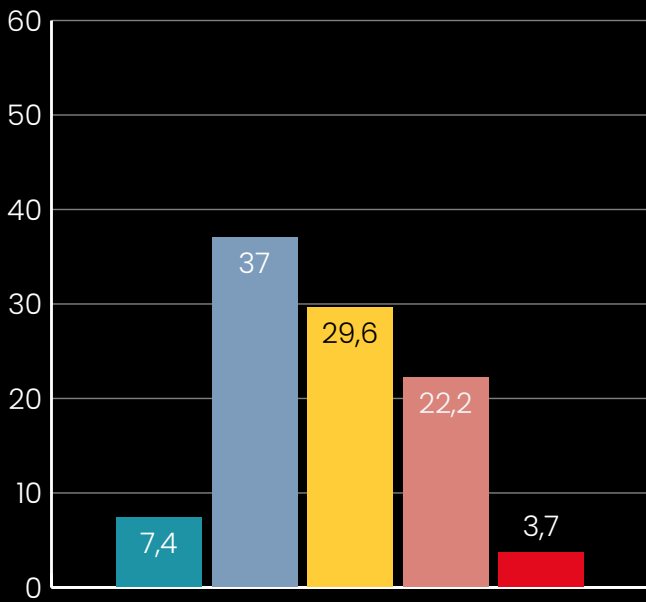
- ALICE ET BOB** VIGNON Blaise, ESSIG Antoine
- C12** DESJARDINS Pierre
- CEA** SAVIN Valentin, SASSOLAS Tanguy, DARTOIS Stéphane, BLANCO Nicolas, SNIZHKO Kyrylo, SANGOUARD Nicolas
- CNRS** DIAMANTI Eleni
- COLIBRITD** GUIRAUD Laurent
- CONSULTANT** EZRATTY Olivier
- EDF** MIKAEL Joseph
- EUROQUIC** BOTTER Thierry
- INRIA** LEVERRIER Anthony
- LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE ET D'ESSAIS** SCHOPFER Félicien
- MULTIVERSE COMPUTING** KUREK Michel
- PASQAL** HENRIET Loïc
- QUANDELA** RICOU Arno
- QUOBLY** VINET Maud, PERNUCHOT François
- SYSTEMATIC** VERT Daniel
- THALES** BARBARESCO Frederic
- UNIVERSITÉ MONTPELLIER** BOURREAU Eric
- WELINQ** DARRAS Tom

Légende

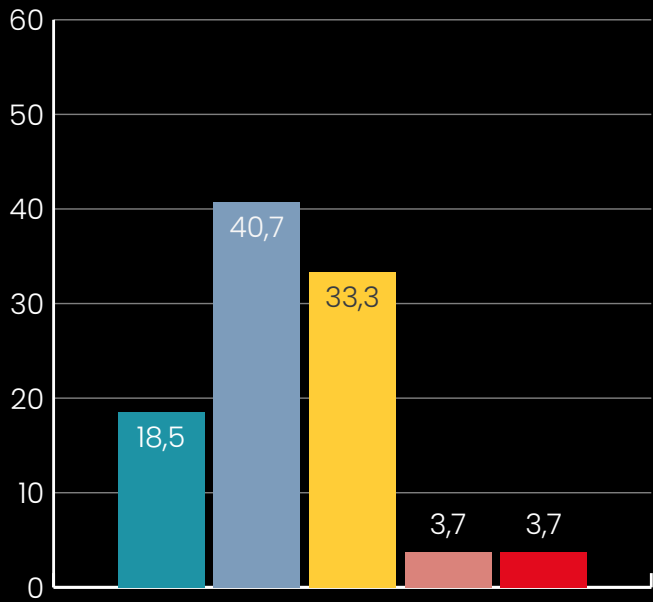
- Tout à fait d'accord
- Plutôt d'accord
- Plutôt en désaccord
- Pas du tout d'accord
- Ne sait pas se prononcer

Les résultats de l'enquête sont exprimés en pourcentage.

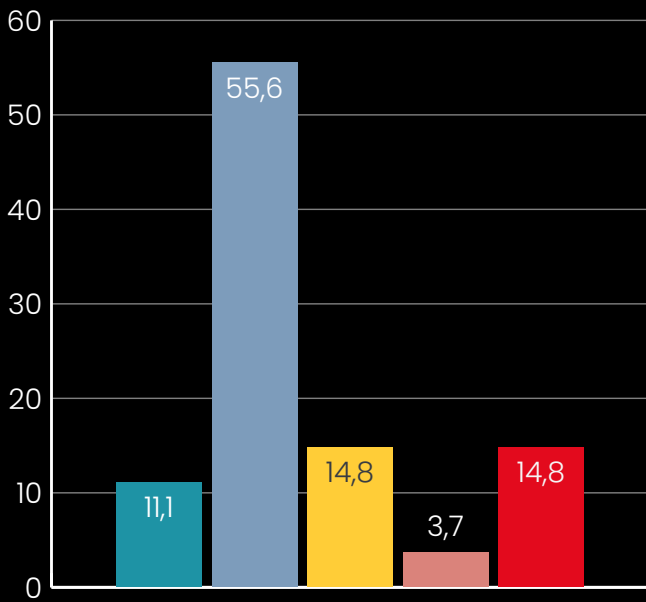
Il n'y aura jamais d'application utiles (de portée industrielle) pour le NISQ sur des jeux de données réels.



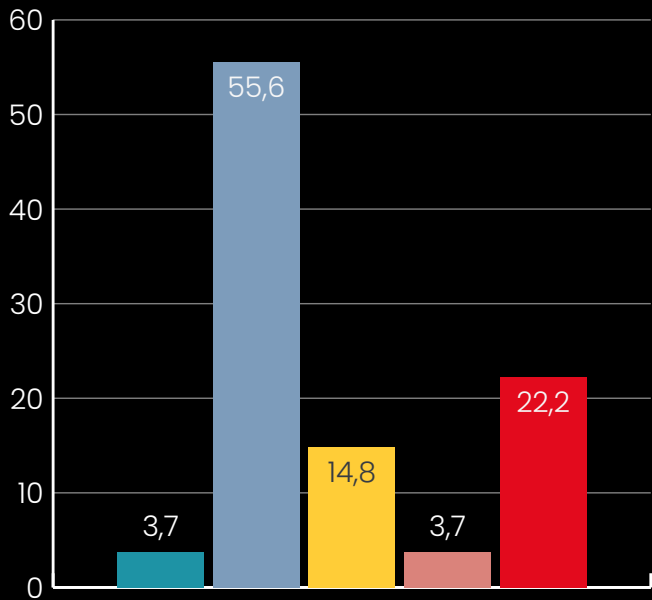
Le NISQ est une étape techno-scientifique intermédiaire dans l'avènement du FTQC.



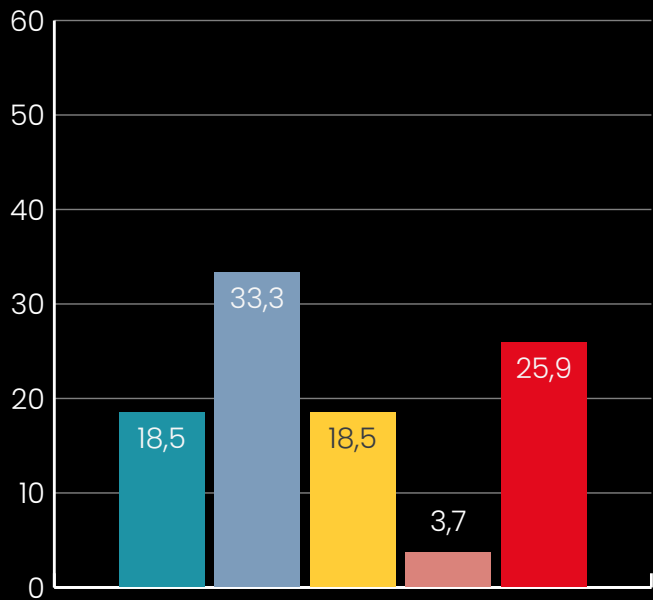
Des applications industrielles verront le jour pour des systèmes analogiques avant le NISQ.



