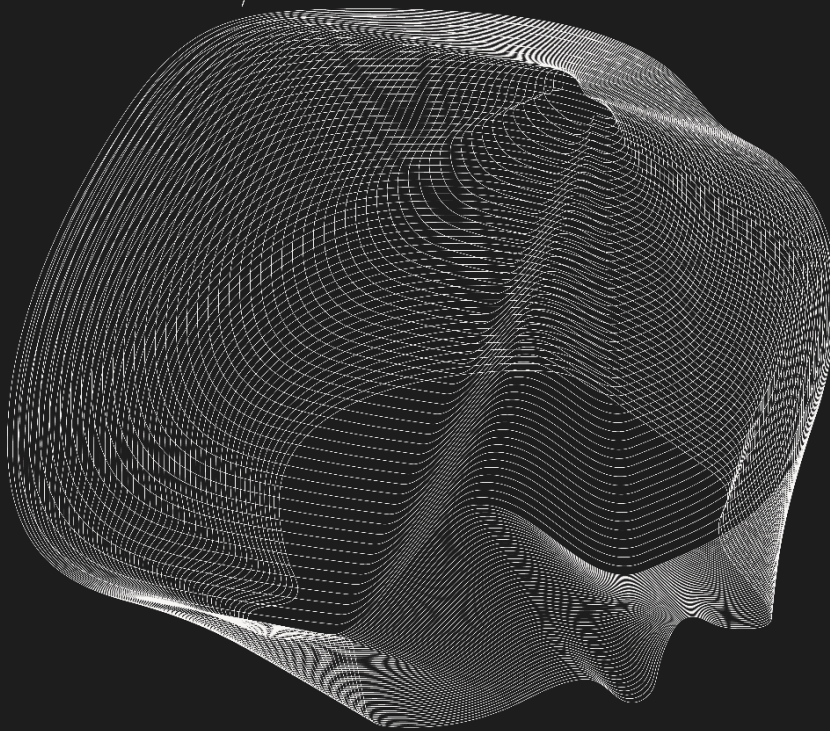


ADD ON QUANTUM 2042

Rapport hub quantique

Actualisation étude prospective sur les impacts
du calcul quantique en 2042 à l'aune
de l'actualité scientifique juin 24 - juin 25

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



2
0
4
2

Avis au lecteur :

Ce rapport est une mise en perspective à l'aune de l'actualité scientifique et technologique sur la période juin 2024 – Juin 2025, d'un travail de prospective porté par la direction Innovation du CEA et Futuribles début 2024 (<https://yspot.fr/wp-content/uploads/2024/04/rapport-public-quantum2042-numerique-avril2024.pdf>) .

Il est à la croisée de l'effort initial et d'une synthèse de 12 mois de veille conduite dans le cadre du **Hub Quantique** par une quinzaine de partenaires dont une douzaine s'est réunie depuis la sortie de l'étude prospective initiale.

Le Hub quantique <https://yspot.fr/hub-quantique/> est une initiative collaborative dédiée à la veille, la formation et surtout l'évaluation et l'expérimentation des cas d'usage du calcul quantique à court, moyen et long terme. Il réunit des partenaires industriels, pourvoyeurs de technologies et utilisateurs, coordonnés par le CEA afin de préparer des entreprises désireuses de se former et d'explorer les applications et impacts du calcul quantique à court, moyen et long terme, afin d'anticiper l'arrivée d'une technologie pouvant être disruptive.

L'ambition de ce point d'étape n'est pas d'être un écrit précis, technologique mais de produire un support pour vérifier les conclusions et réflexions rendues début 2024 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 ». Elle s'appuie sur des tendances, signaux faibles et ruptures pour décrire les futurs possibles lesquels sont ici réévalués en fonction de ce que le secteur produit en termes d'avancées et d'annonces dans la période donnée. Cet effort vise à 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 prend pas nécessairement en compte l'intégralité des données scientifiques, ni toutes les opinions des participants ayant été sollicités ou ayant contribué.

Remerciements :

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce rapport :

- Les partenaires du Hub quantique pour leurs échanges sur le sujet
- Daniel Vert, Tiana Delhome, Francesco Binanti, Philippe Caillol et Mélusine Suel pour leurs conseils et leur relecture
- Toute les équipes du Y-Spot et de la Direction Innovation de la Direction de la Recherche Technologique du CEA, sans qui ce rapport n'aurait pu voir le jour.

En 2025 au moment de la rédaction de ce rapport, le partenariat du Hub Quantique est constitué de :

- Dix end users



- Six techno providers



- Coordonnés par le



Sommaire

Table des matières

1	Executive summary	5
2	Introduction.....	7
3	Rappels des principaux résultats issus de Quantum 2042.....	9
3.1	Synthèse des messages clefs	9
3.2	Les scénarios prospectifs de Quantum 2042 - Rappels	12
3.2.1	<i>Scenari01 : La porte étroite – Small NISQ & Analogique.....</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Scénario 2 : Extension du Domaine du Quantique – Large NISQ & Analogique.....</i>	<i>13</i>
3.2.3	<i>Scénario 3 : Les portes du quantiques sont ouvertes – La suprématie quantique arrive</i>	<i>14</i>
3.2.4	<i>Scénario 4 : Le saut quantique – En route vers le Very Large Scale Computing (VLSQ)</i>	<i>15</i>
3.3	Synthèse graphique des scénarios prospectifs	17
3.4	Articulation entre les différents scénarios	18
3.5	Cadre d’analyse	19
3.5.1	<i>Matériel - Hardware</i>	<i>19</i>
3.5.2	<i>Logiciel bas niveau – Middleware.....</i>	<i>19</i>
3.5.3	<i>Algorithmes – Software</i>	<i>20</i>
4	Evolution des Jalons prospectifs 2024 – 2025	21
4.1	Méthodes & sources d’informations.....	21
4.2	Technologies de Qubits	22
4.2.1	<i>Supraconducteurs</i>	<i>22</i>
4.2.2	<i>Ions piégés</i>	<i>31</i>
4.2.3	<i>Atomes froids ou neutres.....</i>	<i>33</i>
4.2.4	<i>Photonique.....</i>	<i>36</i>
4.2.5	<i>Semiconducteurs.....</i>	<i>39</i>
4.2.6	<i>Autres technologies.....</i>	<i>43</i>
4.2.7	<i>Tableau récapitulatif.....</i>	<i>46</i>
4.3	Correction d’erreurs	48
4.4	Interconnexion quantique	50
4.5	Mémoire quantique.....	54
4.6	Algorithmie	55
4.6.1	<i>Approche quantique analogique.....</i>	<i>56</i>
4.6.2	<i>Approche quantique à portes.....</i>	<i>57</i>
4.6.3	<i>Approche « Quantum inspired » & réseaux de tenseurs.....</i>	<i>61</i>
4.7	Benchmarking & comparaison des technologies.....	63
4.8	Avancement dans les scénarios prospectifs	64
5	Les cas d’usages – Nouveaux développement 2024-2025.....	66
5.1	Chimie, Santé, Pharmaceutique et associés	66
5.2	Finance (banque, assurances)	67
5.3	Physique, Recherche fondamentale	68
5.4	Energie.....	69
5.5	A la recherche de l’avantage quantique.....	70
5.5.1	<i>Multiplications des publications et des annonces.....</i>	<i>70</i>

5.5.2	Cadre d'analyse des cas d'usages	70
5.5.3	Etat des lieux en Juin 2025.....	71
6	Conclusions.....	72
7	ANNEXES.....	75
7.1	ANNEXE 1 : Glossaire du calcul quantique.....	75
7.2	Tables des illustrations	79

1 Executive summary

Dix-huit mois après la publication de l'étude prospective Quantum 2042, le calcul quantique poursuit sa maturation technique tout en restant à mi-chemin entre promesses et réalité industrielle. L'écosystème mondial a franchi des jalons techniques significatifs, mais les verrous identifiés en 2024 demeurent pour l'essentiel.

A ce jour, **aucune technologie ne se démarque définitivement, et la coexistence des approches devrait encore perdurer pendant plusieurs années.** Les technologies à base de supraconducteurs et d'atomes neutres ont aujourd'hui dépassé le seuil symbolique des 1000 qubits physiques, tandis que les qubits semi-conducteurs démontrent une compatibilité prometteuse avec les procédés CMOS industriels. Les technologies photoniques sont en pleines croissances attirant de nombreux développements et capitaux, pendant que d'autres approches prometteuses à base de centres NV (Nitrogen-Vacancy)¹ ou de spins nucléaires commencent à sortir des laboratoires.

La période 2024-2025 a aussi été marquée par une **intensification des efforts sur la correction d'erreurs quantiques**, enjeu critique pour atteindre le calcul tolérant aux fautes (FTQC). On peut aussi identifier dans les publications les **prémises du développement de l'interconnexion entre cœurs quantique et de la mémoire quantique.**

Du côté logiciel, **l'algorithmie quantique progresse** avec de nombreuses études, publications et synthèses récentes, permettant d'avoir aujourd'hui un panorama plus complet du domaine. En parallèle, les approches classiques de **réseaux de tenseur** et autres méthodes « quantum-inspired » progressent rapidement, simulant des systèmes quantiques de plus en plus grands et **remettant en question plusieurs revendications de suprématie quantique.**

Les quatre scénarios définis dans Quantum 2042 restent pertinents, mais certains jalons seront probablement dépassés plus rapidement que prévu :

- **Le scénario pessimiste « la Porte étroite » semble pouvoir être atteint bien avant 2042** : Le seuil des 1 000 qubits physiques a déjà été franchi par certaines machines, mais avec des spécifications insuffisantes pour permettre d'implémenter des calculs utiles.
- Les progrès sur la fidélité et la correction d'erreurs rendent **le scénario 2 « Extension du domaine du quantique » moins probable pour 2042** : les feuilles de routes de la plupart des fabricants de machines identifient le NISQ comme une étape intermédiaire

¹ Le centre NV correspond à l'association d'une impureté atomique d'azote (N) et d'une lacune de carbone (V pour vacancy) placés sur deux sites adjacents de la maille du diamant

plus ou moins longue avant l'avènement des FTQC. Toutefois, les avancées sur ces technologies habilitantes doivent encore se confirmer.

- A contrario, ces mêmes avancées **renforcent la probabilité d'atteindre le scénario 3 « Les portes du quantique sont ouvertes » à horizon 2042**. On est cependant encore loin d'atteindre les 100 qubits logiques propre et stable, seuil nécessaire pour offrir la profondeur et l'espace de calcul utile aux cas d'usage les plus demandeurs.

Les cas d'usage en **chimie, santé et finance** restent à ce jour les plus prometteurs, mais **l'avantage quantique sur des problèmes réels n'est pas encore démontré de façon indiscutable**. Certaines annonces très optimistes de grands acteurs, donnant lieu à des campagnes de communication très intensive dans les médias, sont régulièrement remise en question par les expertes du domaine. Les organisations sont donc invitées à **maintenir une veille active et une approche critique face aux annonces**, tout en développant les compétences internes nécessaires pour évaluer les opportunités à horizon 2030-2042. La prudence reste de mise face à l'économie de la promesse qui caractérise ce secteur en pleine effervescence dans un contexte où il est complexe pour les entreprises de mener des projets de R&D long terme qui plus est quand cela requiert des compétences expertes rares.

2 Introduction

La physique quantique a été développée au début du XXème siècle par les esprits les plus brillants de leur époque afin de donner un cadre théorique au comportement des objets à l'échelle atomique. Après plus d'un siècle, elle est, et reste, dans l'imaginaire collectif une science ardue, difficile à appréhender pour les néophytes et dont le formalisme mathématique complexe peut décourager. De plus, les concepts quantiques comme l'intrication ou la superposition d'états, développés et utilisés pour les atomes et les particules, ont de quoi déconcerter quand on les transpose à l'échelle macroscopique.

Les applications de la physique quantique sont très nombreuses : elle a permis l'avènement de l'électronique, des LEDs, des lasers, des systèmes d'imagerie médicale, etc.... Ainsi, nous utilisons tous les jours des objets qui ont été développés avec le concours de la physique quantique, la plupart du temps sans le savoir. Depuis quelques décennies, l'évolution des technologies a permis de passer un nouveau cap dans l'utilisation d'objets quantiques, que l'on peut maintenant créer et manipuler de façon unitaire. Ceci est à l'origine de nouvelles applications comme les capteurs quantiques, les communications quantiques ou encore le calcul quantique, sujet de ce rapport.

Depuis plusieurs années, **le calcul quantique est annoncé par certains comme la prochaine révolution**. Les calculateurs quantiques devraient permettre une accélération très significative de calculs complexes, ouvrant ainsi un nouveau champ des possibles dans de nombreux domaines : optimisation, modélisation et compréhension des phénomènes physiques ou chimiques, etc... **Cependant, les technologies existantes sont encore très jeunes, et beaucoup de verrous restent à surmonter**, ce qui nécessite des ressources en hommes et en capital considérables. La disponibilité de ces ressources repose en grande partie sur l'économie de la promesse : il faut faire régulièrement des annonces, clamer des avancées majeures, « faire le buzz », sous peine de voir les financements se tarir. Entre promesses marketing et réalités technologiques, il est souvent difficile pour les industriels d'avoir une vision globale et factuelle pour son domaine d'application des impacts à court, moyen et long terme du calcul quantique.

Fort de ce constat, **le CEA en collaboration avec Futuribles et 13 partenaires industriels ont lancé fin 2022 l'étude prospective Quantum 2042**. Pendant 1 an, les partenaires ont collaboré pour proposer et évaluer les différentes variables pertinentes, établir des jalons, définir des métriques et ébaucher 4 scénarios de futurs possibles. La version publique de cette étude a été présentée le 1 décembre 2023 à Paris², et le rapport public est disponible en téléchargement³.

² <https://yspot.fr/etude-quantum-2042/>

³ https://yspot.fr/wp-content/uploads/2024/04/rapport-public_quantum2042_numerique_avril2024.pdf

Les technologies quantiques évoluent très vite et sont susceptibles d'être disruptées par l'avènement de nouvelles découvertes ou de nouveaux acteurs. Aussi, **18 mois après la mise en ligne de Quantum 2042, il nous semble important de revoir certains aspects du rapport :**

- Faire un état des lieux de l'écosystème du calcul quantique
- Identifier les évolutions majeures des 18 derniers mois
- Revoir les jalons clés et les scénarios prospectifs pour juger de leur pertinence.

Ce document est le résultat du travail du Hub Quantique du CEA. Monté à l'issue de l'étude prospective, le Hub regroupe mi-2025 10 industriels et 6 « techno providers » qui travaillent en collaboration pour évaluer les impacts à court, moyen et long terme du calcul quantique.

3 Rappels des principaux résultats issus de Quantum 2042

Pour pouvoir profiter pleinement du contenu de ce rapport, il est fortement conseillé de relire l'étude initiale⁴. Il permettra au lecteur d'aller plus en profondeur sur certains sujets et de comprendre la sélection et l'orientation de cette mise à jour.

On trouvera dans les chapitres suivants quelques points clés issus de l'étude publique Quantum 2042.

3.1 Synthèse des messages clefs

A l'issue de l'étude Quantum 2042, nous avons sélectionné **23 messages clefs** que nous voulions mettre en avant, classés par grandes thématiques et non par ordre de priorité. Vous trouverez ci-dessous tableau synthétique de ces messages.