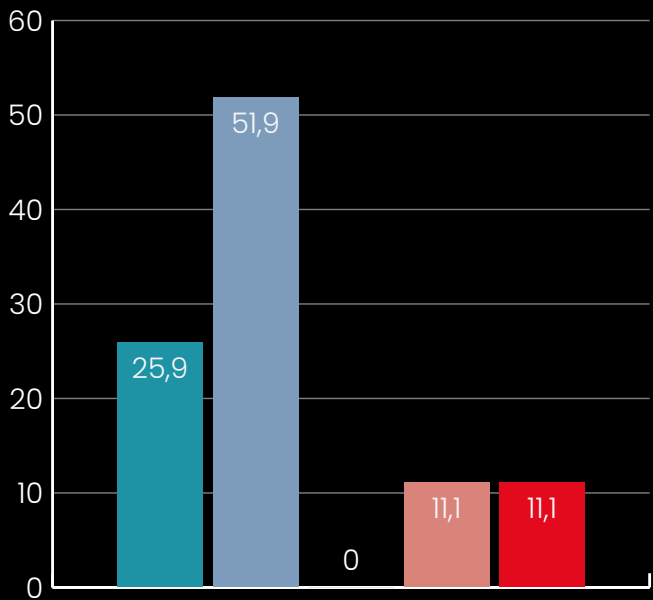
Les premières formes d'avantage quantiques ne seront pas liées à l'accélération mais à la consommation énergétique et/ou la précision des résultats.



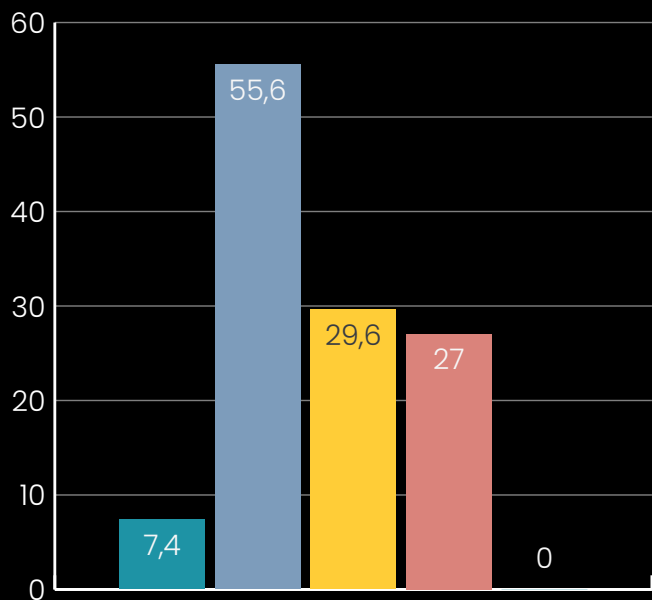
L'interconnexion entre 2 cœurs quantiques commencera à être possible d'ici 10 ans.



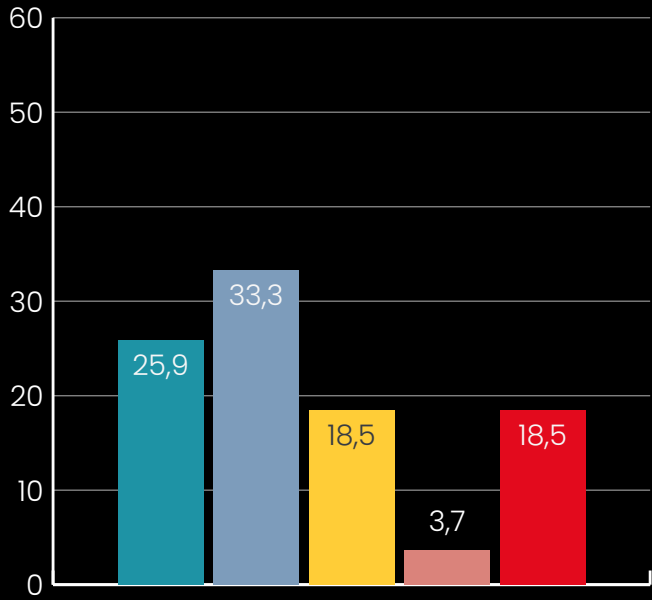
Dans les années à venir des architectures basées sur certaines technologies quantiques vont se spécialiser sur certaines typologies de problèmes.



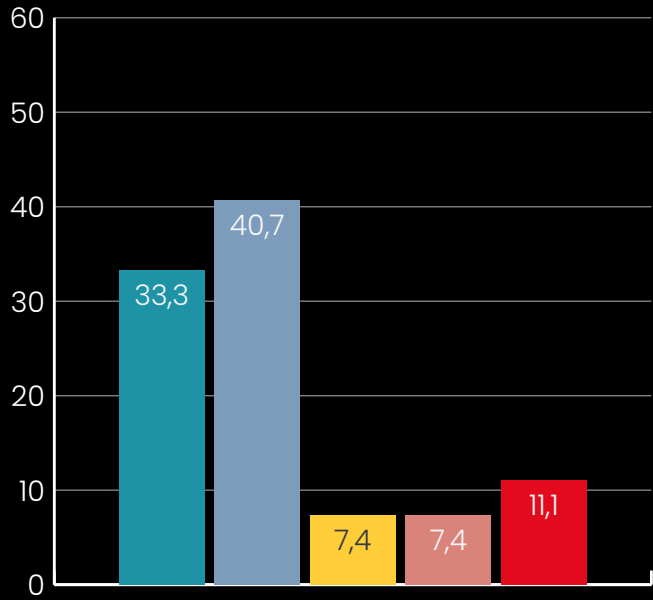
Le FTQC cohabitera avec les technologies analogiques (applications et nature différente des avantages, diversité des modèles d'accès, etc.).



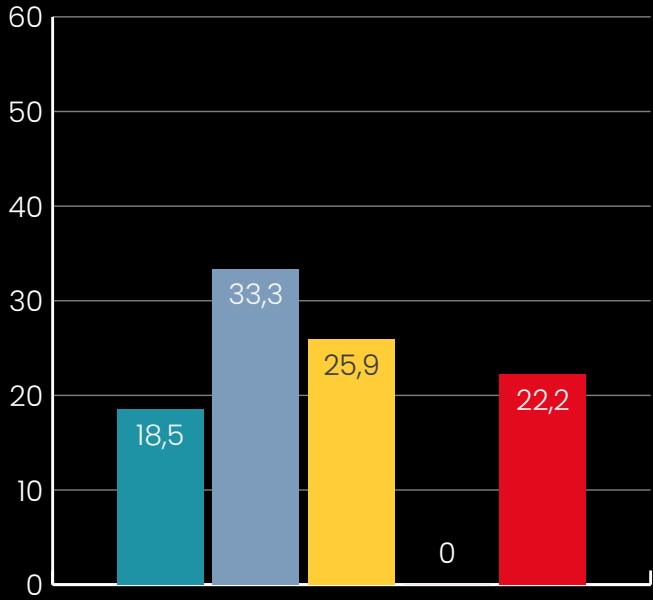
Le seuil de 10 000 qubits physiques pilotables et intriquables sera atteint d'ici 10 ans.



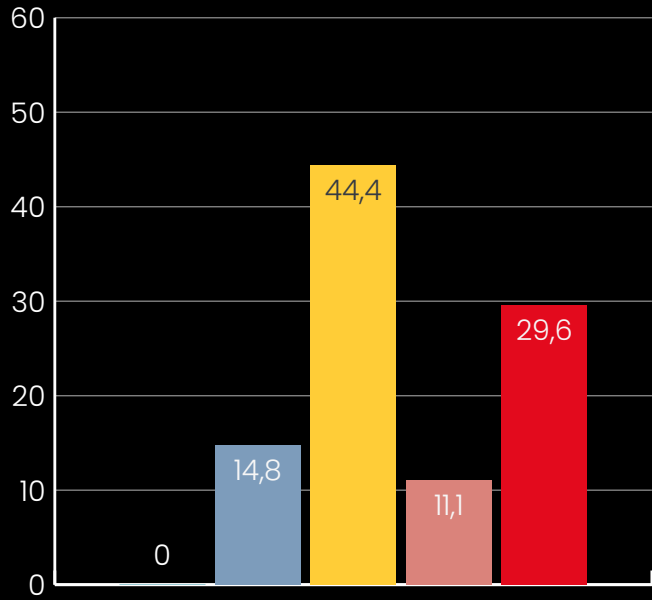
Une concentration d'acteurs va s'opérer au sein de l'écosystème quantique mondial dans les 10 ans à venir.



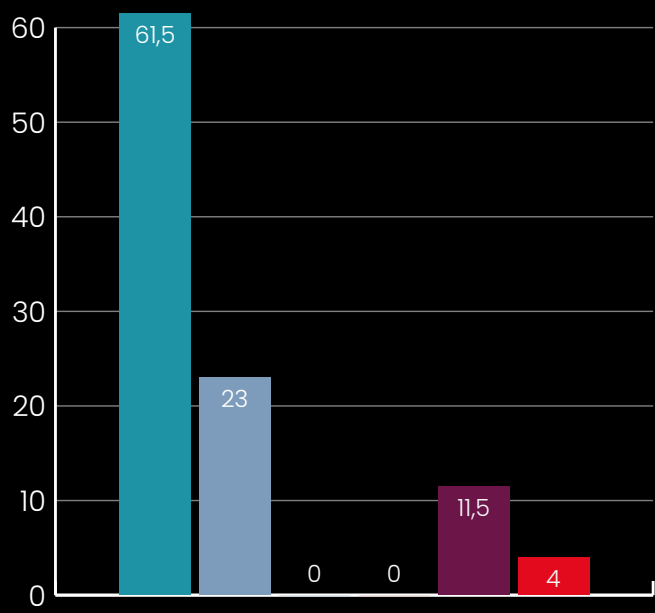
Une guerre de standards va s'opérer entre les grandes régions du monde et entre grands acteurs dans les 10 ans à venir.



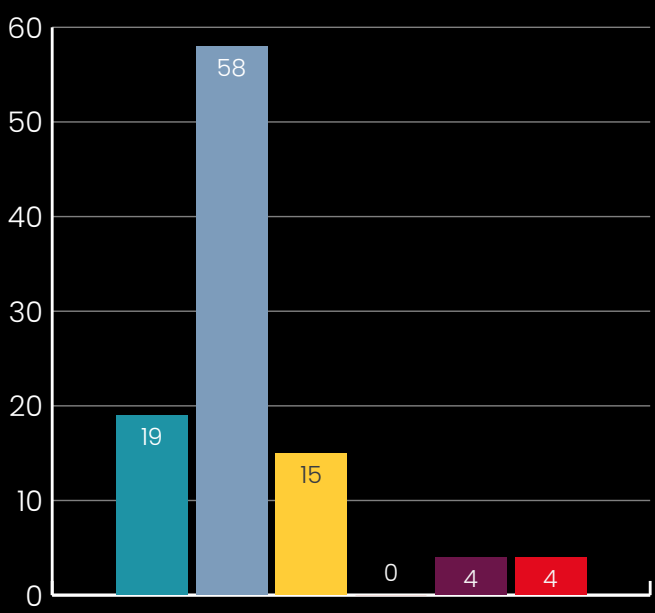
Le premier marché de masse des applications du quantique sera couplé aux technologies de l'IA.



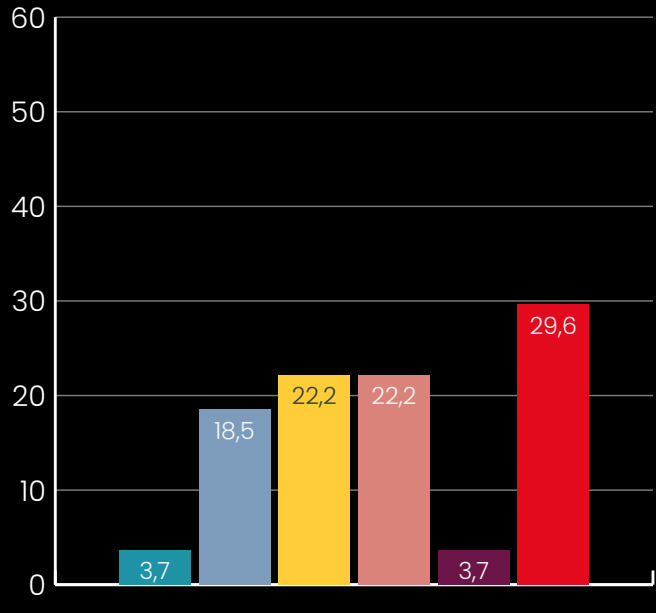
Selon vous, le scénario 1, *La porte étroite*, sera réalisé :



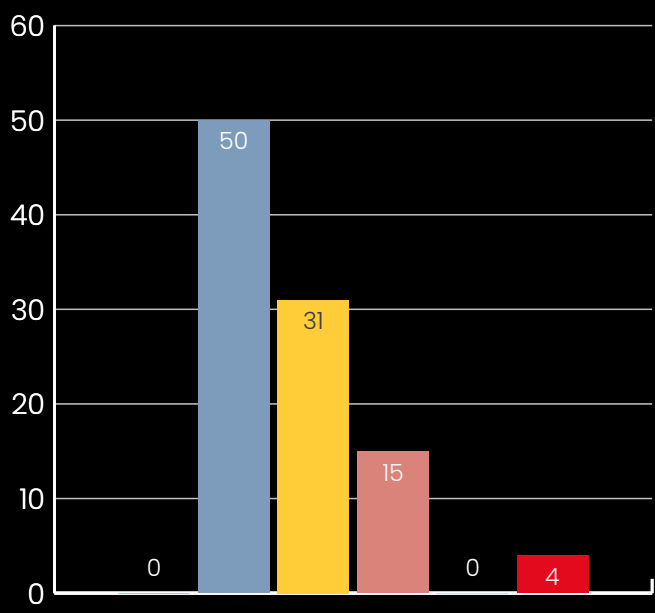
Selon vous, le scénario 2, *Extension du domaine quantique* sera réalisé :



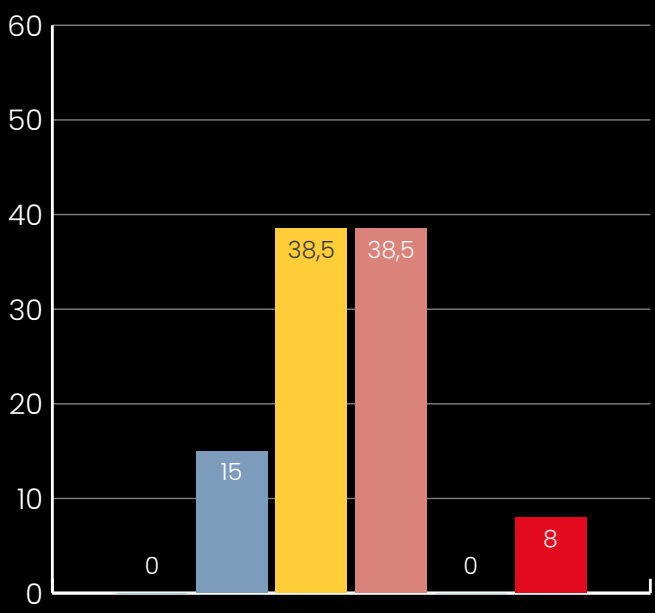
Quand est-ce que la QRAM sera opérationnelle ?