⁴ Ibid

	Messages	Synthèse
Messages généraux	Complémentarité avec le Calcul Classique	Le calcul quantique ne remplacera pas entièrement le calcul classique mais apportera des avantages pour certains problèmes spécifiques, notamment en optimisation ou simulation physique et chimique.
	Progrès Technologiques	Les avancées futures dépendront de l'augmentation du nombre de qubits et de la réduction du bruit, essentielles pour la correction d'erreurs et le passage à l'échelle
	Innovations en Calcul Classique	Le calcul quantique inspire déjà de nouvelles méthodes en calcul classique, notamment via les réseaux de tenseurs
	Préparation des Organisations	Les grandes organisations doivent se préparer aux cas d'usages quantiques dans les 5 à 10 prochaines années, en se basant sur les écosystèmes en développement ou à venir pour l'expérimentation
	Besoins en Main-d'œuvre	Des compétences spécifiques en hardware et software quantique seront nécessaires, ainsi que des compétences pour reformuler les cas d'usages
	Développement des Algorithmes	La disponibilité de matériels et de piles logicielles est cruciale pour accélérer le développement et la qualification des algorithmes quantiques
	Algorithmie Quantique	Des progrès en algorithmie quantique et dans la combinaison d'algorithmes classiques-quantiques sont nécessaires pour optimiser les applications potentielles.
	Démonstrations d'Avantages	Les premières démonstrations d'avantages pratiques (coût énergétique, précision des calculs, vitesse de traitement) des calculateurs quantiques sont en cours, mais restent rares et limitées.
Machines et Technologies	Machines FTQC	Les machines tolérantes aux erreurs avec un nombre significatif de qubits logiques sont indispensables pour traiter des problèmes industriels complexes.
	Défis Technologiques	De nombreux verrous technologiques doivent être levés, notamment l'augmentation du nombre de qubits, la correction d'erreurs, et le développement de chaînes de commandes efficaces
	Algorithmes sans QRAM	En l'absence de mémoire quantique, les algorithmes se concentreront sur des problèmes à forte intensité de calcul avec peu de données d'entrée
	Connectivité et Densité des Qubits	Certaines technologies de qubits seront limitées par la connectivité et la densité, nécessitant potentiellement l'interconnexion entre cœurs quantiques.
	Coexistence des Technologies	Différentes technologies de qubits coexisteront dans les prochaines années, sauf rupture scientifique majeure
	Consommation Énergétique	La consommation énergétique du calcul quantique pourrait être un avantage par rapport au calcul classique, mais pose des enjeux d'acceptabilité sociale.

	Messages	Synthèse
Passage au Stade Industriel	Éléments Clés pour l'Industrialisation	Le passage à l'échelle industrielle nécessite le développement d'algorithmes adaptés, la formation des ingénieurs, et la disponibilité d'émulateurs quantiques.
	Centres de Calcul Quantique	La création de centres de calcul quantique sponsorisés par les États est essentielle pour aller au-delà des outils en ligne proposés par les opérateurs globaux.
	Crédibilité des Feuilles de Route	Les feuilles de route des acteurs du quantique seront éprouvées dans les 5 prochaines années, avec des métriques de performance en développement
Cas d'Usages et Applications	Marchés de Déploiement	Les principaux marchés de déploiement incluent la finance, la chimie, la logistique, et potentiellement la santé
	Impacts Économiques	Les impacts économiques seront principalement liés à l'amélioration des performances et des processus, plutôt qu'à la disruption des modèles d'affaires
	Secteurs à Fort Impact	Les secteurs du biomédical, pharmaceutique, et de la chimie bénéficieront le plus des avancées en calcul quantique
Aspects Éthiques et Géopolitiques	Enjeux Éthiques	Les enjeux éthiques du calcul quantique sont similaires à ceux de l'IA et du HPC, sans nouveaux défis spécifiques
	Course au Calcul Quantique	Une compétition mondiale est en cours, avec des implications stratégiques majeures et des risques de confinement technologique
	Acceptabilité Sociale	Un travail pédagogique est nécessaire pour favoriser l'acceptabilité sociale du calcul quantique et répondre aux discours critiques

3.2 Les scénarios prospectifs de Quantum 2042 - Rappels

Pour l'étude, nous avons construit 4 scénarios prospectifs présentant des cônes de futurs possibles. **Les quatre scénarios se traduisent par différents jalons de performances des calculateurs** (nombre qubits, taux erreurs...) résultant de de la disponibilité, de la qualité et de la montée en échelle de plusieurs technologies habilitantes (chaîne de commandes, interconnexion, mémoire quantique...) hors rupture en algorithmie quantique.

Les chapitres suivants permettent de replacer les hypothèses et contraintes des différents scénarios.

3.2.1 Scenario1 : La porte étroite – Small NISQ & Analogique

En 2042, 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 est un échec**. 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.

Jalons techno-scientifiques :

- < 1000 qubits physiques bruités et intricables.
- Taux erreur 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
- La recherche algorithmique quantique stagne avec cercle vicieux d'impasses hardware-software

Applications et cas d'usages :

- NISQ pour problèmes de taille limitée, exploitant quelques algorithmes tolérants au bruit et de faible profondeur.
- 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 siège voyageurs), finance (évaluation risques clients...), pharma (préparation études cliniques et ordonnancement de batch)
- Préparation données ML et clustering à très petite échelle

3.2.2 Scénario 2 : Extension du Domaine du Quantique – Large NISQ & Analogique

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 significative 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...).

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. En 2042, il apparaît désormais 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.

Jalons techno-scientifiques :

- Analogique et NISQ « profonds » (<10 000 qubits)
- Taux erreur opération entre 2 qubits physiques compris entre 10^{-3} et 10^{-5}
- Progrès de la mitigation d'erreurs mais correction d'erreur non efficace
- Quelques dizaines de qubits logiques non utiles car trop bruités ou en nombre insuffisant
- Progrès de la chaîne de commande pour piloter des milliers de qubits physiques
- Meilleur couplage avec le HPC optimise la préparation de données

Applications et cas d'usages:

- NISQ sur des problèmes de petite taille, principalement heuristiques.
- Analogique profite des progrès du NISQ sur la connectivité, le contrôle des qubits, voire la mitigation d'erreurs et permet 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 planifié de plan 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

3.2.3 Scénario 3 : Les portes du quantiques sont ouvertes – *La suprématie quantique arrive*

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 : l'implantation de codes correcteurs permet la montée en échelle du nombre de qubits sans dégrader la fidélité des calculs.

Les potentialités des applications FTQC ne sont 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. La suprématie quantique est atteinte sur des cas d'usages à dimension pratique. 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 !

Jalons :

- Taux d'erreur 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'erreur
- Moins de 100 qubits logiques avec un taux d'erreur 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

Applications et cas d'usages :

- Les potentialités des algorithmes FTQC sont inégalement exploitées en raison d'un nombre de qubits logiques encore limité.
- La nature des problèmes traités varie peu par rapport au scénario 2, toutefois, l'avantage de vitesse du quantique s'exacerbe (jusqu'à super-polynomial) et suprématie quantique atteinte sur des cas d'usages à dimension pratique
- 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) ...
 - Simulation aérodynamique simple
 - Préparation données ML et clustering à grande échelle
 - Recherche fondamentale

3.2.4 Scénario 4 : Le saut quantique – En route vers le Very Large Scale Computing (VLSQ)

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, bien que les inerties temporelles pour le dépassement des verrous décrits dans ces scénarios et la montée en échelle de la production industrielle nécessaire au développement du VLSQ rendent peu probable l'atteinte de ce seuil 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.

Jalons :

- Plus de 100 qubits logiques avec un taux d'erreur 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 ouvre de nouvelles perspectives d'applications (Grover ...)

- 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.

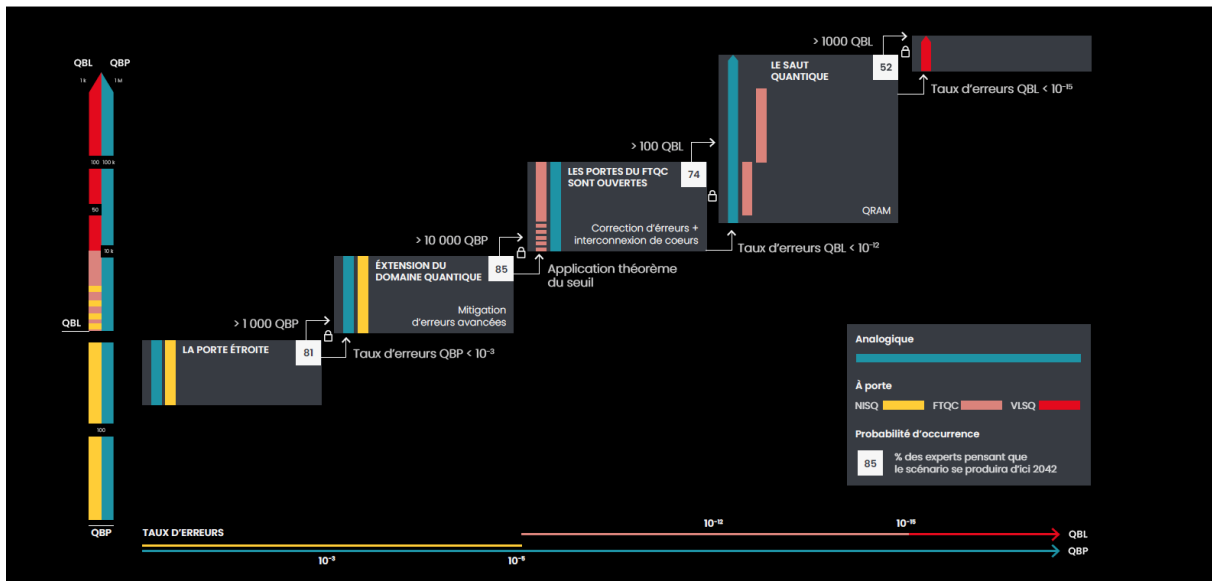
Potentiels en termes de calcul et avantages :

- 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- Marche aléatoire) ...
 - 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 connaît un grand développement
 - Recherche fondamentale

La résolution de problèmes de factorisation 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.

3.3 Synthèse graphique des scénarios prospectifs

DIAGRAMME DE SYNTHESE DES SCENARI (double page)



Légende 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'erreur 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'erreur des qubits physique n'est alors plus un facteur discriminant et n'est plus indiquée 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 1000 (1000 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. Lors de la rédaction en 2023 du rapport Quantum 2042, nous avons considéré un minimum de 40 qubits logiques pour avoir un avantage par rapport à la simulation. 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 affichée qui correspond à une enquête menée auprès de 26 experts du calcul quantique (liste en annexe)

3.4 Articulation entre les différents scénarios

Chaque scénario nécessite une rupture pour passer de l'un à l'autre. **Les différentes dynamiques de bascules entre scénarios sont symbolisées par des jalons et des ruptures technologiques nécessaires.** Dans le scénario 1 de la « Porte Etroite » ou l'analogique et le NISQ sont représentés, les verrous qui permettent de passer au scénario suivant sont la capacité à dépasser des cœurs quantiques à 1000 qubits physiques et d'avoir un taux d'erreur de ces qubits inférieur à 10^{-3} . Le scénario 2 « Extension du domaine du quantique » est considéré comme le plus vraisemblable à plus de 95% par l'ensemble des partenaires et experts ayant participé à l'étude. Le scénario 1 est considéré moins vraisemblable (81%) car certains experts disent que l'on est déjà très proche et sera sûrement dépassé d'ici 2042. C'est néanmoins une possibilité à ne pas écarter pour autant.

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 pertinent pour certaines applications de niches. **Cependant, 2 verrous majeurs** que sont la réussite de **la correction d'erreur et l'interconnexion de cœurs quantique ne sont pas levés.** On arrive dans ce scénario à réaliser des qubits logiques mais avec des taux d'erreurs tels qu'ils ne sont pas utilisables pour la majorité des problèmes.

L'avènement du scénario 3 repose sur le passage de ces 2 jalons : la correction d'erreur et l'interconnexion entre cœurs quantiques. Les progrès dans code de corrections d'erreurs combinés à une amélioration des taux d'erreur ($<10^{-5}$) et 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 qui est 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 (80%) 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 2026⁵.

Concernant le saut quantique, ce scénario 4 est jugé moins vraisemblable en 2042 par les participants et les experts de l'étude (40%). 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 de 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 au minimum 6000 qubits logiques.

⁵ Quera projette d'augmenter rapidement le nombre de qubits, visant plus de 3 000 qubits en 2025 et plus de 10 000 en 2026

3.5 Cadre d'analyse

L'étude prospective nous a permis de **définir un cadre** pour suivre les **différents points d'inflexions et jalons dans la mise en œuvre du calcul quantique**. La veille technologique au sein du Hub Quantique CEA se focalise donc sur différents critères que l'on peut regrouper en 3 catégories : matériel (hardware), logiciel bas niveau (middleware) et algorithmes (software).

3.5.1 Matériel - Hardware

Dans le domaine matériel, **le nombre du qubits** est souvent le critère majeur qui est mis en avant. Cependant, il est nécessaire de faire une analyse plus fine en intégrant les critères permettant d'évaluer la qualité des qubits :

- **La fidélité** des qubits : celle-ci doit être considérée dans son intégralité depuis l'écriture des données, les opérations entre qubits et la lecture des résultats.
- **Le temps de cohérence** des qubits : c'est le temps pendant lequel les qubits sont opérationnels avant de perdre leur information quantique.

Ces critères permettent d'évaluer la capacité pour une technologie de pouvoir appliquer le nombre de portes nécessaires pour l'exécution d'un algorithme sans erreurs faisant diverger les résultats.

Au-delà de ces critères clés, d'autres jalons matériels sont aussi à surveiller sur le moyen-long terme :

- Pour permettre de dépasser des limitations physiques et/ou industriels de certaines technologies, **la communication entre cœurs quantiques** sera nécessaire pour augmenter les capacités de calculs des QPU.
- A moyen terme, la mise au point d'une **mémoire quantique** semble nécessaire pour permettre de « stocker » l'information quantique et ainsi passer par-delà les limites algorithmiques actuelles.

3.5.2 Logiciel bas niveau – Middleware

Malgré la progression des technologies matériels, les qubits sont et seront toujours intrinsèquement sensibles aux perturbations extérieures, ce qui limite les applications pratiques des ordinateurs quantiques.

C'est pour cela qu'un des axes de recherche majeurs est la mise au point de **code correcteurs d'erreurs quantiques**. L'objectif en implémentant ces codes est de créer et opérer des **qubits logiques**, dont la fidélité et le temps de cohérence seraient améliorés de plusieurs ordres de grandeurs par rapports à aux qubits physiques qui les constituent.

Ces codes doivent cependant tenir compte des spécificités de chaque technologie, afin d'être efficace et rapide tout en limitant le nombre de qubits supplémentaires nécessaires pour la correction (qubits ancillaires). Le nombre de qubits physique nécessaire pour générer un qubit

logique, généralement nommé **overhead**, est aujourd'hui un point clé déterminant pour évaluer la scalabilité des ordinateurs quantiques.

3.5.3 Algorithmes – Software

Lors de l'étude Quantum 2042, nous avons décidé de mettre de côté les progrès à venir de l'algorithmie quantique pour l'élaboration de nos scénarios : il ne nous paraissait pas possible de pouvoir évaluer ces progrès dans un cadre prospectif.

Cependant, dans le cadre d'une veille active, il est intéressant de regarder les évolutions et les améliorations en algorithmie quantique. Nous devons ainsi suivre plusieurs tendances :

- Le **développement des algorithmes hybrides classiques – quantiques**
- L'**amélioration des algorithmes existants**
- Le **développement de nouveaux algorithmes**

En contre point, il est aussi intéressant de suivre les progrès en cours sur les **algorithmes classiques concurrents des algorithmes quantiques**, par exemple les réseaux de tenseurs.

4 Evolution des Jalons prospectifs 2024 – 2025

4.1 Méthodes & sources d'informations

La sélection d'informations présentée dans les chapitres suivants est le **résultat du travail des partenaires du Hub Quantique**, avec pour objectif de suivre les évolutions qui semblent pertinentes au regard de l'étude Quantum 2042 initiale. **Elle n'a donc pas pour but d'être exhaustive**, et ne doit être considérée que comme **une approche informative sur les évolutions de certains paramètres clés**.