Selon vous, le scénario 3, *Les portes du FTQC sont ouvertes*, sera réalisé :



Selon vous, le scénario 4, *Le saut quantique*, sera réalisé :



Légende

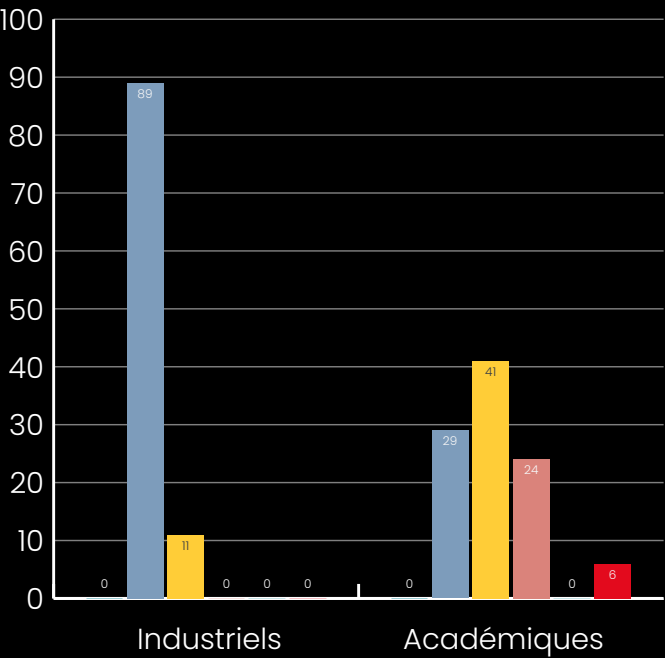
- Très vite, d'ici 2025
- D'ici 2032
- D'ici 2042
- En 2050 ou après
- Jamais
- Ne sait pas se prononcer

Les résultats de l'enquête sont exprimés en pourcentage.

Les biais

Nous nous apercevons que certaines propositions font consensus (avantage quantique lié à la consommation énergétique, concentration des acteurs d'ici 10 ans, etc.) alors que d'autres marquent clairement une grande divergence des réponses (le NISQ est une étape intermédiaire dans l'avènement du FTQC, l'avènement de la QRAM ou de l'interconnexion de cœurs quantiques d'ici 10 ans). Cela est bien entendu lié à la grande variété des profils technologiques des experts mais aussi à leur origine (milieu académique ou privé). Sans surprise, nous constatons que les acteurs du marché du calcul quantique sont beaucoup plus confiants dans la possibilité des progrès technologiques que les académiques.

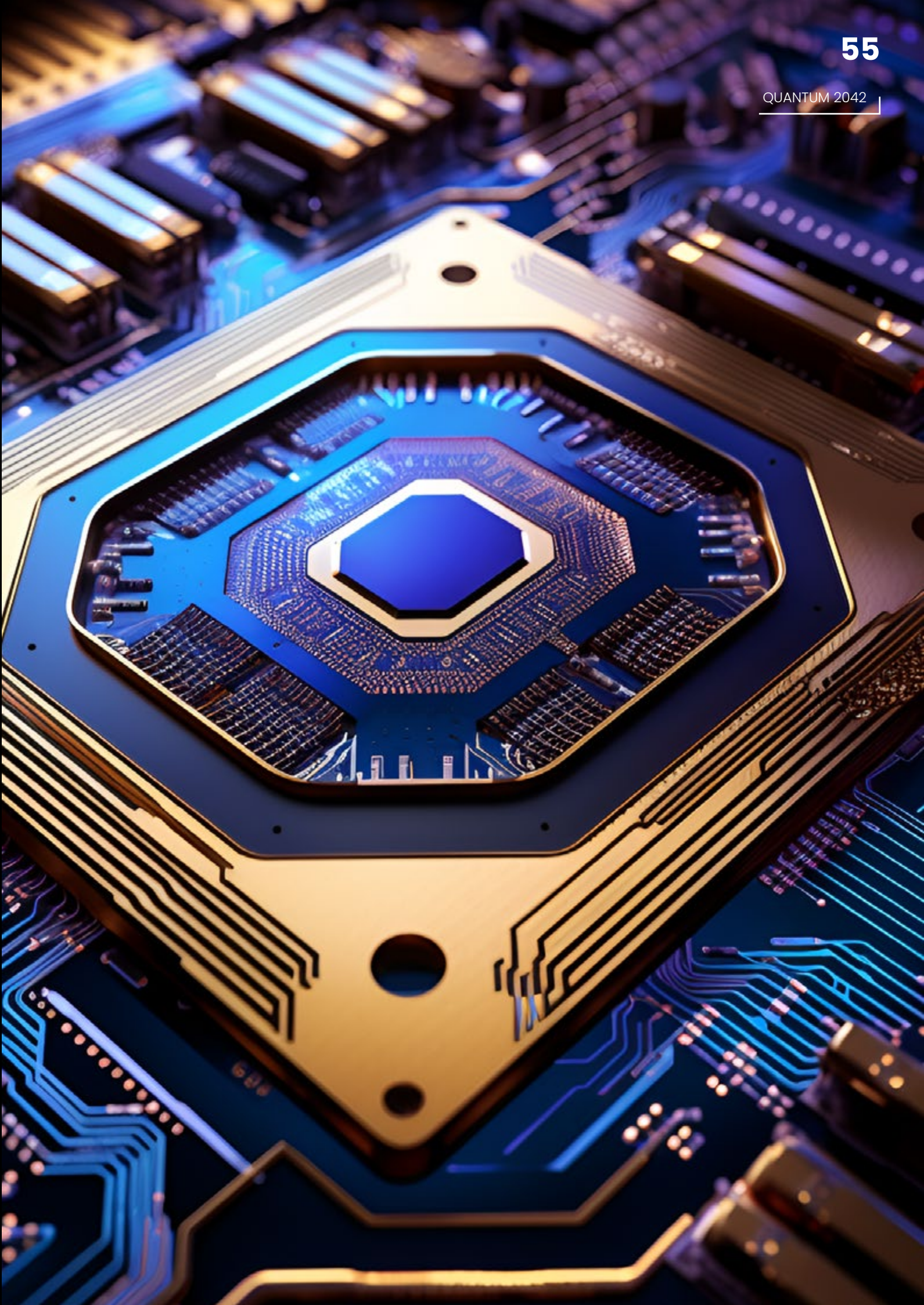
Selon vous, le scénario 3, Les portes du FTQC sont ouvertes, sera réalisé :



La légende

- Très vite, d'ici 2025
- D'ici 2032
- D'ici 2042
- En 2050 ou après
- Jamais
- Ne sait pas se prononcer

Les résultats de l'enquête sont exprimés en pourcentage.



DESIGN FICTION

Dans le cadre du projet Quantum 2042, nous avons complété l'étude prospective par une approche permettant de donner corps de manière plus immédiate aux conséquences possibles d'un avènement du calcul quantique.

En effet, les tenants et aboutissants du calcul quantique peuvent parfois sembler très « désincarnés », et il s'avère compliquer de les relier concrètement à « la vie qui va avec ».

A cet effet, nous avons adopté une approche de spéculation par le design, le Design Fiction, qui utilise les outils et compétences du design non pas dans une logique de recherche de solutions désirables, mais dans une intention de créer le débat. Cela aide à se poser les bonnes questions autour d'un sujet complexe. Le Design Fiction n'a pas vocation à créer des concepts valorisables, mais des traces de futurs possibles qui peuvent éclairer les choix de société à venir. Il ne consiste pas non plus en une étude exhaustive d'usages possibles, mais plutôt en une production d'anecdotes, de productions singulières qui permettent de s'extraire des « prêt-à-penser ».

Confronter Design Fiction et calcul quantique nous est apparu pertinent à 4 égards :

- L'hypothèse d'une utilisation du calcul quantique est un lointain saut dans l'inconnu, le design fiction s'inscrit dans cette logique d'éclairage sur le futur.
- Le calcul quantique, de par sa physique et de par ses applications (qui sont des problèmes mathématiques bien particuliers), pose des enjeux de représentation auquel le design, producteur de formes, peut naturellement s'atteler pour simplifier sa réception
- L'idée même de processeurs quantiques de grande capacité est très spéculative, pourtant une informatique quantique les utilisant a déjà une existence via des algorithmes quantiques, créant une sensation d'étrange banalité qui est assez propre au design fiction.
- L'actualité du calcul quantique est déjà presque en soit une forme de fiction, dans l'annonce de certaines performances par exemple. L'essor actuel des « fake news » augmente cet effet de trouble ce qui crée un terrain fertile pour des design fictions crédibles.

Ainsi, comme les archéologues exhument des traces du passé pour comprendre les modes de vie, les techniques, les règles sociales de civilisations passées, nous avons imaginé des productions humaines, appelées artefacts, qui pourraient exister dans l'hypothèse d'un « saut quantique » (cf scénario 4). Vous trouverez dans les pages qui suivent l'analyse des 4 artefacts qui nous semblent les plus pertinents à partager dans ce rapport.

Bruno TRUONG & Germain MAGAT

Lors de la restitution publique de ce rapport , les participants ont été invités à partager leurs ressentis via un court questionnaire. N'hésitez pas à faire de même : [participer](#)



Crédits photo : J.LEPAULLE / CEA

Sur 10 artefacts identifiés, nous en avons présenté 7 lors de la restitution publique du 1er décembre 2023. Afin de créer l'illusion d'objets véritablement issus du futur, nous les avons commentés et analysés comme si nous ne les avions pas nous-même conçus. Plus encore, nous nous sommes présentés comme des membres d'une association fictive, l'« Association Française d'Archéologie Prédictive » (a.f.a.p) dans le but de créer un sentiment d'incrédulité dans le public, et donc des réactions spontanées.



Crédits photo : B.TRUONG / CEA



Carte d'accès à une plateforme de calcul quantique, destinée à des équipes de recherche.

Intricate Qaas

La société INTRICATE exploite certaines zones («grids») d'un supercalculateur quantique (Q-HPC) appelé System Qne, basé à San José (USA).

Cet artefact **soulève la question de l'équilibre public-privé dans l'accès au calcul quantique** et aux grands instruments de manière générale. INTRICATE se rémunère par du consulting et de la co-publication.

Une mention de bas de page mentionne la réquisition possible des «grids» au seul profit des RTO américains. Cela souligne l'équilibre instable entre libéralisme et souverainisme créé par un outil qui pourrait être d'ordre stratégique sur le plan géopolitique.



Produit et packaging WeeElektron

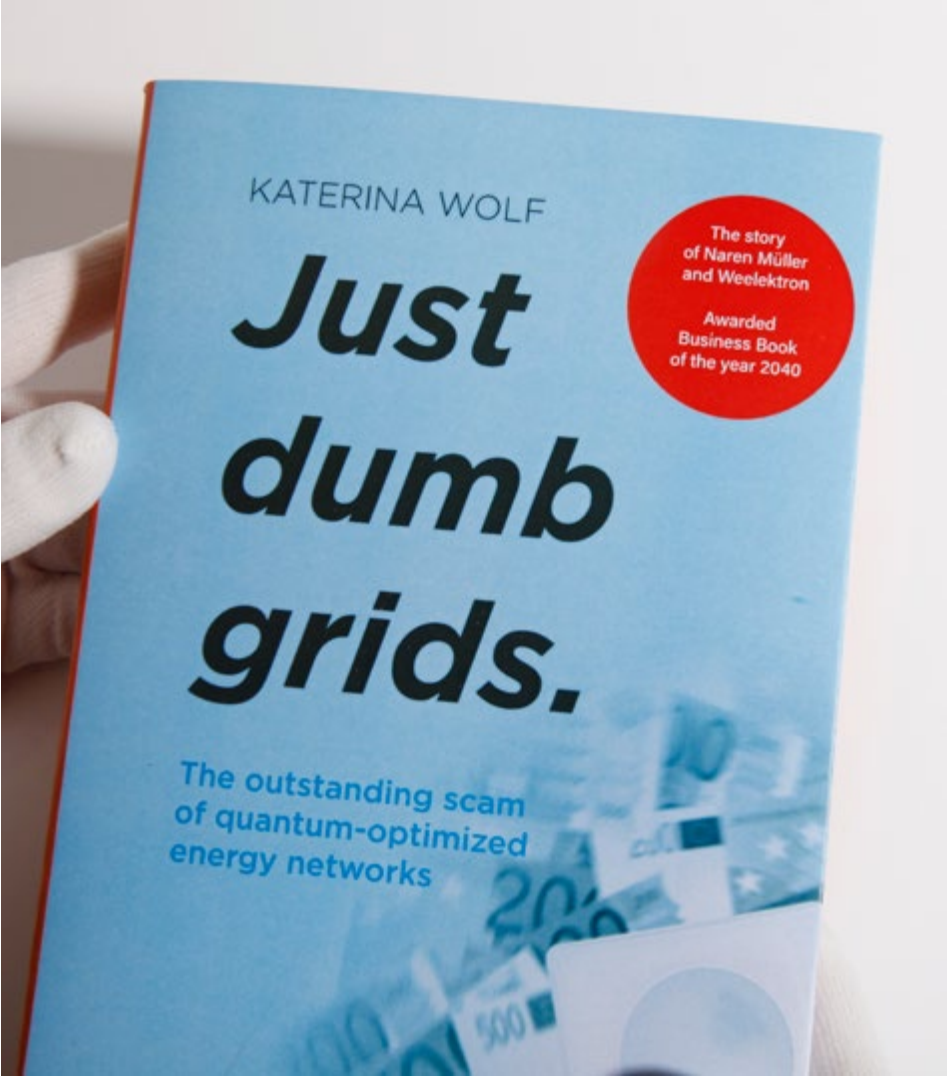
WeeElektron

Visiblement un objet connecté ressemblant à un interrupteur, associé à une application mobile, grand public (vraisemblablement vendu en grande surface). La promesse semble être de pouvoir gagner ou économiser de l'argent en dépensant moins d'énergie.

On suppose que ces objets sont disséminés dans les bâtiments, constituant un maillage intelligent pour la gestion de l'énergie avec une granulométrie très fine.

Ils permettraient de payer exclusivement l'énergie électrique dépensée à titre individuel, voire d'en faire une monnaie d'échange.

Cet artefact met en évidence la diversité des entreprises qui demain, pourront être impliquées dans la chaîne de valeur du calcul quantique : fabricants de produits électriques, sociétés immobilière, etc.