L'**identification des informations** est principalement basée sur le travail et le partage de particuliers que nous pouvons qualifier « **Leader d'opinion** » ou « **vulgarisateur quantiques** ». Ces personnes publient régulièrement leurs recherches et analyses sur LinkedIn ou lors de conférences. Ces échanges facilitent grandement la tâche des personnes travaillant dans le domaine. Les rédacteurs de ce rapport tiennent à remercier toutes ces personnes qui donnent de leur temps et de leurs compétences pour faire progresser le domaine du calcul quantique. En voici une liste non exhaustive :

- Olivier Ezratty : <https://www.linkedin.com/in/ezratty/>
- Laurent Prost (Alice&Bob) : <https://www.linkedin.com/in/laurent-prost-product-manager/>
- Pierre Jaeger (IBM) : <https://www.linkedin.com/in/pierrejaeger/>
- Frédéric Barbaresco (Thales) : <https://www.linkedin.com/in/barbaresco/>
- Daniel Vert (Systematic) : <https://www.linkedin.com/in/daniel-vert/>
- Michaela Eichinger (Quantum Machines) : <https://www.linkedin.com/in/michaela-eichinger/>
- Michel Kurek (Multiverse Computing) : <https://www.linkedin.com/in/michelkurek/>
- John Preskill (CalTech) : <https://www.linkedin.com/in/john-preskill-154abab3/>
- Alain Champenois (Quobly) : <https://www.linkedin.com/in/alainchampenois/>
- Jay Gambetta (IBM) : <https://www.linkedin.com/in/jay-gambetta-a274753a/>
- Lorenzo Leandro (Quantum Machine) : <https://www.linkedin.com/in/lorenzoleandro/>

En plus des sociétés directement impliquées dans le développement du calcul quantique, **des canaux d'informations spécifiques sur le quantique sont accessibles** via LinkedIn ou via des blogs spécifiques. En voici quelques exemples :

- The Quantum Insider : <https://www.linkedin.com/company/the-quantum-insider/posts/?feedView=all>
- Quantum Zeitgeist : <https://www.linkedin.com/company/quantumzeitgeist/>
- Quantum's Business : <https://brianlenahan.substack.com/>
- Quantum Pirates : <https://quantumpirates.substack.com/>

L'ensemble de ces sources permettent d'avoir une vue relativement complète de l'écosystème et des derniers développements dans le domaine du calcul quantique. De plus, **des analyses critiques des différentes publications sont régulièrement proposées**, permettant d'avoir un éclairage le plus pertinent possible, allant au-delà des effets d'annonces.

4.2 Technologies de Qubits

Plusieurs technologies de qubits sont aujourd’hui développées par les instituts de recherches et implémentées par les fabricants de QPU. Ces technologies ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Dans le tableau suivant issu de la version 2024 de « Understanding Quantum Technologies »⁶, on trouvera un récapitulatif des caractéristiques clés des principaux types de qubits.

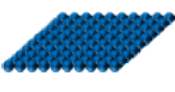
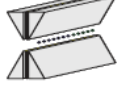
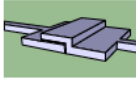
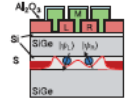
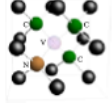
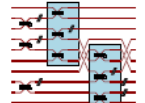
	atoms		electrons superconducting & spins			photons
						
	cold atoms	trapped ions	superconducting	silicon	NV centers	photons
qubit size	about 1 μm space between atoms	about 1 μm space between atoms	(100 μm) ²	(100nm) ²	<(100nm) ²	nanophotonics waveguides lengths, MZI, PBS, etc
best two qubits gates fidelities	99.5% (QuEra)	99.84% (56 q, Quantinuum)	99.68% (IBM Heron r2)	>99% (SiGe)	99.2%	99% (but probabilistic)
best readout fidelity	97%	99.99%	99.4%	99% (SiGe)	98%	89% (efficiency)
best gate time	\approx 1 ns	0.1 to 4 μs	20 ns to 300 ns	\approx 5 μs	10-700 ns	<1 ns
best T ₁	> 1 s	0,2s-10mn	100-400 μs	20-120 μs	2.4 ms	∞ & time of flight
qubits temperature	< 1mK 4K for vacuum pump	<1mK 4K cryostat	15mK dilution cryostat	100mK-1K dilution cryostat	4K to RT	1.8K-4K for photons gen. & det.
operational qubits	1,600 (Infleqtion)	56 (Quantinuum)	156 (IBM) 72 (China)	12 (Intel) in SiGe	5 (Quantum Brilliance)-10	216 modes GBS (Xanadu)
scalability	up to 10,000s per QPU	1000s, with multiple traps	<1,000 per chip	potentially millions	unknown	100s-1M in multiple circuits

Figure 1 : Tableau récapitulatif des différents types de qubits et de leurs caractéristiques principales⁷.

Dans les chapitres suivants, nous présentons une sélection non exhaustive d’annonces et de résultats scientifiques qui nous paraissent pertinentes au regard de l’évolution des différentes technologies.

4.2.1 Supraconducteurs

Les qubits supraconducteurs utilisent des circuits en matériaux supraconducteurs, comme l’aluminium ou le niobium, refroidis à des températures extrêmement basses. Ces circuits exploitent des phénomènes quantiques tels que l’effet Josephson pour créer et manipuler des qubits. Il existe plusieurs types de qubits supraconducteurs, dont les plus connus sont :

- Transmons : les plus utilisés, offrant un bon compromis entre stabilité et contrôlabilité.
- Qubits à flux : basés sur la direction du courant dans une boucle supraconductrice.
- Qubits à charge : sensibles au nombre de paires de Cooper (électrons liés) sur une île supraconductrice.

⁶ <https://www.oezratty.net/wordpress/2024/understanding-quantum-technologies-2024/>

⁷ Ibid

Les qubits à base de supraconducteurs sont les plus anciens et donc les plus « matures » à l’aune des autres technologies. C’est la voie de recherche privilégiée par de nombreux acteurs du secteur.

4.2.1.1 IBM

IBM a été l’un des premiers acteurs industriels à s’engager dans le développement du calcul quantique, en structurant sa stratégie autour de la plateforme IBM Quantum lancée en 2016. Cette initiative regroupe à la fois des efforts de recherche fondamentale, la fabrication de processeurs quantiques à base de qubits supraconducteurs et la mise à disposition de machines via le cloud.

La roadmap d’IBM Quantum⁸ est un indicateur très observé de l’avancement général de la technologie quantique. Mise à jour régulièrement, elle n’a pas été mise en défaut pour le moment. La société est assez ouverte sur ses développements et publie régulièrement les avancées de ses recherches⁹.

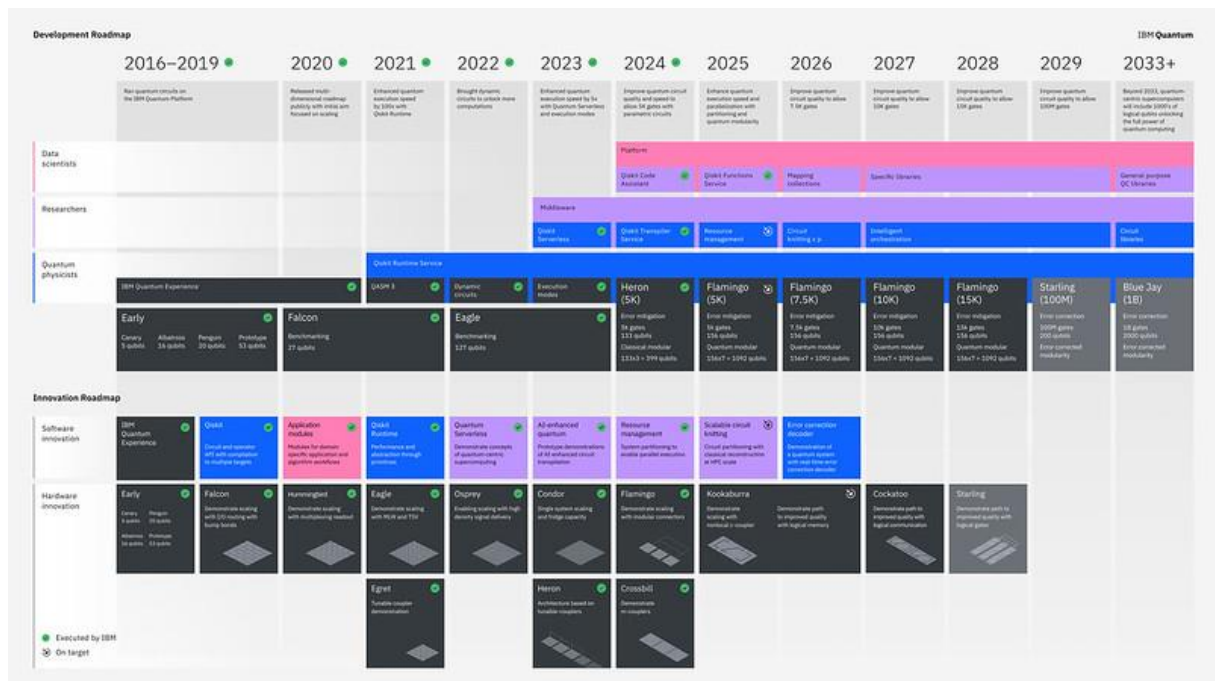


Figure 2 : Roadmap d’IBM Quantum (Mai 2025). Source : IBM

En décembre 2023, l’entreprise a annoncé la réalisation de la puce Condor avec le nombre record de 1121 qubits, succédant à Osprey et ses 433 qubits. Cela a permis à IBM de montrer la faisabilité d’implanter et de contrôler une densité importante de qubits supraconducteurs sur une seule puce.

Cependant, la fidélité des qubits du Condor est resté au niveau de la puce Osprey, au-dessus du seuil utilisable pour l’implantation de Qubits logique. Ce QPU n’est pas aujourd’hui accessible pour faire des calculs via le cloud d’IBM..

⁸ https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/53347055153/

⁹ <https://arxiv.org/pdf/2410.00916v1>

En avril 2025, la puce la plus avancée d'IBM accessible pour les clients est la **Heron R2 de 156 Qubits** avec un taux d'erreurs sur les opérations à 2 Qubits de l'ordre de $1 \text{ à } 5.10^{-3}$. Elle succède au Heron R1 de 133 qubits.

ibm_aachen QPU status: ● Online Processor type: Heron r2 Qubits: 156 2Q error (best/layered): $1.01e-3/3.11e-3$ CLOPS: 250K	ibm_marrakesh QPU status: ● Online Processor type: Heron r2 Qubits: 156 2Q error (best/layered): $1.55e-3/3.42e-3$ CLOPS: 195K	ibm_fez QPU status: ● Online Processor type: Heron r2 Qubits: 156 2Q error (best/layered): $2.24e-3/5.14e-3$ CLOPS: 195K
ibm_kingston QPU status: ● Online Processor type: Heron r2 Qubits: 156 2Q error (best/layered): $1.19e-3/5.42e-3$ CLOPS: 250K	ibm_torino QPU status: ● Online Processor type: Heron r1 Qubits: 133 2Q error (best/layered): $1.62e-3/7.09e-3$ CLOPS: 210K	ibm_sherbrooke QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3 Qubits: 127 2Q error (best/layered): $3.44e-3/1.45e-2$ CLOPS: 150K

Figure 3 : Capture d'écran de l'états des QPUs Heron d'IBM au 22/04/2025.

Source : <https://quantum.ibm.com/services/resources>

Le 21 mai 2025, IBM a annoncé sur LinkedIn le lancement d'ibm_pittsburgh, la **version R3 de Heron¹⁰**. Cette amélioration incrémentale de la version R2 présenterait un **taux d'erreur encore plus faible** de l'ordre de 5.10^{-4} pour une opération à 2 qubits.

ibm_pittsburgh			
Details			
Qubits	2Q error (best)	2Q error (layered)	CLOPS
156	$5.19e-4$	$3.20e-3$	N/A
Status: ● Online	Region: us-east	Processor type ⓘ: Heron r2	Version: 1.0.0
Total pending workloads: 0 jobs	Your instance usage: 0 jobs	Basis gates: CZ, ID, RZ, SX, X	Median CZ error: $1.727e-3$
Median SX error: $1.515e-4$	Median readout error: $3.550e-3$	Median T1: 295.81 us	Median T2: 372.59 us

Figure 4 : Information sur le QPU ibm_pittsburgh.

Source : post LinkedIn de Jay Gambetta,

4.2.1.2 D-Wave

Fondée en 1999 à Burnaby, au Canada, D-Wave Systems¹¹ est reconnue comme la première entreprise à avoir commercialisé un ordinateur quantique. En 2011, elle a lancé le D-Wave One, un système de 128 qubits, suivi en 2013 du D-Wave Two à 512 qubits. La société a continué à développer ses systèmes, introduisant le D-Wave 2000Q en 2017, puis l'Advantage

¹⁰ https://www.linkedin.com/posts/jay-gambetta-a274753a_ibmqquantum-quantumcomputing-activity-7330779528195100672-1TCl?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAAA2q0cBDWCbk4AWHUVvX267a9B9H0KURt6M

¹¹ <https://www.dwavequantum.com/>

en 2020, et enfin l'Advantage2, son système le plus performant à ce jour, regroupant plus de 4400 qubits supraconducteurs organisés selon une architecture spécifique fixe. Ces systèmes quantiques sont accessibles via une plateforme cloud appelée « the Leap »¹².

D-Wave s'appuie sur la technologie de « recuit quantique » (quantum annealing), une approche analogique visant à résoudre des problèmes d'optimisation en exploitant les propriétés intrinsèques de la mécanique quantique. Il faut noter que le recuit quantique est applicable pour de nombreux problèmes, en particulier en optimisation. Cependant, il ne constitue pas une solution universelle.

En mars 2025, **D-Wave a annoncé** avoir atteint une étape importante en **démontrant un « avantage quantique »** en résolvant un problème de simulation de verre de spins en 20 minutes, une tâche qui aurait d'après eux pris près d'un million d'années à un supercalculateur classique¹³. **Cependant, ces affirmations ne sont pas aujourd'hui considérées comme pertinentes** par plusieurs scientifiques et groupes de recherches, qui ont résolu le même problème avec une approche à base de réseau de tenseurs en quelques heures.¹⁴¹⁵¹⁶.

En mars 2025, D-Wave a annoncé que le Jülich Supercomputing Centre en Allemagne est devenu le premier centre HPC à acheter un système quantique Advantage¹⁷.



Figure 5 : D-Wave Advantage System. Source : D-Wave.

¹² <https://www.dwavequantum.com/solutions-and-products/cloud-platform/>

¹³ <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.ado6285>

¹⁴ <https://arxiv.org/abs/2503.05693>

¹⁵ <https://medium.com/quantum-decoder/quantum-computing-in-early-2025-big-claims-bigger-checks-73b7b28c0b1c>

¹⁶ <https://www.newscientist.com/article/2471426-doubts-cast-over-d-waves-claim-of-quantum-computer-supremacy/>

¹⁷ <https://www.dwavequantum.com/company/newsroom/press-release/forschungszentrum-j%C3%BClich-purchases-d-wave-quantum-computer-becoming-first-high-performance-computing-center-in-the-world-to-own-d-wave-s-advantage-system/>

4.2.1.3 Google

La division quantique de Google, connue sous le nom de Google Quantum AI, a été lancée en 2013 avec pour objectif de développer un ordinateur quantique universel tolérant aux erreurs. Basée au sein du laboratoire de Google à Santa Barbara, cette unité s'appuie sur une architecture de qubits supraconducteurs transmons et sur une approche intégrée allant de la fabrication des puces jusqu'aux algorithmes.

En 2019, Google avait fait grand bruit en annonçant **la suprématie quantique avec sa puce Sycamore de 53 Qubits**¹⁸. Cette annonce avait été par la suite **battue en brèche par de nombreux experts**¹⁹ : il a été montré par la suite que des calculateurs classiques, via des algorithmes optimisés de réseaux de tenseurs, peuvent simuler le type de circuits utilisés dans Sycamore en temps réaliste, remettant en question la portée de la revendication initiale ²⁰²¹.