Just Dumb Grids

Ce livre dénonce l'incroyable arnaque des réseaux d'énergie optimisés par le quantique, comme en témoigne le sous-titre. Il s'attache plus précisément à dénoncer la levée de fonds de 2 milliards de la société Weelektron, qui a profité de la bulle spéculative du quantique. Les promesses des produits Weelektron n'ont a priori jamais été tenues. Cet artefact met en évidence **les risques d'un secteur technologique qui peut survendre et ne pas tenir ses promesses.** Pire, il peut être propice à des arnaques comme on en a vu dans les biotech (Theranos) ou les cryptomonaies (FTX).

Livre primé de Katerina Wolf
« Just dumb grids »

Crédits photo : B.TRUONG / CEA



Embrace Longevity

Dans la fin des années 2040, les thérapies de précision semblent avoir dépassé le cadre du traitement des maladies rares ou des cancers. Ce type de médecine réalisé sur mesure en fonction des patients et leur maladie semble devenue plus facile d'accès, tout en restant chère. **Une population très aisée aura les moyens d'y recourir pour prolonger la vie.** C'est, semble t-il, l'usage du quantum computing qui aurait ouvert de nouvelles voies dans le champ de la médecine hyper-personnalisée sous cette forme-là. Cet artefact met en exergue **les risques d'une médecine à deux vitesses, amplifiés par le calcul quantique.** Comme dans le secteur de la finance, est-ce que ces technologies devraient être régulées ou simplement soumises aux lois du marché ?

Crédits photo : B.TRUONG / CEA



Ecrin noir siglé contenant un microtube, inscriptions « Precision Therapy », « Al-Bakri Clinic Dubai » et « Embrace Longevity »



CONCLUSION

Aujourd’hui, peu d’interlocuteurs ont une vision globale du calcul quantique, que ce soit au niveau des investissements, des évolutions hardware et software ou des applications. Le sujet étant en constante évolution, il fait toujours l’objet de débats et de controverses entre experts et acteurs du domaine, rendant l’appréhension **des horizons temporels** de matérialisation des potentiels du calcul quantique d’autant plus complexe. Dans ce rapport, nous avons voulu mettre en évidence le fait qu’il est possible d’identifier **les jalons et obstacles/verrous à lever** et de **suivre les avancées de certains indicateurs associés** (montée en échelle du matériel, nombre de qubits, taux et correction d’erreurs, etc.). Des ruptures technologiques et scientifiques sont nécessaires pour le développement du calcul quantique. Leur survenue potentielle induit des **trajectoires d’évolution non-linéaires**.

Certains obstacles technoscientifiques ont été franchis par le passé et ont permis de passer du stade de la preuve de concept aux expérimentations actuelles. Ainsi récemment dans sa dernière roadmap¹, **IBM affiche son effort de développement de nouveaux codes de correction d’erreurs** qui permettraient de diminuer significativement le nombre de qubits physiques nécessaires pour obtenir des qubits logiques. Certains acteurs comme Quera visent les 100 qubits logiques en 2026². Un autre effort majeur d’IBM réside dans **l’interconnexion entre cœurs quantiques avec le processeur Héron**. Ces 2 verrous majeurs sont des clés d’entrées pour accéder au scénario 3, *Les portes du FTQC sont ouvertes*. Ces évolutions sont bien entendu à suivre de près pour réactualiser le positionnement de la technologie quantique au regard des scénarios que nous avons proposés dans ce rapport.

Tout comme l’IA, le calcul quantique est un catalyseur des transformations digitales à venir. Les trajectoires de développement du calcul quantique n’évolueront pas indépendamment des évolutions de structures et de performances des supercalculateurs HPC, de **l’intelligence artificielle et de la gestion de données. Les trois domaines apparaissent de plus en plus liés**. D’une part, car le calcul quantique résultera d’une hybridation entre HPC et ordinateur quantique, nécessaire à l’exploitation des calculs. D’autre part, car l’IA pourrait optimiser le pilotage de cette chaîne de commande³ la préparation de données, voire faciliter la programmation quantique (IA générative), tout en bénéficiant de la puissance du calcul quantique pour optimiser ses méthodes d’apprentissage. Ainsi, explorer les conséquences des progrès potentiels du calcul quantique, c’est aussi explorer les apports des développements et couplages entre ces trois composantes pour le traitement de problèmes complexes. Devant le problème de consommation énergétique du digital et des serveurs, on assiste à l’émergence d’initiatives (ex : QEI, etc.) qui étudient **l’utilisation de machines quantiques pour dépenser moins d’énergie** à calcul équivalent. Devant les consommations des serveurs liés à l’IA générative grandissantes ces dernières années, des réflexions émergent pour **utiliser le calcul quantique pour l’apprentissage**, notamment à travers le QNLP (Quantum Natural Language Processing).

Aussi, il ne faut perdre de vue que d’autres progrès de l’informatique classique verront le jour d’ici 2042. Ils pourront ou challenger l’informatique quantique ou l’accélérer. Ce qui est certain, c’est que la dynamique enclenchée dans le quantique entraîne d’ores et déjà des petites révolutions dans l’informatique classique (quantum inspired, etc.).

¹ IBM Debuts Next-Generation Quantum Processor & IBM Quantum System Two, Extends Roadmap to Advance Era of Quantum Utility – Dec 4, 2023

² <https://www.quera.com/press-releases/quera-computing-releases-a-groundbreaking-roadmap-for-advanced-error-corrected-quantum-computers-pioneering-the-next-frontier-in-quantum-innovation>

³ C’est notamment l’approche de Q-CTRL. <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/q-ctrl-announces-new-ai-capabilities-for-boulder-opal-quantum-software/>

RECOMMANDATIONS

Tout comme l’IA, le calcul quantique est un catalyseur des **transformations digitales à venir**. C’est un virage que les entreprises doivent appréhender et même **anticiper**. La massification de l’usage du quantique ne devrait pas être présente d’ici 10 à 20 ans, toutefois des premiers secteurs peuvent d’ores et déjà utiliser, mais les changements induits dans les organisations seront tels qu’il semble **d’ores et déjà nécessaire** d’acquérir une connaissance sur le sujet pour pouvoir **se préparer et se positionner**. Pour cela, les grands groupes français doivent rapidement évaluer l’intérêt stratégique du calcul quantique pour leur activité.

Nous proposons les recommandations et actions suivantes pour les entreprises souhaitant se préparer à l’ère du calcul :

1. Nommer en interne des **référents « quantiques »** chargés d’identifier et d’évaluer les cas d’usages potentiels du calcul quantique au sein de leur organisation et de leur marché. Le recensement des cas d’usages du calcul quantique au sein d’une organisation peut être compliqué et nécessite de faire interagir toutes les parties prenantes (R&D, logistique et achats, production etc.). Il faut avant tout lister les problèmes mathématiques et les méthodes de résolutions que l’on utilise déjà en interne et évaluer si elles sont susceptibles de bénéficier de l’utilisation d’algorithmes quantiques existant sur des calculateurs améliorés. Il faut également se renseigner sur le développement de nouveaux algorithmes classiques ou quantiques qui pourraient avoir des impacts significatifs sur la résolution.
2. **Se former et tester des cas d’usages** sur les différents environnements disponibles (émulateurs, machines quantiques) au fur et à mesure des développements. Après avoir identifié des cas d’usages les plus pertinents, il faut se faire une idée des barrières à leur réalisation et pouvoir les évaluer dans les environnements de tests disponibles. La plupart des acteurs du quantiques proposent ces services sur des environnements différents et pour la plupart propriétaires. Eviden quant à lui propose d’émuler différentes machines quantiques grâce à sa Quantum Learning Machine (QLM).
3. Si possible, **mutualiser les besoins et croiser les retours d’expériences** avec d’autres acteurs qui partagent des attentes identiques dans d’autres secteurs d’activité. Échanger ses points de vue et difficultés est important pour se faire une idée plus précise des mutations émergentes dans un domaine. Cependant, travailler dans des structures regroupant des acteurs du même secteur d’activité ne favorise pas nécessairement les échanges, les enjeux concurrentiels limitant la volonté de partage et d’ouverture. Pour des sujets aussi complexes que le calcul quantique, participer à des réseaux regroupant des acteurs de différents secteurs d’activité permet de mieux collecter les informations et d’initier des collaborations sans entrave.
4. **Mettre en place une action de veille sur l’évolution des technologies** quantiques et son impact pour l’organisation, que cela soit en France mais aussi à l’étranger. Afin de mieux pouvoir évaluer l’évolution des changements dans ce domaine, il est important de maintenir une action continue de recherche d’informations sur les dernières publications ou articles afin de savoir positionner son entreprise. Ce n’est pas forcément lorsque l’on est dans la phase de « hype » que les signaux les plus significatifs apparaissent.
5. **Participer aux groupes d’influences et de travail dans les instances de normalisation**. Les grands groupes américains et chinois sont très présents dans les instances de normalisation. Il est important que les entreprises Françaises du calcul quantique soient présentes pour contrer des orientations qui pourraient les désavantager.
6. **Sortir le quantique du domaine expert** pour faire en sorte que la population puisse s’approprier et entrevoir clairement les bénéfices.