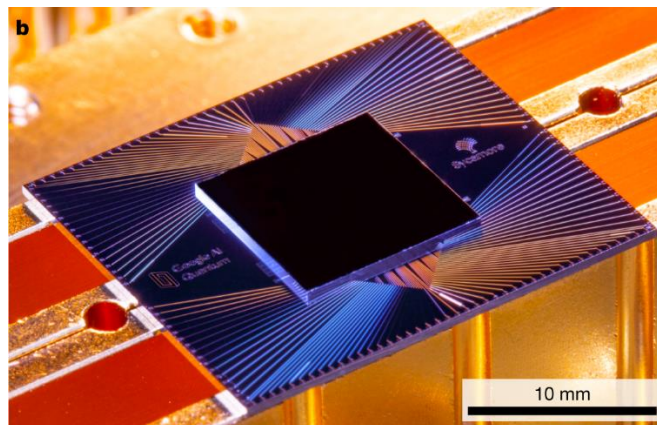


Figure 6 : le processeur Sycamore de Google.

Source : <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>

En Novembre 2024, Google a annoncé en 2024 **un nouveau processeur nommé Willow**²². Ce QPU propose **105 Qubits supraconducteurs** connecté en un réseau rectangulaire. Dans le communiqué de presse, Google a proclamé que **cette puce permettait de résoudre un problème qui aurait pris 10²⁵ années sur un ordinateur classique**. Cette revendication a une fois encore généré un emballement médiatique très important, que **plusieurs articles et discussions de spécialistes ont tempéré**, mettant en évidence le très long chemin qui reste à parcourir avant d'avoir un ordinateur quantique tolérant aux fautes (FTQC) utile et fonctionnel²³.

Il faut cependant noter que **cette puce présente un taux d'erreurs des qubits physiques significativement réduit** par rapport à la génération précédente, ce qui **a permis d'implémenter une solution de qubits logiques** en appliquant un code de surface (plus de détail dans le chapitre Correction d'erreurs).

¹⁸ <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>

¹⁹ <https://arxiv.org/pdf/2305.01064>

²⁰ <https://www.oezratty.net/wordpress/2021/limites-calcul-quantique-selon-xavier-waintal/>

²¹ <https://journals.aps.org/prx/pdf/10.1103/PhysRevX.10.041038>

²² <https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip/>

²³ <https://www.oezratty.net/wordpress/2024/inside-google-willow/>

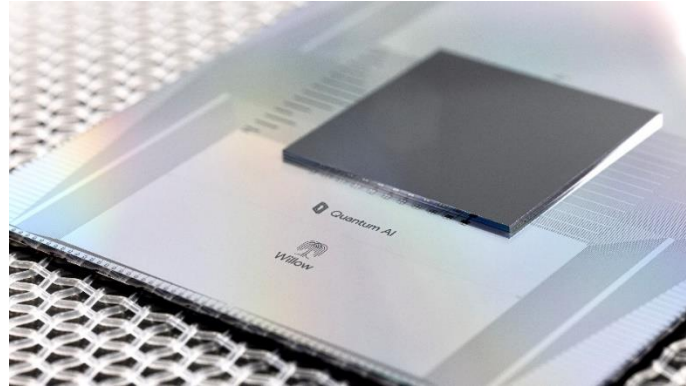


Figure 7 : le processeur Willow. Source : Google.

4.2.1.4 Rigetti

Fondée en 2013 par le physicien Chad Rigetti, ancien chercheur chez IBM, Rigetti Computing²⁴ est une entreprise basée à Berkeley, en Californie, spécialisée dans le développement de processeurs quantiques supraconducteurs et de systèmes quantiques complets.

L'entreprise conçoit et fabrique ses propres puces quantiques dans son usine Fab-1, la première installation dédiée à la fabrication de dispositifs quantiques intégrés. En décembre 2024, Rigetti a annoncé que son **système Ankaa-3 à 84 qubits** avait atteint une **fidélité médiane de 99,5 % pour les portes quantiques à deux qubits**, réduisant ainsi de moitié les taux d'erreur par rapport à l'année précédente. Le système est disponible sur la plateforme Rigetti Quantum Cloud Services (QCS®) et sera accessible via Amazon Braket et Microsoft Azure au premier trimestre 2025

4.2.1.5 IQM

Fondée en 2019 en tant que spin-off de l'Université Aalto et du Centre de recherche technique VTT de Finlande, IQM Quantum Computers²⁵ est une entreprise européenne spécialisée dans la conception et la fabrication de calculateurs quantiques à base de circuits supraconducteurs. IQM adopte une approche « full-stack », intégrant la conception des processeurs quantiques, le contrôle électronique et les logiciels associés.

Elle propose une gamme de systèmes quantiques allant de 5 à 150 qubits, destinés aux centres de recherche, aux supercalculateurs et aux entreprises. Elle a annoncé en Juillet 2024 la mise au point de **Qubits supraconducteurs avec une fidélité de 99.9 % et un temps de cohérence de l'ordre de 1 ms**²⁶.

²⁴ <https://www.rigetti.com/>

²⁵ <https://meetiqm.com/>

²⁶ <https://meetiqm.com/press-releases/iqm-quantum-computers-achieves-new-technology-milestones-with-99-9-2-qubit-gate-fidelity-and-1-millisecond-coherence-time/>

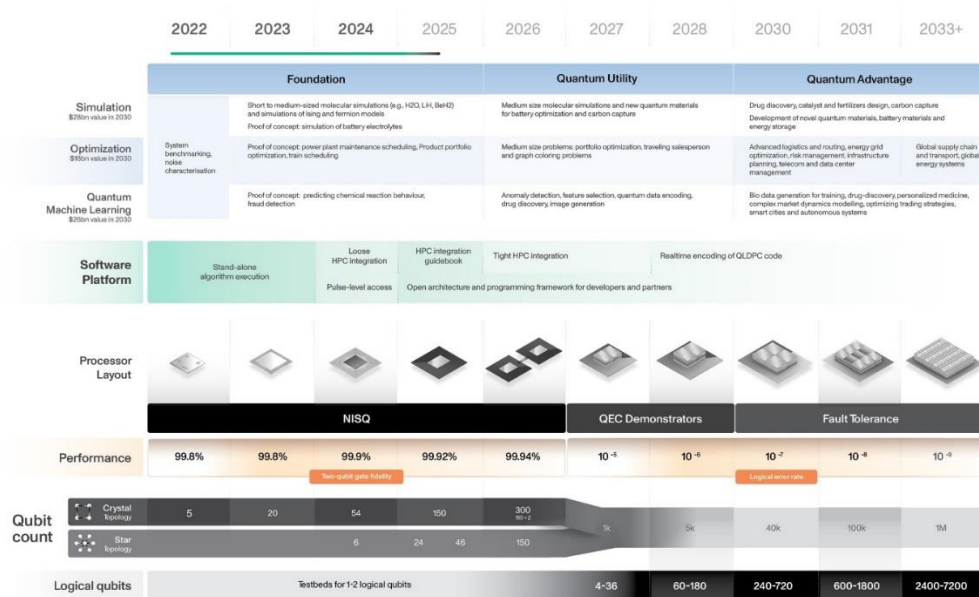


Figure 8 : Roadmap d'IQM (Mai 2025). Source : IQM

C'est un compétiteur sérieux face aux géants américains, et plusieurs sociétés collaborent avec IQM pour leur développement quantique. En France, Eviden s'est ainsi équipé en octobre 2024 d'une machine IQM Spark de 5 Qubits sur leur site d'Angers²⁷.

4.2.1.6 Amazon - AWS

La division quantique d'Amazon, intégrée à Amazon Web Services (AWS), s'articule autour de plusieurs initiatives visant à faciliter l'accès au calcul quantique et à développer des technologies propriétaires. Le service Amazon Braket, lancé en 2020, permet aux utilisateurs d'exécuter des algorithmes sur divers matériels quantiques, incluant des processeurs à qubits supraconducteurs, à ions piégés et à atomes neutres, fournis par des partenaires tels que Rigetti, IonQ et QuEra.

En Février 2025, AWS a annoncé la mise au point de la **puce Ocelot**, sa première puce quantique interne, en collaboration avec l'institut de Technologie de Californie²⁸. Cette puce est **un assemblage hybride de 14 qubits supraconducteurs** de 2 types : des qubits dit « de chat », dont le taux d'erreur d'inversion de phase (bit flip) est significativement réduit, et des qubits transmons classiques pour la stabilisation des données et la correction d'erreur. L'idée est de proposer des systèmes de corrections d'erreurs plus simples à mettre en œuvre. Nous reviendrons dans le chapitre Correction d'erreur sur les performances affichées de cette puce.

²⁷<https://meetiqm.com/press-releases/eviden-drives-quantum-adoption-with-installation-of-igq-spark-quantum-computer/>

²⁸<https://www.aboutamazon.com/news/aws/quantum-computing-aws-ocelot-chip>

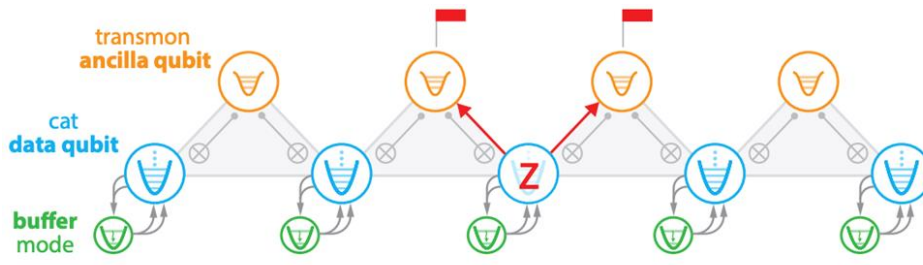


Figure 9 : Schéma d'implémentation des qubits de la puce Ocelot d'AWS.
 Source : <https://www.nature.com/articles/s41586-025-08642-7>

4.2.1.7 Alice & Bob

Alice & Bob est une start-up française fondée en 2020, spécialisée dans le développement de technologies quantiques, sur la base des Qubits dit « de chat », des qubits supraconducteurs dont l'erreur d'inversion de phase est significativement réduite. Cette approche doit permettre d'implémenter des codes correcteurs d'erreurs plus compacts et donc de limiter le nombre de Qubits physiques nécessaires pour mettre en œuvre un qubit logique. Le nom de l'entreprise est inspiré des deux protagonistes les plus souvent utilisés en cryptologie, Alice et Bob.

En Décembre 2024, Alice & Bob a publié un livre blanc très complet intégrant leur feuille de route pour le développement du FTQC²⁹.

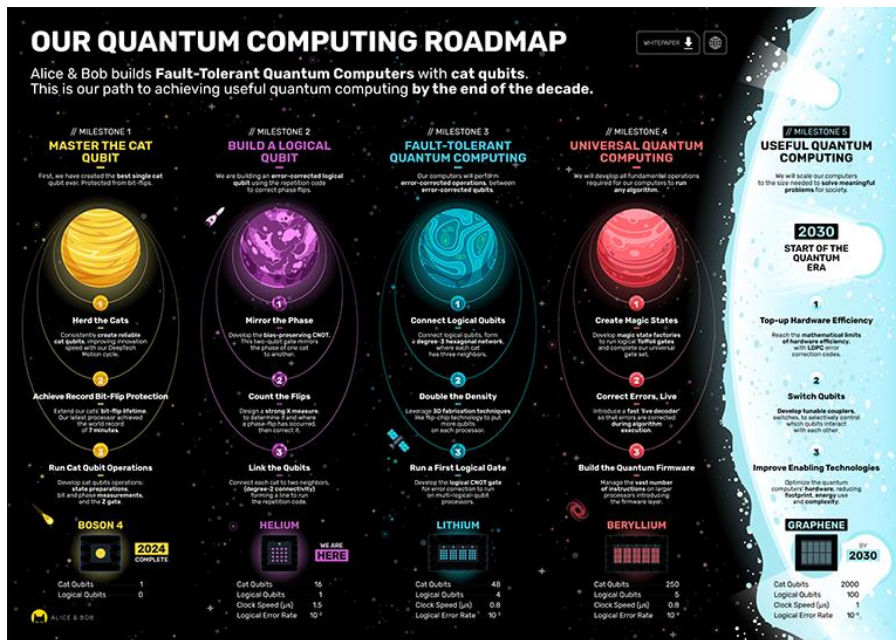


Figure 10 : Roadmap d'Alice & Bob – Décembre 2024.
 Source : Alice & Bob

Ils ont aussi annoncé le prototype de puce quantique Helium 1 avec 16 Qubits de chats³⁰ pour expérimenter la mise en œuvre d'un qubit logique.

²⁹ <https://alice-bob.com/wp-content/uploads/2024/12/Think-Inside-The-Box-Alice-Bob-Whitepaper.pdf>

³⁰ <https://alice-bob.com/newsroom/alice-bob-new-helium-1-quantum-processor/>

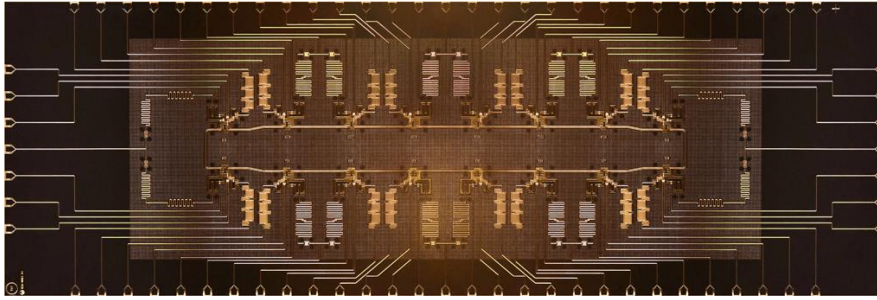


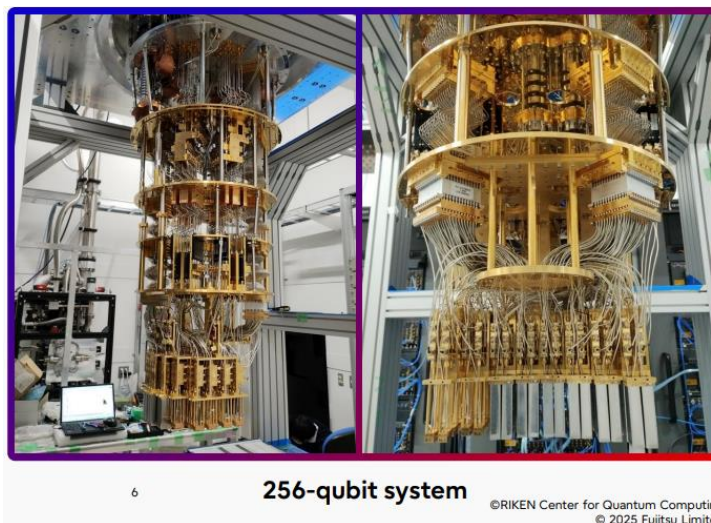
Figure 11 : Puce Helium 3 à 16 Qubits de Alice & Bob.

Source : <https://alice-bob.com/wp-content/uploads/2024/12/Think-Inside-The-Box-Alice-Bob-Whitepaper.pdf>

4.2.1.8 Autres acteurs

Le calcul quantique est un domaine considéré comme stratégique. Aussi, sous l'impulsion de programme d'état, de nombreux acteurs émergent, en particulier en Asie.

Pour citer quelques exemples, **Fujitsu et RIKEN** ont lancé en Avril 2025 un processeur de **256 Qubits supraconducteurs**³¹, le plus puissant à date au Japon. Cependant, aucune information sur les spécifications des Qubits n'a été partagée à ce jour, laissant présager une fidélité probablement trop faible pour avoir une utilité autre que la démonstration technologique. L'objectif affiché pour Fujitsu est d'avoir un processeur fonctionnel à plus de 1000 Qubits en 2026.



6

256-qubit system

©RIKEN Center for Quantum Computing
© 2025 Fujitsu Limited

Figure 12 : Photo du QPU à 256 Qubits de Fujitsu.

Source : <https://www.fujitsu.com/global/imagesgig5/20250422-01f.pdf>

En Chine, les universités de Hefei, Shanghai, Xi'an et Beijing ont collaboré avec la société Quantum CTEK de Hefei pour la mise au point de la **puce Zuchongzhi 3.0**³². Annoncée en Décembre 2024, cette puce de **105 Qubits supraconducteurs** présente une **fidélité à 1 qubits**

³¹ <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2025/0422-01.html>

³² <https://arxiv.org/abs/2412.11924>

de 99.9% et de 99.62% pour les opérations à 2 Qubits. Ces performances sont comparables à celles de la puce Willow de Google.