A1 • LE GLOSSAIRE DU CALCUL QUANTIQUE

L’absence de consensus sur ces définitions entre experts et acteurs industriels fait de cet exercice un travail évolutif, qui a été soumis au débat entre les membres partenaires du groupe de travail.

A

Application industrielle Une invention est considérée comme une application industrielle si son objet peut être fabriqué ou utilisé dans tout genre d’industrie. Le terme « industrie » doit être compris comme étant l’exercice de toute activité de caractère technique standardisée et massifiée, y compris les services, l’agriculture, les activités minières, etc.

Avantage quantique Supériorité démontrée d’un ordinateur quantique sur un ordinateur classique, pour un problème spécifique, et au vu d’un ou plusieurs critères définis (vitesse, qualité résultat, consommation énergétique).

C

Calculateur analogique Catégorie de calculateurs quantiques résolvant des problèmes par analogie avec le comportement d’un système quantique que l’on peut considérer comme un ensemble de qubits. De fait, ces ordinateurs ne mettent pas en œuvre des portes quantiques. En termes mathématiques, les analogies mettent en œuvre l’évolution d’un hamiltonien. Les hamiltoniens sont les opérateurs décrivant l’énergie d’un système. Les deux principales catégories de calculateurs analogiques sont les processeurs quantiques analogiques dont le réseau de qubits est reconfigurable (type Pasqal) et les calculateurs à recuit quantique simulé utilisant un réseau de qubits de structure fixe (annealing type D-Wave).

Connectivité Nombre de qubits physiques pouvant être mis en interaction quantique avec un qubit. C’est souvent le nombre de plus proches voisins du réseau physique de qubits, mais certaines technologies permettent d’interagir au-delà des plus proches voisins.

Correction d’erreurs Méthode visant à réduire les taux d’erreurs d’un système quantique afin de présenter un taux d’erreurs apparent très faible (à minima inférieur à 10^{-12}) et une durée de cohérence infinie afin de pouvoir appliquer les algorithmes les plus exigeants et complexes (FTQC). Il s’agit d’une méthode utilisant des outils matériels et logiciels adaptés à l’architecture des qubits, en particulier leur connectivité, visant à distribuer l’information quantique sur plusieurs dizaines/centaines/milliers de qubits physiques, identifier et corriger les erreurs par des mesures astucieuses. Il existe différents types de codes correcteurs d’erreurs, chacun avec ses avantages et inconvénients : codes stabilisateurs, codes topologiques, etc.

D

Décohérence quantique Dégradation inéluctable des propriétés quantiques d’intrication et de superposition d’un système quantique sous l’effet des interactions avec son environnement, qui aboutit à une situation où le système obéit aux lois de la physique classique.

F

Fidélité / taux d’erreurs La fidélité d’un ordinateur quantique désigne sa robustesse face aux différents types d’erreurs pouvant affecter la cohérence des qubits et la qualité des opérations quantiques. Les constructeurs communiquent généralement sur les taux d’erreurs de portes à 1 ou 2 qubits, ou sur la mesure (exprimée en %). Dans nos scénarios, on désigne le taux d’erreurs d’un système quantique comme le taux d’erreurs maximal parmi les opérations utiles et accessibles de ce système quantique (borne haute). La fidélité d’un ordinateur quantique correspond à la différence entre un système théorique à la fidélité parfaite et le taux d’erreurs global du ordinateur sur un calcul donné. Par exemple, on dit d’un ordinateur dont le taux d’erreurs est de 1 % que sa fidélité est de 99 %. Il est important de noter qu’en pratique, cette fidélité quantique dépend du « volume du calcul », c’est-à-dire du nombre de qubits physiques du système multiplié par la profondeur de circuit de l’algorithme utilisé pour effectuer le calcul. Les erreurs « unitaires » se propagent en effet d’autant plus qu’on multiplie l’application de portes logiques et qu’on augmente la taille du registre quantique .

FTQC (Fault-Tolerant Quantum Computer) Calculateur quantique à portes universelles, résistant aux erreurs grâce à l’implantation de correction d’erreurs. Ce type de machine est nécessaire pour pouvoir appliquer des algorithmes à la profondeur de circuit importante. Elle permet également de pouvoir coder tout type d’algorithme quantique.

I

Intrication En mécanique quantique, des qubits peuvent être dans un état particulier dit intriqué. Lorsque des qubits sont intriqués, l’état combiné des deux qubits ne peut pas être décrit de manière indépendante en considérant chaque qubit séparément. Au lieu de cela, l’état des deux qubits est interdépendant et décrit comme un tout : toute mesure ou changement de l’un des qubits affecte instantanément l’autre, quelle que soit la distance qui les sépare. Si vous mesurez l’état d’un qubit et que vous trouvez une certaine propriété, vous savez instantanément quelle propriété vous trouverez en mesurant l’autre qubit, même s’ils sont très éloignés l’un de l’autre.

M

Mitigation d’erreurs Méthode visant à garder un sens aux résultats lors de la mise en œuvre d’un algorithme sur un ordinateur quantique sensible au bruit (NISQ). Il s’agit d’une méthode utilisant des outils software, en lien avec l’optimisation des algorithmes et la compilation. Par exemple, une méthode consiste à mesurer les résultats d’un calcul à différents niveaux de taux d’erreurs d’un système quantique (volontairement forcés). Par extrapolation, on estime alors quel serait le résultat du calcul pour un système idéal non-bruité.

N

NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum Computer) Calculateur quantique à portes, bruité et non corrigé, utilisant des algorithmes tolérants au bruit ou à faible profondeur de circuit (généralement des algorithmes hybrides classique-quantique résolvant des problèmes variationnels). L’utilisation du NISQ est envisagée en attendant que des méthodes de correction d’erreurs efficaces et à large échelle soient implantées.

O

Overhead

Terme anglais désignant le ratio du nombre de qubits physiques nécessaires par qubit logique pour l'application de la correction d'erreurs. Les annonces d'overhead des constructeurs varient entre une trentaine de qubits physiques et dix mille qubits physiques par qubit logique. Ces annonces supposent que les overhead ne se dégradent pas avec la montée en échelle de la correction d'erreurs, ce qui n'a pas encore été prouvé. Pour la correspondance entre les jalons des qubits logiques et physiques de nos scénarios, nous fixons une valeur prudente de l'overhead à 1000. Cette valeur est appelée à diminuer fortement dans le temps avec déjà des publications de certains constructeurs qui arrivent à des réductions de l'ordre de 14 fois avec des codes correcteurs LDPC¹ ou de 60 fois à l'aide de qubits de chats².