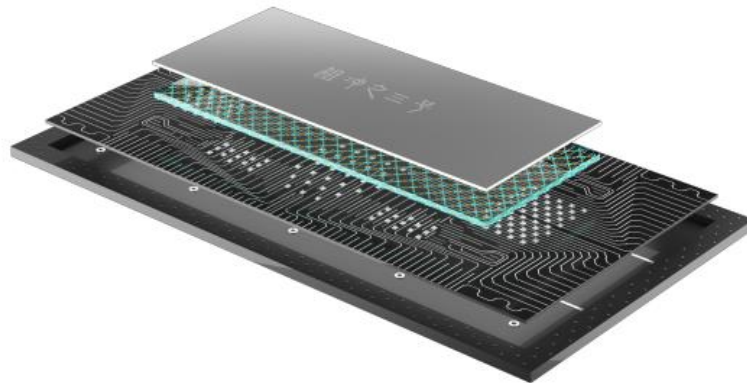


Figure 13 : Illustration du processeur Quantique Zuchongzhi 3.0. Source : <https://arxiv.org/pdf/2412.11924>

Il est à souligner que les performances annoncées n'ont pas été confirmées et sont donc sujettes à caution.

4.2.2 Ions piégés

La technologie des ions piégés utilise des ions (atomes ou molécules chargés) confinés dans des pièges électromagnétiques sous vide pour créer des Qubits. Ces ions sont manipulés par des lasers ou des champs électromagnétiques pour réaliser des opérations quantiques.

Cette technologie a pour avantage la stabilité et la longue durée de cohérence des qubits.

4.2.2.1 Quantinuum

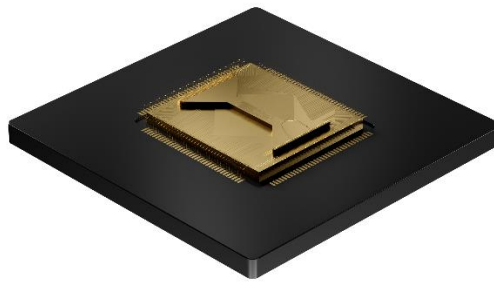
Quantinuum³³ est une entreprise spécialisée dans le calcul quantique, née en 2021 de la fusion de Cambridge Quantum et Honeywell Quantum Solutions. Cette intégration a donné naissance à une plateforme quantique complète, combinant les technologies de piégeage d'ions de Honeywell avec l'expertise logicielle de Cambridge Quantum.

Quantinuum utilise une architecture de qubits à base d'ions piégés pour ses processeurs quantiques. En avril 2024, la société a annoncé l'amélioration de son **système H2-1**³⁴. Ce **processeur de 56 Qubit** permet de connecter les qubits arbitrairement entre eux, et permet de réaliser des opérations avec **une très grande fidélité : 99.997% pour les opérations à 1 porte**, et supérieure à **99.84% pour celles à 2 portes**³⁵.

³³ <https://www.quantinuum.com/>

³⁴ <https://www.quantinuum.com/products-solutions/quantinuum-systems/system-model-h2>

³⁵ <https://arxiv.org/pdf/2406.02501>



**Figure 14 : la puce H2.
Source : Quantinuum³⁶**

En septembre 2025, Quantinuum a annoncé une levée de fonds de 600 M\$, valorisant la société à 10 Mds\$. Parmi les investisseurs, on peut noter la présence de NVentures, la branche capital-risque de NVidia.

4.2.2.2 Ion Q

Fondée en 2015 par les physiciens Christopher Monroe (Université du Maryland) et Jungsang Kim (Université Duke), IonQ³⁷ est une entreprise spécialisée dans le développement de technologies de calcul quantique basée sur les ions piégés de Barium. La société propose l'accès à ses **systèmes quantiques de 25 et 36 Qubits**³⁸ via des plateformes cloud telles qu'Amazon Braket, Microsoft Azure et Google Cloud.

En 2021, IonQ est devenue la première entreprise de calcul quantique à entrer en bourse via une fusion avec une société d'acquisition à vocation spécifique (SPAC), marquant une étape importante dans la reconnaissance publique et financière de cette technologie émergente. En 2025, elle a réalisé des acquisitions stratégiques majeures comme Oxford Ionics, société britannique qui détient le record mondial actuel de fidélité quantique, ou Vector Atomico, société spécialisée dans les capteurs quantiques.

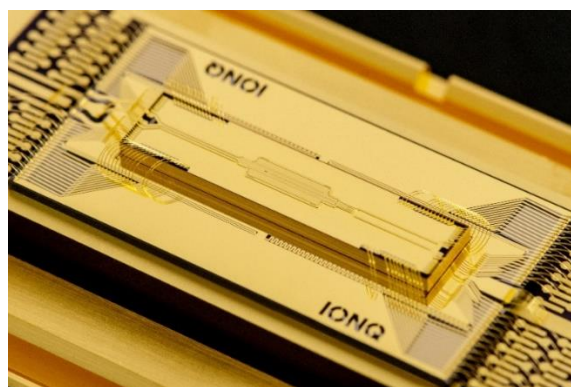


Figure 15 : Puce à base d'ions piégés d'IonQ. Source : IonQ.

³⁶ https://docs.quantinuum.com/systems/data_sheets/Quantinuum%20H2%20Product%20Data%20Sheet.pdf

³⁷ <https://ionq.com/>

³⁸ <https://ionq.com/quantum-systems/compare>

4.2.3 Atomes froids ou neutres

La technologie de qubits à base d'atomes neutres repose sur le piégeage et la manipulation d'atomes individuels à l'aide de lasers. Ces atomes, électriquement neutres, sont refroidis à des températures proches du zéro absolu par laser puis disposés en réseaux réguliers grâce à des « pinces optiques ». Les interactions entre atomes sont contrôlées par des impulsions laser précises, permettant d'exécuter des opérations logiques quantiques.

Comme pour la technologie des ions piégés, les qubits à base d'atomes neutres présentent une grande stabilité et une longue durée de cohérence des qubits.

4.2.3.1 Pasqal :

Pasqal³⁹ est une start-up française fondée en 2019 par Georges-Olivier Reymond et d'autres experts en technologie quantique issus de l'Institut d'Optique, dont le prix Nobel de physique Alain Aspect. L'entreprise se concentre sur la création d'ordinateurs quantiques utilisant des atomes neutres de rubidium.

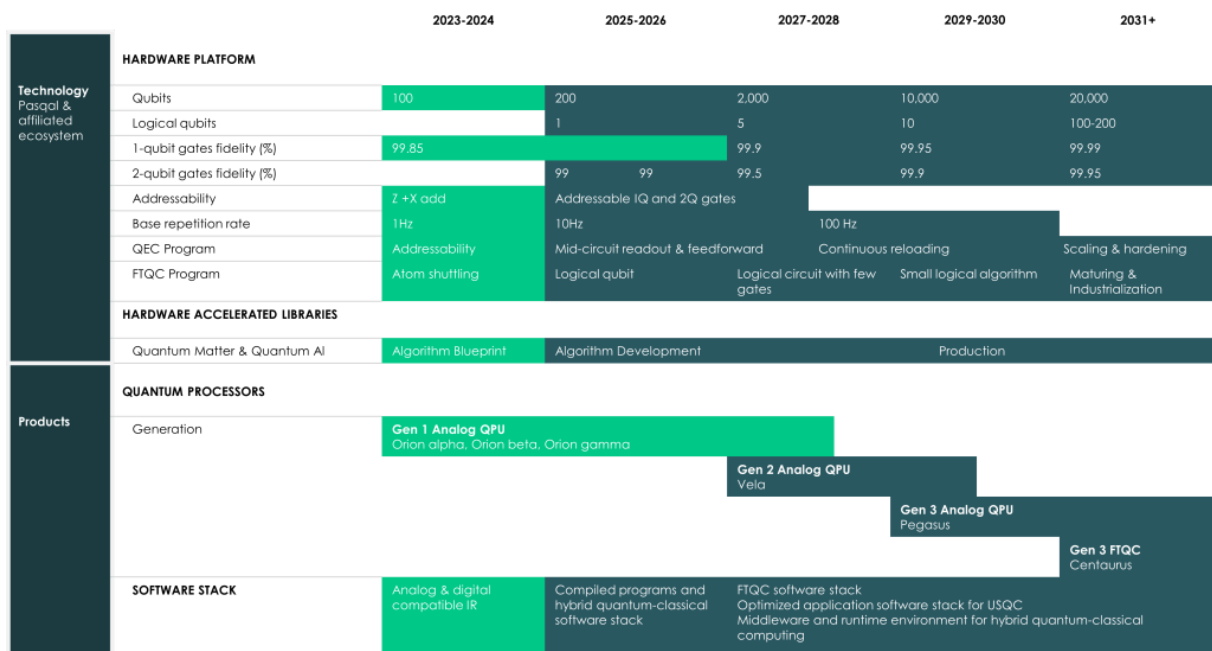


Figure 16 : Roadmap de Pasqal .

Source : Site de Pasqal, Avril 2025

La société a déjà vendu plusieurs ordinateurs quantiques dans le monde. Elle a livré en septembre 2024 un ordinateur quantique de plus de 100 qubits au Très Grand Centre de Calcul du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) à Saclay, destiné à être couplé au supercalculateur Joliot-Curie⁴⁰. Ce QPU, nommé Ruby, est en cours d'intégration et est capable à ce jour de piloter 35 qubits⁴¹.

³⁹ <https://www.pasqal.com/fr/>

⁴⁰ <https://www.pasqal.com/fr/newsroom/first-gpu-delivered-by-pasqal-to-genci-and-cea/>

⁴¹ <https://www.pasqal.com/newsroom/hpcqs-new-step-deployment-ruby-tgcc-reaching-first-35-trapped-atoms-track-final-100/>

En juin 2024, Pasqal a annoncé avoir dépassé le seuil de 1 000 atomes piégés dans un seul processeur quantique⁴², marquant une étape importante dans l'évolution de sa technologie.

4.2.3.2 QuEra Computing

Fondée en 2018 à Boston, QuEra Computing⁴³ est une entreprise spécialisée dans le développement d'ordinateurs quantiques à base d'atomes neutres. Cette technologie repose sur des recherches menées à Harvard et au MIT et est très comparable à celle de Pasqal. La société propose un accès public à **Aquila, un processeur de 256 Qubits**⁴⁴ via Amazon Braket. La **fidélité des opérations à 2 Qubits** est annoncée aux alentours de **99.5%**⁴⁵.

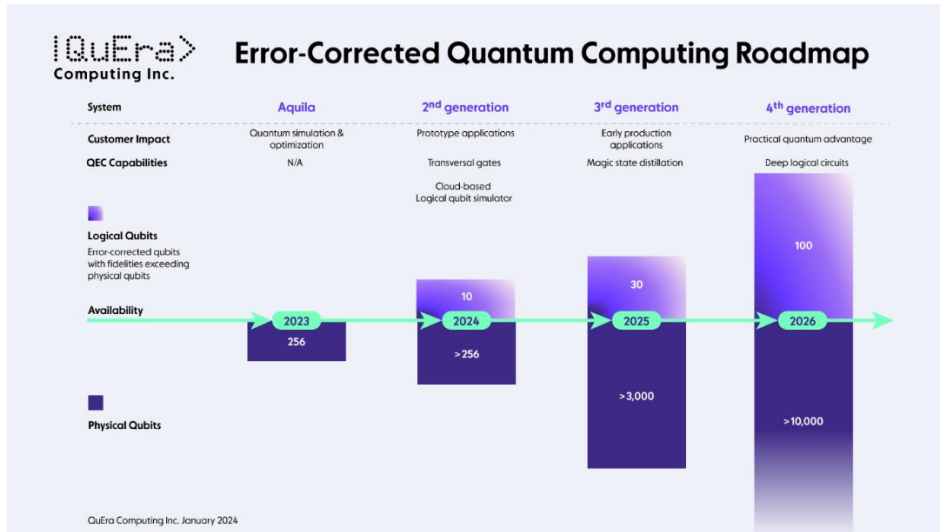


Figure 17 : QuEra Roadmap (Janvier 2024). Source QuEra



Figure 18 : QuEra Aquila QPU de 256 Qubits. Source : QuEra

⁴² <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.024073>

⁴³ <https://www.quera.com/>

⁴⁴ https://cdn.prod.website-files.com/643b94c382e84463a9e52264/648f5bf4d19795aaf36204f7_Whitepaper%20June%202023.pdf

⁴⁵ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06481-y>

4.2.3.3 Atom Computing

Atom Computing⁴⁶ est une entreprise américaine fondée en 2018 à Berkeley, en Californie, par Benjamin Bloom et Jonathan King. Elle se spécialise dans le développement d'ordinateurs quantiques utilisant des atomes neutres piégés à base d'Ytterbium.

En octobre 2023, Atom Computing a annoncé dans un communiqué de presse avoir construit un **système quantique comportant 1 225 sites atomiques, dont 1 180 qubits actifs**, dépassant ainsi le seuil symbolique des 1 000 qubits physiques⁴⁷. Les qubits d'Atom Computing présenteraient **un temps de cohérence record dépassant les 40 secondes**⁴⁸. Cette annonce a été complétée par un article scientifique publié en Janvier 2024 dans Physical Review X Quantum⁴⁹.

En novembre 2024, en collaboration avec Microsoft, l'entreprise a démontré la création et l'intrication de **24 qubits logiques à partir de 112 qubits physiques**, avec une fidélité de 99,6%⁵⁰. Cette avancée a été intégrée à l'offre cloud Azure Quantum de Microsoft.

Par ailleurs, dans un communiqué de presse⁵¹ et un article scientifique paru en Décembre 2024⁵², La société présente des calculs quantiques logiques utilisant un **processeur quantique à atomes neutres avec 256 qubits** en utilisant plusieurs niveaux de codes correcteurs pour améliorer la fiabilité des calculs, permettant de créer un **ensemble de 24 ou 28 qubits logiques**. Ceux-ci ont montré des taux d'erreurs plus bas que les qubits physiques sur des expériences telles que l'entrelacement de 24 qubits logiques et l'implémentation de l'algorithme de Bernstein-Vazirani. Cet article montre aussi la difficulté rencontrée pour la scalabilité de la solution, du fait des pertes d'atomes ou des défauts d'alignement des lasers.

Atom Computing et Microsoft prévoient de livrer des ordinateurs quantiques tolérants aux pannes et corrigés d'erreurs à partir de fin 2025⁵³. Le système d'Atom Computing, composé d'environ 1000 qubits physiques, supporte jusqu'à 50 qubits logiques corrigés d'erreurs.

⁴⁶ <https://atom-computing.com/>

⁴⁷ <https://atom-computing.com/quantum-startup-atom-computing-first-to-exceed-1000-qubits/>

⁴⁸ <https://atom-computing.com/establishing-world-record-coherence-times-on-nuclear-spin-qubits-made-from-neutral-atoms/>

⁴⁹ <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.5.030316>

⁵⁰ <https://arxiv.org/pdf/2411.11822>

⁵¹ <https://atom-computing.com/high-fidelity-gates-and-the-worlds-largest-entangled-logical-qubit-state/>

⁵² <https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.020334>

⁵³ <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/quantum/2024/11/19/microsoft-and-atom-computing-offer-a-commercial-quantum-machine-with-the-largest-number-of-entangled-logical-qubits-on-record/>

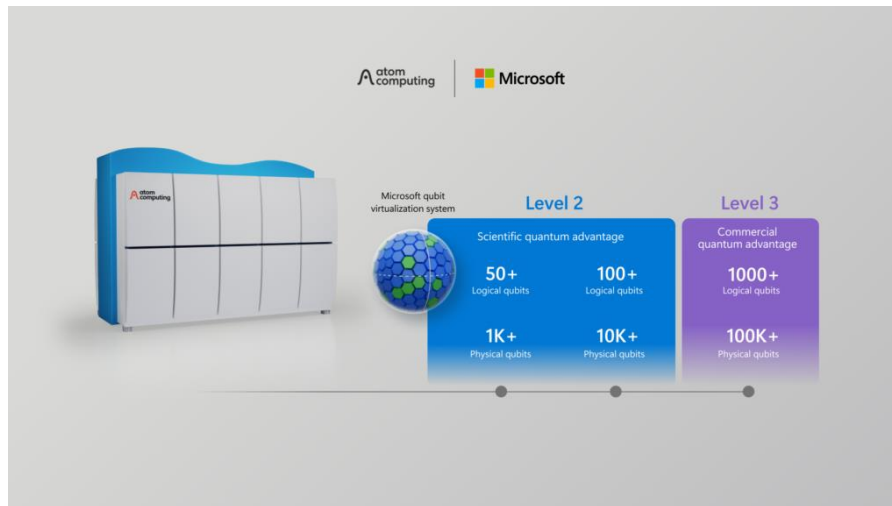


Figure 19 : Feuille de route conjointe de Microsoft & Atom Computing.
Source : Atom Computing⁵⁴

4.2.4 Photonique

La photonique quantique repose sur l'utilisation des photons pour représenter et manipuler des qubits. L'information est codée dans des propriétés quantiques du photon comme la polarisation, la trajectoire spatiale, ou le moment temporel.

Les qubits photoniques présentent plusieurs avantages : les photons sont rapides, peu sensibles au bruit environnemental et peuvent être transmis sur de longues distances sans pertes majeures. De plus, les opérations de portes quantiques sur les qubits photoniques peuvent être réalisées à l'aide de dispositifs optiques classiques comme des déphaseurs et des séparateurs de faisceaux, ce qui simplifie leur manipulation.

Cependant, la technologie des qubits photoniques fait face à des défis significatifs. La réalisation de portes à deux qubits efficaces et la gestion des pertes de photons sont des obstacles majeurs à surmonter pour atteindre une mise à l'échelle.

4.2.4.1 PsiQuantum

Fondée en 2016 à Palo Alto, en Californie, PsiQuantum⁵⁵ est une entreprise américaine spécialisée dans le développement d'ordinateurs quantiques photoniques. Ses fondateurs, Jeremy O'Brien, Terry Rudolph, Peter Shadbolt et Mark Thompson, sont issus du milieu académique britannique, notamment de l'Université de Bristol et de l'Imperial College London.

En avril 2024, PsiQuantum a annoncé un **chipset photonique quantique** baptisé **Omega**^{56,57}, qui intègre sur une seule puce l'ensemble des éléments nécessaires pour la réalisation d'un QPU photonique : source de photon, guides d'ondes et beam splitter, détecteur et compteur de photons à base de supraconducteurs. La société annonce ainsi des performances

⁵⁴ <https://atom-computing.com/building-quantum-supercomputers-with-microsoft/>

⁵⁵ <https://www.psiquantum.com/>

⁵⁶ <https://www.psiquantum.com/news-import/omega>

⁵⁷ <https://arxiv.org/pdf/2404.17570>

intéressantes, avec une fidélité en préparation et mesure de Qubit à 99.98% et une fidélité de fusion de deux qubits à 99.22%. Par ailleurs, PsiQuantum annonce une fidélité d'interconnexion de puce à puce de 99.72%, ouvrant la porte à la création d'un système modulaire.

Il faut cependant noter que le système nécessite des améliorations pour démontrer sa scalabilité, en particulier pour la gestion des pertes optiques et de la thermique du système.

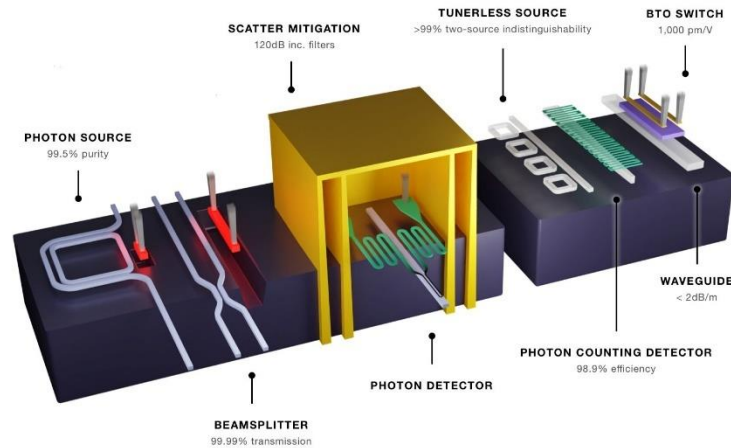


Figure 20 : Vue de l'architecture de la puce Omega. Source : PsiQuantum

En 2024, l'entreprise a annoncé la construction en collaboration avec Global Foundries de 2 ordinateurs quantiques de grande échelle : un destiné à être installé à Brisbane, en Australie, soutenue par un investissement de 940 millions de dollars australiens des gouvernements fédéral et du Queensland, et un autre annoncé aux Etats-Unis à Chicago dans l'Illinois.

4.2.4.2 Xanadu

Xanadu⁵⁸ est une entreprise canadienne spécialisée dans l'informatique quantique photonique. Fondée en 2016, Xanadu intègre des puces photoniques quantiques en silicium dans le matériel informatique courant. Xanadu est notamment à l'origine de PennyLane, une bibliothèque open-source pour le calcul quantique et l'apprentissage automatique quantique, facilitant la programmation hybride quantique-classique.

En 2025, Xanadu a annoncé dans un article paru dans Nature la **puce photonique Aurora**⁵⁹, un QPU d'architecture modulaire basé sur **35 puces photoniques interconnectées par fibres optiques**, capable de générer un état en grappe de 86,4 milliards de modes. Il faut noter les pertes optiques importantes dans le système, qui nécessite la mise en œuvre d'un système de correction d'erreur.

⁵⁸ <https://www.xanadu.ai/>

⁵⁹ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08406-9>

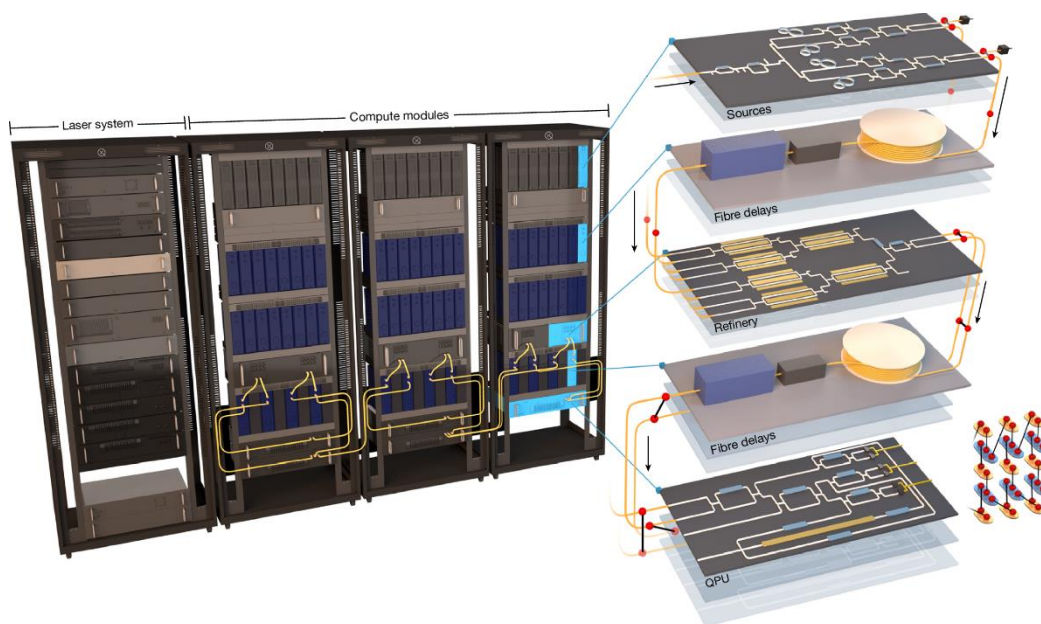


Figure 21 : Schema de principe du système Aurora et des ses modules principaux.

Sources : <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08406-9/figures/2>

4.2.4.3 Quandela

Fondée en juillet 2017 à Orsay, en France, par Pascale Senellart-Mardon, Valérian Giesz et Niccolo Somaschi, Quandela⁶⁰ est une entreprise spécialisée dans le développement d'ordinateurs quantiques photoniques. Issue des recherches menées au Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N), elle se concentre sur la conception de sources de photons uniques et de processeurs quantiques photoniques.

Depuis 2022, Quandela propose un accès à la plateforme photonique **Ascella** permettant de piloter **6 qubits photoniques**^{61,62}.

En février 2025, l'entreprise a annoncé une avancée majeure en **réduisant théoriquement d'un facteur 100 000 le nombre de composants nécessaires aux calculs quantiques tolérants aux fautes**, grâce à **une technologie hybride basée sur des émetteurs quantiques semi-conducteurs**^{63,64}. Cette innovation s'inscrit dans la feuille de route technologique de Quandela, qui vise à atteindre le calcul quantique tolérant aux fautes d'ici 2030, avec une première démonstration de qubits logiques prévue pour 2025.

⁶⁰ <https://www.quandela.com/>

⁶¹ <https://www.quandela.com/resources/blog/ascella-the-single-photon-quantum-computing-prototype/>

⁶² <https://www.nature.com/articles/s41566-024-01403-4>

⁶³ <https://www.quandela.com/about-us/newsroom/quandela-announces-a-100000-reduction-in-the-number-of-components-needed-for-fault-tolerant-calculations-a-major-breakthrough-for-photon-quantum-computing/>

⁶⁴ <https://arxiv.org/pdf/2412.08611>

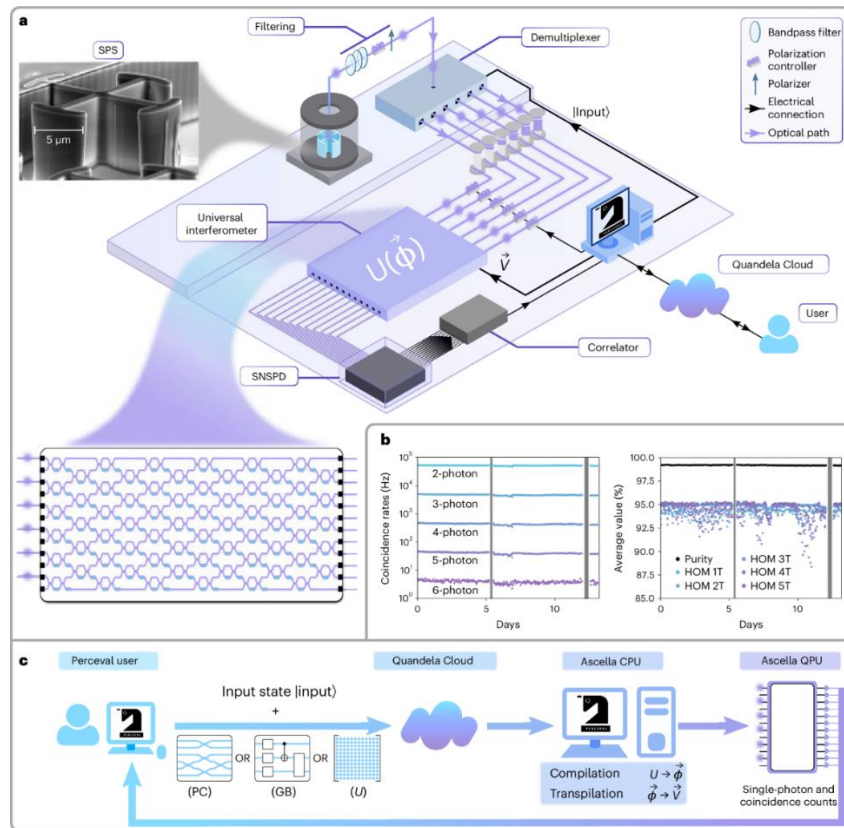


Figure 22 : Diagramme de principe de la plateforme Ascella de Quandela.
 Source : <https://www.nature.com/articles/s41566-024-01403-4>

4.2.5 Semiconducteurs

Les qubits à base de semi-conducteurs exploitent des propriétés quantiques de matériaux comme le silicium ou l'arséniure de Gallium (AsGa) pour stocker et manipuler de l'information quantique. L'information peut être encodée dans le spin d'un électron ou d'un trou (qubit de spin), ou dans des états de charge contrôlés (qubit de charge), via la réalisation de boîtes ou de points quantiques (« Quantum Dots »). Cette approche cherche à tirer parti des techniques de fabrication éprouvées de l'industrie microélectronique pour créer des dispositifs quantiques à grande échelle, avec des perspectives d'intégration élevée et de production industrielle.

4.2.5.1 Intel

Le géant de la microélectronique Intel, inventeur du microprocesseur commercial en 1971, a lancé ses activités dans le domaine du calcul quantique en 2015 avec la création d'une division dédiée, en partenariat avec le laboratoire national américain Sandia et QuTech (Delft, Pays-Bas). La stratégie d'Intel repose sur l'exploitation de son expertise industrielle en microélectronique pour développer des technologies de qubits basées sur le silicium, notamment les qubits de spin dans des Quantum Dots.

L'entreprise a développé plusieurs prototypes de processeurs quantiques, tels que « **Tangle Lake** », un processeur supraconducteur de 49 qubits, et « **Tunnel Falls** », une puce à spin de

silicium destinée à la recherche académique⁶⁵. Intel collabore également avec des institutions comme le Chicago Quantum Exchange pour faire progresser les technologies quantiques.

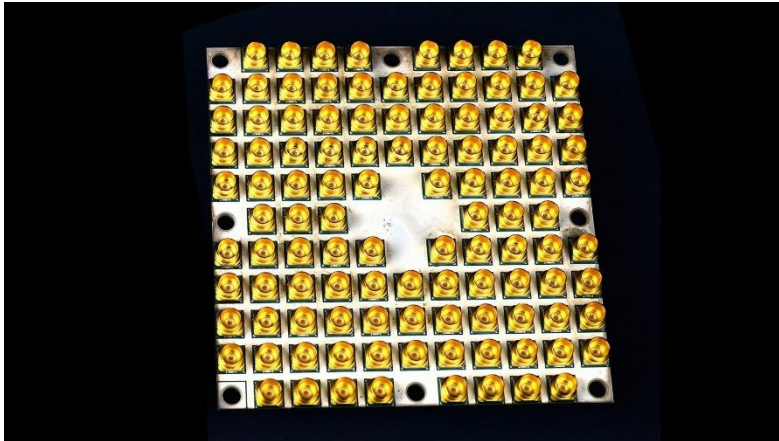


Figure 23 : la puce « Tangle Lake » d’Intel.

Source : <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/research/quantum-computing.html>

En décembre 2024, Intel a publié sur une publication Arxiv les détails de la fabrication de la puce « Tunnel Falls » de 12 qubits sur une ligne industrielle de semi-conducteurs de 300mm⁶⁶.

4.2.5.2 Diraq

Fondée en 2022 à Sydney, en Australie, Diraq⁶⁷ est une entreprise issue des travaux de recherche menés à l'Université de Nouvelle-Galles du Sud (UNSW) par le professeur Andrew Dzurak. Elle se spécialise dans le développement de processeurs quantiques utilisant des qubits de spin de trous confinés dans des boîtes quantiques en silicium, compatibles avec les procédés de fabrication CMOS standard.

La société a publié récemment de nombreux articles. Ainsi, dans un article paru dans Nature⁶⁸ paru en mars 2024, elle a **démontré le fonctionnement de qubits de spin silicium à des températures supérieurs à 1K** tout en gardant **une fidélité de l'ordre de 99%** (99.85% pour les portes à 1 qubits et 98.92% pour les portes à 2 qubits).

Dans un autre article de Nature daté d’avril 2025⁶⁹, l'entreprise annonce avoir démontré une violation de l'inégalité de Bell avec des qubits de spin en silicium opérés entre 0,1 et 1,1 K.