P

Profondeur de circuit

La profondeur de circuit d'un algorithme quantique fait référence au nombre de portes quantiques (opérations élémentaires appliquées aux qubits) qui doivent être exécutées en séquence pour accomplir une tâche donnée. Il s'agit d'une mesure importante de l'efficacité des algorithmes quantiques. Une profondeur de circuit plus faible signifie que l'algorithme peut être exécuté plus rapidement. Dans le contexte des calculateurs à portes bruités, la réduction de la profondeur de circuit permet également de limiter la propagation des erreurs au fil des calculs et donc de préserver le sens des résultats. En ce sens, elle constitue l'un des champs de recherche majeurs de l'algorithmie quantique. Elle contribue aux côtés d'autres méthodes, comme la mitigation d'erreurs, à obtenir des algorithmes relativement tolérants au bruit.

Q

Qubit physique (QPB)

Unité d'information dont le support physique est un système quantique à deux états superposables et intricables avec d'autres qubits. Les jalons de nos scénarios supposent que les qubits physiques sont tous intricables entre eux. Ce n'est aujourd'hui pas le cas dans les annonces des constructeurs : le nombre de qubits physiques réellement intricables par rapport au nombre de qubits physiques peut varier d'un facteur 10 à 100.

Qubit logique (QBL)

Abstraction utilisée pour représenter l'unité de base de l'information quantique dans un algorithme ou un circuit quantique. Au contraire du qubit physique sensible à différents types d'erreurs et la décohérence quantique, le qubit logique se caractérise par une stabilité et une fidélité idéale, permettant d'appliquer des algorithmes avec une grande profondeur de circuit ³. De manière plus concrète, un QBL est obtenu par un assemblage de qubits physiques qui permet la mise en œuvre de la correction d'erreurs. Le manque d'homogénéité dans la définition d'un qubit logique conduit à des communications des acteurs pouvant porter à confusion. Certains constructeurs comme Google affirment avoir atteint la première étape de leur roadmap vers la correction d'erreurs et développeront probablement les premiers exemples de qubits logiques dans les années à venir. Toutefois, les taux d'erreurs obtenus sur les qubits logiques apparaissent actuellement supérieurs à ceux des qubits physiques bruités sur lesquels ils se basent ⁴. Ainsi, obtenir un QBL ne signifie pas forcément qu'il sera utile en termes de calcul : il faut que sa fidélité soit suffisante pour qu'on puisse lui appliquer les opérations d'un algorithme à portes sans que les taux d'erreurs augmentent. Par ailleurs, obtenir quelques dizaines de qubits logiques très faiblement bruités ne suffira pas à pouvoir démontrer une suprématie quantique.

Schématiquement, l'existence de qubits logiques « non-utiles » est représentée dans les jalons de nos scénarios par des hachures dans l'ordonnée des QBL. On pourrait ainsi obtenir dans nos premiers scénarios des démonstrateurs de plusieurs qubits logiques sans pour autant qu'ils permettent d'atteindre le FTQC⁵.

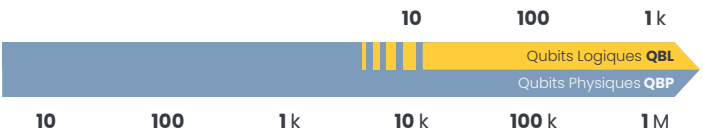


Figure 10 : Echelle qubits physiques et logiques utilisée dans les scénarios technoscientifiques

S

Superposition

La superposition d'états quantiques est un concept fondamental de la mécanique quantique, formulée mathématiquement dans l'équation de Schrödinger. Elle se réfère à la possibilité qu'un système quantique puisse exister dans plusieurs états différents en même temps. Contrairement aux bits informatiques classiques qui sont dans un état bien défini à un moment donné (0 ou 1), les qubits peuvent être dans un état de superposition, représenté sous la forme d'une combinaison d'états quantiques de ce système. Lorsque l'on mesure l'état d'une particule en superposition, on n'obtient généralement qu'un résultat particulier, et l'état quantique s'effondre dans cet état spécifique. Dans le cadre des processeurs quantiques, ce processus dit « d'effondrement de la fonction d'onde » a pour conséquence qu'il n'est pas possible de mesurer ou de copier l'état d'un système quantique pendant que les calculs sont en cours.

Suprématie quantique

Résolution par un ordinateur quantique d'un problème impossible à résoudre par un ordinateur et un algorithme classique dans un temps raisonnable au vu de l'usage concerné. La suprématie quantique est donc un critère relatif aux différents usages du calcul quantique.

T

Théorème du seuil

Il stipule qu'il est possible de réaliser des calculs quantiques fiables, même en présence d'erreurs, à condition que le taux d'erreur global reste en dessous d'un certain seuil critique (communément admis de 1 %). En d'autres termes, le théorème du seuil suggère que si les erreurs quantiques, telles que les erreurs de mesures ou les erreurs dues aux interactions avec l'environnement, restent en dessous d'un certain niveau critique, il est possible de corriger ces erreurs de manière efficace. Certains chercheurs travaillent sur des techniques visant à abaisser davantage ce seuil, ce qui permettrait d'envisager des ordinateurs quantiques plus robustes et performants.

V

VLSQ (Very Large Scale Quantum Computer)

Sous-catégorie du FTQC, désignant des calculateurs à portes composés de milliers de qubits logiques. Le VLSQ ouvre la voie à l'application des algorithmes actuels les plus emblématiques (Shor, HHL, etc.).

¹ <https://arxiv.org/pdf/2308.07915.pdf>
² <https://arxiv.org/pdf/2302.06639.pdf>
³ Voir définition ci-contre
⁴ https://www.theregister.com/2023/02/22/google_milestone_quantum/
⁵ Voir section « Scénarios techno-scientifiques »

A2 • LES VARIABLES DU SYSTÈME PROSPECTIF

Variables techno-scientifiques hardware

- H1. Montée en échelle du calcul à portes et correction d’erreurs
- H2. Chaînes de commande : miniaturisation et industrialisation
- H3. Interconnexions de “cœurs” et mémoires quantiques
- H4. Consommation énergétique (et progrès des technologies cryogéniques)
- H5. Potentiel des matériels adiabatiques utilisant le recuit quantique (annealing)
- H6. Potentiel des processeurs quantiques analogiques reconfigurables
- H7. Progrès des HPC
- H8. Calcul quantique photonique et MBQC
- H9. Technologies de production des qubits

Variables techno-scientifiques software

- S1. Progrès des algorithmes quantiques et classiques
- S2. Préparation des données et couplage avec HPC

Variables écosystème

- E1. Normes et standards

Les éléments suivants relatifs à l'écosystème n'ont pas fait l'objet d'éclairages prospectifs spécifiques :

- E2. Modèles économiques des acteurs : consolidation des start-ups, formation de consortiums, intégration horizontale et verticale, etc.
- E3. Compétences dans le domaine du QC : Disponibilité des ressources, concurrence à leur accès, développement d’une double culture informatique classique-quantique, etc.
- E4. Les politiques et stratégies : européennes, US, CANADA, Chine dans le domaine du QC.

MERCI À NOS PARTENAIRES





CEA

Direction de la Recherche et de la Technologie
Service Prospective & Innovation

Y.SPOT

17, avenue des Martyrs
38000 Grenoble
www.yspot.fr

Contacts étude :

Timothée SILVESTRE – Chargé d'études prospectives
timothee.silvestre@cea.fr

Christophe VAUTEY – Responsable du HUB Quantique CEA
[christophe.vautey @cea.fr](mailto:christophe.vautey@cea.fr)