4.2.5.3 Equal1

Fondée en 2017 à Dublin, Equal1⁷⁰ est une entreprise spécialisée dans le développement de processeurs quantiques basés sur le silicium.

En mars 2025, Equal1 a présenté **Bell-1⁷¹, QPU de 6 qubits** monté en rack, conçu pour une intégration directe dans les centres de données et les environnements de calcul haute

⁶⁵ <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/research/quantum-computing.html>

⁶⁶ <https://arxiv.org/pdf/2410.16583>

⁶⁷ <https://diraq.com/>

⁶⁸ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07160-2>

⁶⁹ <https://www.nature.com/articles/s41467-025-57987-0>

⁷⁰ <https://www.equal1.com/>

⁷¹ https://www.equal1.com/files/ugd/202811_545f0db149b440e0993f5b21bf3a1f3f.pdf

performance. L'entreprise a démontré une **fidélité de 99,4 %** pour les **opérations à un qubit** et de **98,4 %** pour les **opérations à deux qubits**.



Figure 24 : Bell-1 d'Equal1. Source : Equal1

Equal1 travaille également UnityQ, une architecture de système quantique sur puce (QSoC) intégrant des qubits, des circuits de contrôle cryogéniques et des processeurs classiques sur une seule puce en silicium, visant une évolutivité vers des millions de qubits physiques d'ici 2030.

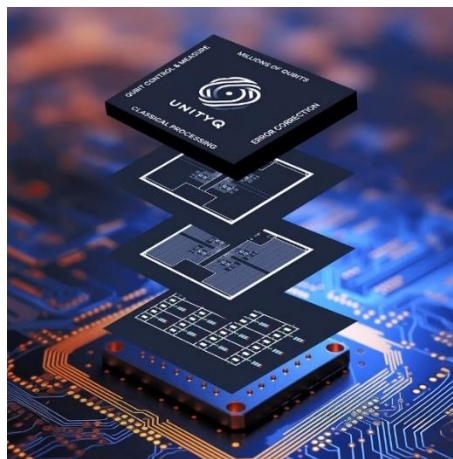


Figure 25 : Schéma de principe de l'architecture de système quantique sur puce UnityQ

4.2.5.4 Quobly

Quobly⁷² (ex Siquance) est une entreprise française fondée en novembre 2022 à Grenoble par Maud Vinet, Tristan Meunier et François Perruchot, experts reconnus dans les domaines des semi-conducteurs et de la physique quantique. Elle est issue de quinze années de recherche collaborative entre le CEA-Leti et le CNRS.

⁷² <https://quobly.io/>

Quobly utilise la technologie FD-SOI (Fully Depleted Silicon on Insulator), une plateforme CMOS disponible commercialement, pour développer des processeurs quantiques évolutifs et rentables. Le 9 Décembre 2024, lors de l'International Electron Devices Meeting (IEDM), l'entreprise a démontré la **co-intégration de qubits d'électrons et de trous sur FD-SOI** pour des performances améliorées, a montré une cellule standard pour des portes à deux qubits ainsi que la **mise en œuvre d'une électronique de contrôle fonctionnant à basse température.**⁷³⁷⁴.

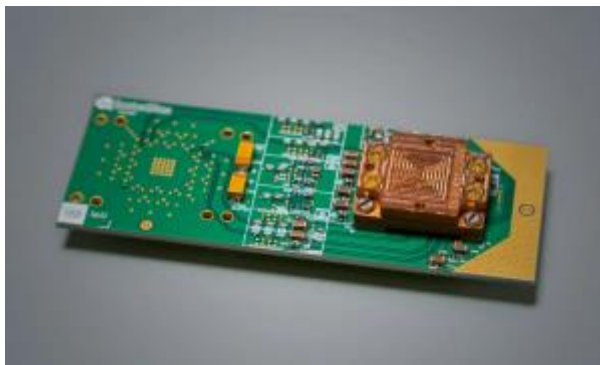


Figure 26 : PCB dédié au test cryogénique de la puce de lecture.
Source : Quobly⁷⁵

En décembre 2024, Quobly a annoncé une collaboration stratégique avec STMicroelectronics pour la fabrication de ses processeurs quantiques, en s'appuyant sur la technologie FD-SOI 28 nm de ST. Les deux entreprises prévoient de lancer une première génération de produits commerciaux d'ici 2027.

En février 2025, de nouvelles installations industrielles ont été inaugurées à Grenoble, au sein du bâtiment BHT3, afin d'accélérer le développement de ses processeurs quantiques et de multiplier par 50 sa capacité de production. Quobly prévoit de franchir la barre du million de qubits physiques d'ici 2031, avec l'objectif de développer des ordinateurs quantiques tolérants aux fautes basés sur des qubits en silicium.

4.2.5.5 C12

Fondée en 2020 en tant que spin-off du Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure, C12⁷⁶ est une startup française spécialisée dans le développement de calculateurs quantiques. La société se distingue par son approche utilisant des nanotubes de carbone visant à réduire les sources de bruit et à améliorer la cohérence quantique, offrant une alternative aux matériaux supraconducteurs traditionnels. La société se concentre actuellement sur la validation des éléments fondamentaux et la création de puces à un ou deux qubits, tout en développant son écosystème de partenaires et de clients.

⁷³ <https://thequantuminsider.com/2024/12/11/quobly-demonstrates-fd-soi-as-a-scalable-and-cost-effective-platform-for-quantum-processors/>

⁷⁴ <https://quobly.io/research/fdsoi-platform-for-quantum-computing/>

⁷⁵ <https://quobly.io/news/cea-and-quobly-report-qubit-readout-solution/>

⁷⁶ <https://www.c12qe.com/>

4.2.6 Autres technologies

D'autres technologies sont aujourd'hui développées pour proposer des alternatives permettant de dépasser certaines limites des solutions existantes. Ces technologies sont encore à un stade émergent, mais commencent à faire parler d'elles.

4.2.6.1 Centres NV

Les qubits à base de centres NV (Nitrogen-Vacancy)⁷⁷ utilisent des défauts spécifiques dans la structure cristalline du diamant, où un atome d'azote remplace un atome de carbone et est adjacent à une vacance (un espace vide) dans le réseau cristallin. Les électrons piégés dans ces centres NV possèdent des propriétés de spin uniques qui permettent de les utiliser comme qubits. Ces spins peuvent être opérés par des systèmes optique et/ou par micro-onde.

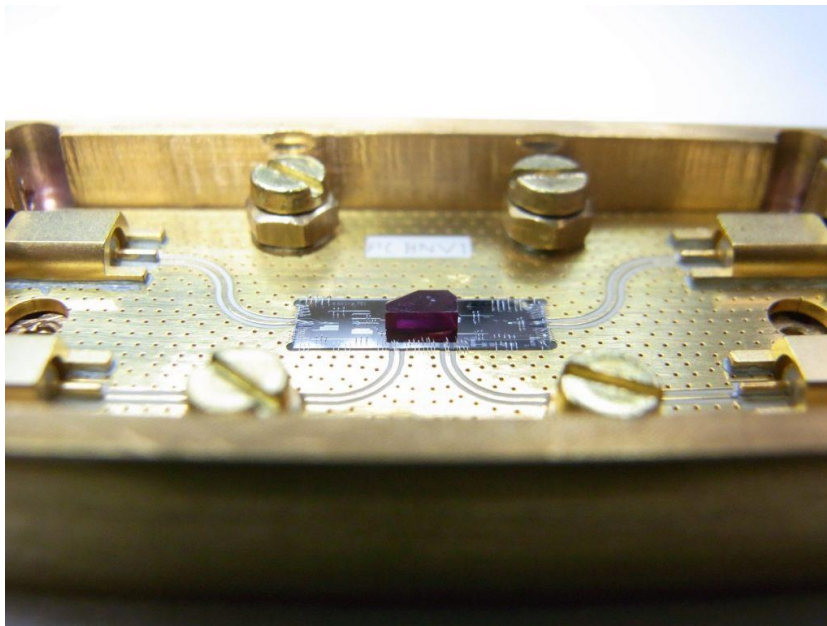


Figure 27 : Prototype de mémoire quantique combinant un cristal de diamant contenant 1011 centres NV et un qubit supraconducteur. Source : CEA - IRAMIS⁷⁸

Ils se distinguent par plusieurs caractéristiques avantageuses : des temps de cohérence longs, un fonctionnement possible à température ambiante et une robustesse intrinsèque face aux perturbations environnementales, telles que les fluctuations de température et le bruit des champs magnétiques. Cependant, le couplage entre spin nucléaire et spin électronique au sein des matériaux peut entraîner du bruit et une complexité pour la mise en œuvre.

C'est donc un candidat très intéressant pour la conception de capteurs quantiques, mais aussi comme substrat pour des qubits destinés au calcul quantique. Au vu des avantages intrinsèques de cette technologie, plusieurs sociétés se sont lancées sur ce créneau comme par exemple Quantum Brilliance⁷⁹, Diatope⁸⁰ ou Element 6⁸¹.

⁷⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_azote-lacune

⁷⁸ [Un pas crucial vers une mémoire quantique - IRAMIS](#)

⁷⁹ <https://quantumbrilliance.com/>

⁸⁰ <https://diatope.com/>

⁸¹ <https://www.e6.com/en/products/next-generation-applications>

En Mars 2025, une équipe de l'université de Delft de d'Element 6 a publié un article dans *Physical Review Applied*⁸², qui détaille la création et **l'utilisation de centres NV pour la réalisation d'e portes quantiques**. Ainsi, ils ont pu montrer une **fidélité élevée de 99,999(1) % pour les portes à 1 qubit et de 99,93(5) % pour les portes à 2 qubits**. Un protocole y est décrit pour protéger les qubits des interactions environnementales et prolonger leur cohérence.

En comparaison des autres technologies, ces résultats semblent très prometteurs. On est cependant encore très loin d'avoir prouvé la scalabilité des centres NV et d'obtenir une puce quantique opérationnelle. Il est cependant important de garder cette technologie sur nos radars, du fait de son potentiel disruptif.

4.2.6.2 Spin nucléaire

Les qubits à base de spins nucléaires exploitent les propriétés de spin des noyaux atomiques de certains atomes pour encoder l'information quantique. Ce spin génère un moment magnétique qui peut être utilisé pour représenter des états quantiques, similaires aux états de spin des électrons. Les états de spin nucléaire peuvent être manipulés à l'aide de champs magnétiques ou électriques, comme des impulsions de radiofréquence (RF), pour faire basculer le spin d'un état à un autre.

Les spins nucléaires sont naturellement isolés des perturbations environnementales, ce qui réduit les risques de décohérence. Cette isolation permet de maintenir la stabilité des qubits sur plusieurs minutes, voire plusieurs heures dans certains cas, même en présence de fluctuations de température ou de champs magnétiques externes. A contrario, ils sont lents et difficile à manipuler, ce qui implique des technologies de pointe pour leur utilisation.

En novembre 2024, une équipe pluridisciplinaire a publié un article sur Arxiv⁸³ qui présente la réalisation de **qubits nucléaires à base de cristaux de CaWO_4 dopé à l' Er^{3+}** . **Plusieurs portes à 1 ou 2 qubits ont été mises en œuvre**, dont la CNOT. Les différents types de **temps de cohérence mesurés varient entre 0,8 et 4,4s**, soit plusieurs ordres de grandeur au-dessus de ceux observés dans les technologies plus matures. **La fidélité est cependant encore faible**, mesurée à 88% pour la création d'Etats de Bell.

Ce résultat est déjà très prometteur, mais le chemin à parcourir reste très long avant d'atteindre des spécifications comparables aux autres technologies quantiques, en particulier pour obtenir une fidélité suffisante pour des applications pratiques.

4.2.6.3 Qubits topologiques

A la fin des années 1990, Microsoft a entamé ses recherches en informatique quantique avec pour objectif de développer un ordinateur quantique à grande échelle. En 2005, l'entreprise a créé Station Q, un centre de recherche dédié à l'informatique quantique topologique, dirigé par le mathématicien Michael Freedman. Parallèlement, l'équipe QuArC, dirigée par Krysta Svore à Redmond, s'est concentrée sur la conception de circuits quantiques et le développement logiciel

⁸² <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.034052>

⁸³ <https://arxiv.org/pdf/2410.10432>

Les qubits topologiques utilisent des quasi-particules appelées anyons. Ceux-ci se formeraient théoriquement dans des systèmes bidimensionnels et dont les trajectoires s'entrelacent pour créer des structures tridimensionnelles : une dimension temporelle et deux dimensions spatiales.

En février 2025, Microsoft a frappé les esprits avec un communiqué de presse annonçant la création de **Majorana 1, première puce basée sur un qubit topologique**⁸⁴. Elle a en parallèle publié 2 articles, l'un présentant une feuille de route matérielle pour arriver au FTQC en 4 étapes⁸⁵, et un autre dans Nature précisant le système de mesure qui a permis d'observer le qubit topologique de Majorana-1⁸⁶.

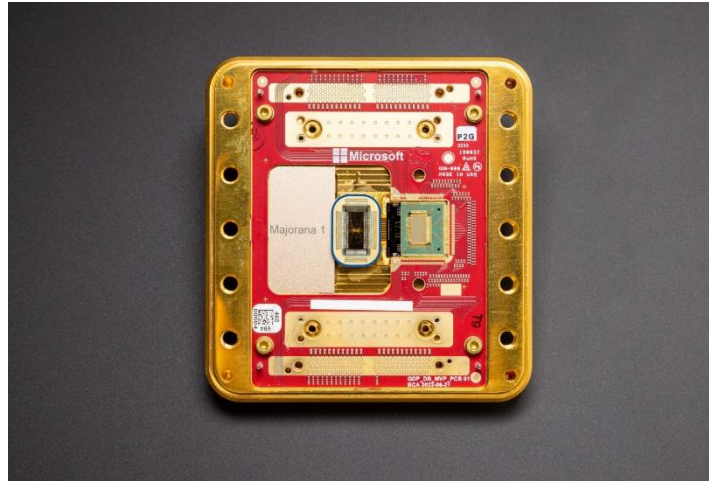


Figure 28 : La puce Majorana-1. Source : Microsoft

Ces annonces ont entraîné un fort engouement du grand public, mais ont reçu **un accueil plus que circonspect de la part des experts et des scientifiques**. Plusieurs analyses remettent en cause la réalité des observations de Microsoft. On peut mentionner l'analyse très détaillée faite par O. Ezratty⁸⁷, qu'il résume lui-même ainsi :

- Dans le meilleur des cas, cela va demander des années, si ce n'est des décennies et énormément de travail
- Dans le pire des cas, cela ne marche pas du tout ou tout du moins, c'est trop compliqué.

A ce jour, **il n'y a aucune certitude de l'existence du qubit topologique**. On est donc encore très loin d'une mise en œuvre de cette technologie pour le calcul quantique, malgré les promesses de Microsoft.

⁸⁴ <https://news.microsoft.com/source/emea/2025/02/microsoft-devoile-majorana-1-le-premier-processeur-quantique-au-monde-alimente-par-des-qubits-topologiques/?lang=fr>

⁸⁵ <https://arxiv.org/pdf/2502.12252>

⁸⁶ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08445-2>

⁸⁷ <https://www.oezratty.net/wordpress/2025/inside-microsoft-majorana-1/>

4.2.7 Tableau récapitulatif

Le tableau suivant collecte l'ensemble des informations citées dans le document. Il faut cependant souligner ces chiffres sont données à titre indicatifs, et qu'ils ne peuvent être utilisés seuls pour établir une comparaison des technologies.

Société	Pays	Technologies	Nb qubit	Fidélité	Temps de cohérence	Nom	Remarques
<u>IBM</u>	US	Supraconducteurs	156	99,63 %	T1 : 178 μ s / T2 : 116 μ s	Heron R2	
<u>IBM</u>	US	Supraconducteurs	1121	Non spécifié	Non spécifié	Condor	
<u>Google</u>	US	Supraconducteurs	105	99,86 % (2Q)	T1 : 98 μ s / T2 : 89 μ s	Willow	
<u>IonQ</u>	US	Ions piégés	36	99,98% (1Q) 99,6% (2Q)	T1 : 0.964 ms / T2 : 1.155 ms	Forte	
<u>Rigetti</u>	US	Supraconducteurs	84	99 % (fSIM) 98 % (iSWAP)	T1 : 21 μ s / T2 : 20 μ s	Ankaa-3	
<u>IQM</u>	FI	Supraconducteurs	20 Obj.: 54 & 150	99,9 % (2Q)	T1 : 964 μ s / T2 : 1 155 μ s	Radiance	
<u>Pasqal</u>	FR	Atomes neutres	>100	Non spécifié	Non spécifié	Orion Gamma	Analogique
<u>D-Wave</u>	CA	Supraconducteurs	4400+	Non spécifié		Advantage2	Recuit quantique
<u>Quantum CTek</u>	CN	Supraconducteurs	105	99,90 % (1Q) 99,62 % (2Q)	T1 : 72 μ s (cohérence)	Zuchongzhi 3.0	
<u>Alice & Bob</u>	FR	Supraconducteurs	16 1 logique	99,9999 % (objectif)	Non spécifié	Helium 1	Qubits de chat
<u>PsiQuantum</u>	US	Photoniques	Objectif : 1 000 000	99.98% (1Q)	Non spécifié	Omega	
<u>Xanadu</u>	CA	Photoniques	Non spécifié	Non spécifié	Non spécifié	Aurora	
<u>Quandela</u>	FR	Photoniques	6*	Non spécifié	Non spécifié	Ascella	
<u>Intel</u>	US	Supraconducteurs Semiconducteurs	49 12	Non spécifié	Non spécifié	Tangle Lake Tunnel Fall	
<u>Fujitsu</u>	JP	Supraconducteurs	256	Non spécifié	Non spécifié		
<u>Atom Computing</u>	US	Atomes neutres	1225 24/28 logiques	99,6%			
<u>Microsoft</u>	US	Topologiques	1	Non spécifié	Non spécifié	Majorana-1	
<u>Dirac</u>	AUS	Semiconducteurs	Non précisé		99.85% (1Q) 98.92% (2Q)		

Société	Pays	Technologies	Nb qubit	Fidélité	Temps de cohérence	Nom	Remarques
<u>Equal-1</u>	IRL	Semiconducteurs	6			Bell-1	
<u>Amazon</u>	US	Supraconducteurs	14 1 logique			Ocelot	Qubits de chat + Qubits transmons

4.3 Correction d'erreurs

Comme souligné dans l'étude Quantum 2042, la correction d'erreur est un verrou majeur à débloquent pour s'affranchir de l'instabilité intrinsèque des qubits et ouvrir le champ des applications possibles. Il faut rappeler que contrairement à l'information classique, les qubits ne peuvent pas être copiés (théorème de non-clonage). **Les codes correcteurs quantiques permettent de détecter et corriger ces erreurs sans violer les lois de la mécanique quantique.**

C'est un sujet très complexe où interfèrent la fidélité intrinsèque des qubits, la topologie de l'assemblage de qubits et le type de code utilisé pour corriger ces erreurs. L'objectif principal est d'avoir des qubits en nombre suffisant tout en garantissant une fidélité minimale afin d'appliquer le code correcteur d'erreurs adapté au système sans dégrader la performance.

Les codes correcteurs d'erreurs existent déjà en informatique classique depuis de nombreuses années. Les plus connus sont les codes de répétition et les codes de surfaces. C'est donc ces codes qui ont été adaptés et implémentés en premier dans le monde quantique.

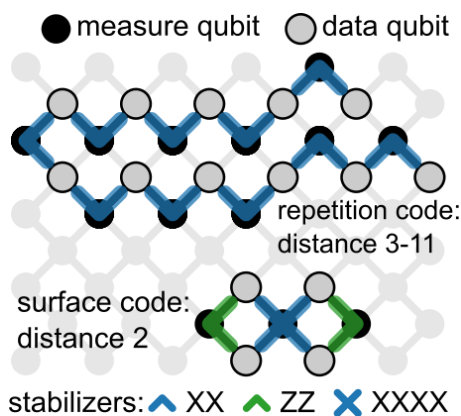


Figure 29 : Schéma d'un code de répétition (chaîne 1D de 21 qubits) et d'un code de surface de distance 2 (7 qubits). Source : Google⁸⁸

En Février 2023, Google avait annoncé la première mise en œuvre de **code correcteur d'erreur avec un code de surface sur un processeur Sycamore de 72 qubits**. Cependant, la fidélité des qubits n'était pas suffisante et **le taux d'erreur des qubits logiques était plus élevée que celui des qubits physiques initiaux**.

En Aout 2024, dans l'article scientifique à la base de l'annonce de la nouvelle puce Willow⁸⁹, Google a montré l'utilisation **d'un code de surface sur les 105 Qubits** pour créer des **qubits logiques de meilleur qualité que les qubits physiques initiaux : le taux d'erreurs est réduit d'un facteur 2, la durée de vie est doublée**. Par ailleurs, Google a aussi développé une solution hardware intégrée permettant **le décodage des erreurs en « temps réel »**. C'est donc une première étape importante qui a été franchie. Il reste maintenant à démontrer la scalabilité de la solution.

⁸⁸ <https://research.google/blog/demonstrating-the-fundamentals-of-quantum-error-correction/>

⁸⁹ <https://arxiv.org/pdf/2408.13687>

Amazon a aussi travaillé sur la correction d'erreur en appliquant **un code de répétition sur sa puce Ocelot combinant qubit de chats et qubits transmons**. C'est l'objet d'un article⁹⁰ paru dans Nature en février 2025, dans lequel la société annonce un taux d'erreur logique de 1.75% avec code de distance 3 et de 1.65% un code de distance 5. Cependant, il n'est pas fait mention dans l'article du taux d'erreur initial des qubits physiques utilisées pour constituer le qubit logique. Nous ne savons donc pas si dans ce cas précis l'utilisation du code de répétition a permis de réduire taux d'erreur apparent du système.

Les codes de répétition ou de surface sont des codes très connus et largement utilisés actuellement. Cependant, ce **ne sont pas toujours les plus adaptés au monde quantique** : ils **nécessitent un nombre important de qubits auxiliaires** pour pouvoir être efficace. Dans un monde où les qubits sont rares, de nouveaux algorithmes de corrections d'erreurs sont utilisés ou développés pour réduire significativement le nombre de qubits physiques nécessaire pour générer un qubit logique

L'un d'entre eux est particulièrement étudiés : les **codes Low-Density Parity-Check (LDPC)**. Ce type de code a déjà été adapté et simulé pour de nombreux systèmes quantiques comme les supraconducteurs⁹¹, les atomes neutres⁹², ou les qubits de chats⁹³. **Les simulations montrent une réduction significative du taux d'erreur avec moins de qubits auxiliaires**. Cependant, sa **mise en œuvre expérimentale reste un défi**. C'est une alternative crédible aux codes de surface, mais qui reste encore à valider, en particulier la faisabilité à grande échelle. **C'est la piste choisie aujourd'hui par IBM** et présenté dans la feuille de route pour le développement du FTQC publiée en Juin 2025⁹⁴, complété d'un article disponible sur Arxiv⁹⁵.

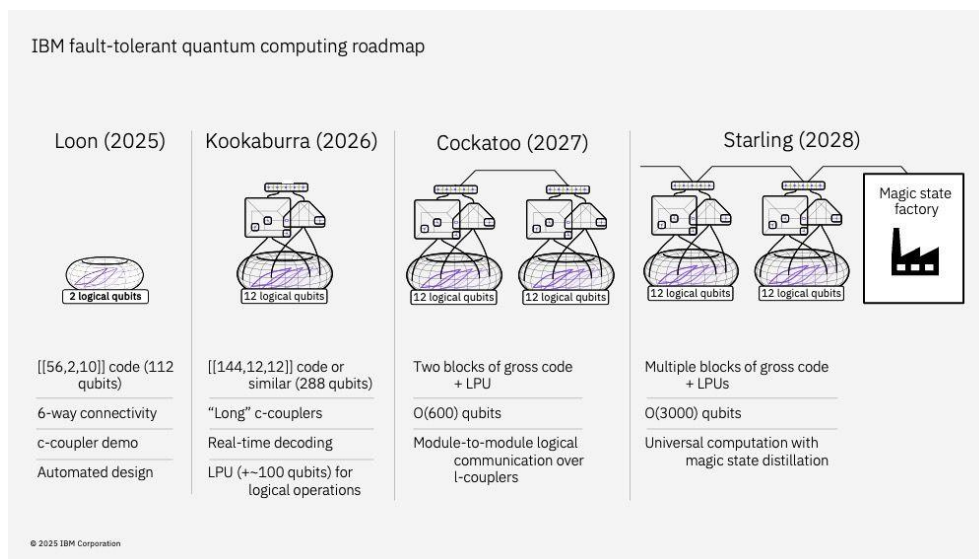


Figure 30 : Roadmap pour le développement du FTQC d'IBM. Source : ⁹⁶

⁹⁰ <https://www.nature.com/articles/s41586-025-08642-7>

⁹¹ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07107-7>

⁹² <https://arxiv.org/pdf/2404.13010>

⁹³ <https://www.nature.com/articles/s41467-025-56298-8>

⁹⁴ <https://www.ibm.com/quantum/blog/large-scale-ftqc>

⁹⁵ <https://www.arxiv.org/pdf/2506.03094>

⁹⁶ <https://www.ibm.com/quantum/blog/large-scale-ftqc>

Depuis quelques mois, on voit aussi apparaître de nouvelles méthodes, comme l'utilisation par Google et l'université de Yale de **code GKP (Gottesman-Kitaev-Preskill) sur des systèmes quantiques à plus de deux niveaux (Qudits)**⁹⁷. Cette étude montre pour l'instant une capacité limitée mais réelle à corriger les erreurs des qubits supraconducteurs. C'est dans tous les cas une nouvelle approche qu'il est nécessaire de suivre.

Les autres acteurs sont aussi très actifs dans le domaine. On peut citer Quantinuum, qui travaille sur l'implémentation de code correcteurs sur ses machines à ions piégés. En juin 2025, la société a publié 2 articles sur des points importants de la correction d'erreur. Dans le premier article ⁹⁸, les auteurs ont pu générer des « états magiques » avec un taux d'erreurs très faible à 7.10^{-5} et mettre en œuvre une porte à 2 qubits « non-Clifford » (portes logiques les plus complexes à réaliser), avec une fidélité en opération de 2.10^{-4} . Ceci **ouvre la voie à la mise au point d'un jeu de portes logiques complet compatibles avec la correction d'erreurs**. Dans le second article ⁹⁹, les chercheurs décrivent une technique dénommée « code switching » permettant de **réduire drastiquement le coût en nombre de qubits de l'implémentation des codes correcteurs d'erreurs**. Cependant, ces travaux sont très récents et demandent encore à être vérifiés par la communauté scientifique.

On ne peut que constater l'**abondance des travaux publiés sur le sujet de la correction d'erreurs**, ce qui confirme l'importance accordée à ce verrou technologique par la communauté scientifique et les industriels. **Les avancées sont réelles**, comme la création dans Google Willow des premiers qubits logiques plus fidèles que les qubits physiques le composant. Cependant, **la question de la scalabilité des solutions reste aujourd'hui ouverte**. Plus que jamais, il faut continuer la veille active sur les différentes approches, afin d'anticiper l'arrivée à moyen ou long terme des premiers ordinateurs tolérants aux fautes (FTQC).

4.4 Interconnexion quantique

Du fait de limitations physiques ou technologiques, les fabricants de QPUs ont ou auront à terme des **difficultés pour intégrer un nombre suffisant de qubits dans un seul « cœur »**. Pour permettre de traiter les problèmes complexes, il sera nécessaire d'interconnecter les QPU sur de courtes ou moyennes distances pour mettre en œuvre un mode de calcul quantique distribué. Cependant, pour être totalement efficace, l'interconnexion doit rester quantique et permettre de conserver/d'établir des propriétés d'intrication et de superposition entre les cœurs connectés. Plusieurs études et articles ont été publiés récemment, prouvant l'importance de ce sujet pour la scalabilité des solutions.

La plupart des technologies sont confrontées à la **complexité de transférer les informations quantiques à distance**. Dans les technologies à base de supraconducteurs ou de semi-conducteurs, les opérations sur les qubits sont basées sur l'utilisation de photons microondes. Ceux-ci peuvent être transférés sur de courtes distances via des guides d'ondes. Sur de grandes distances, les technologies optiques fondées sur la bande dite « télécom » seraient préférables, en permettant l'utilisation de fibres optiques classiques. Il faut cependant retranscrire l'information quantique des photons microondes dans un photon « télécom », qui

⁹⁷ <https://www.nature.com/articles/s41586-025-08899-y>

⁹⁸ <https://arxiv.org/pdf/2506.14169>

⁹⁹ <https://arxiv.org/pdf/2506.14688v1>

sera transporté à distance dans un autre cœur. Cela nécessite la mise au point de « transducteurs quantiques micro-ondes \leftrightarrow photon télécom » qui doivent être à la fois déterministes (fonctionnant à la demande) et performants (ne générant pas trop de pertes) : c'est un challenge en soi. De plus, il faut définir et appliquer des protocoles d'intrications de ces photons « télécom » pour générer l'intrication des qubits à distance sans violer les lois de la mécanique quantique. Comme indiqué dans cet article sur la scalabilité des ordinateurs quantiques basés sur des liens optiques paru en mai 2025¹⁰⁰, **la communication quantique photonique entre cœurs distants fait face à de nombreux verrous** qui, malgré les progrès récents, sont encore loin d'être levés.

Dans ce cadre, IBM travaille sur 2 approches de couplages de cœurs : Flamingo et Crosbill. La première, **la puce Flamingo** serait un **assemblage modulaire de 3 QPUs de 156 qubits** reliés entre eux. Il faut noter que dans ce concept, **les communications entre cœurs sont assurées par des communications classiques**, et ne sont donc pas à proprement parler quantique.

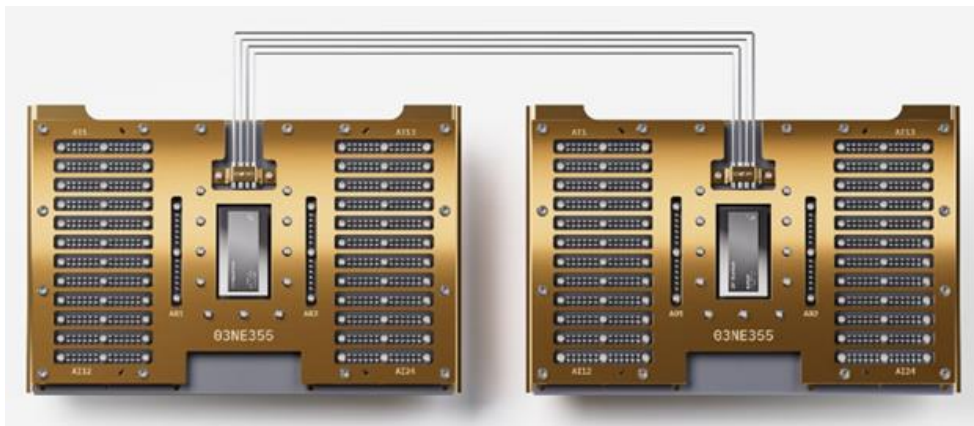


Figure 31 : Système Flamingo à base de 2 modules Herons connectés.

Source : https://www.ibm.com/quantum/blog/qdc-2024?social_post=sf207457441&sf207457441=1

IBM a ainsi publié dans un article paru dans Nature en novembre 2024 un exemple de mise en œuvre de **2 cœurs Eagle de 127 Qubits connectés par un système de connexion classique**¹⁰¹. On y démontre l'exécution de circuits complexes impliquant jusqu'à 142 qubits en utilisant des « Paires de Bells Coupées » pour simuler des connexions longue distance entre qubits répartis sur différents processeurs.

¹⁰⁰ <https://arxiv.org/pdf/2505.00542>

¹⁰¹ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08178-2>

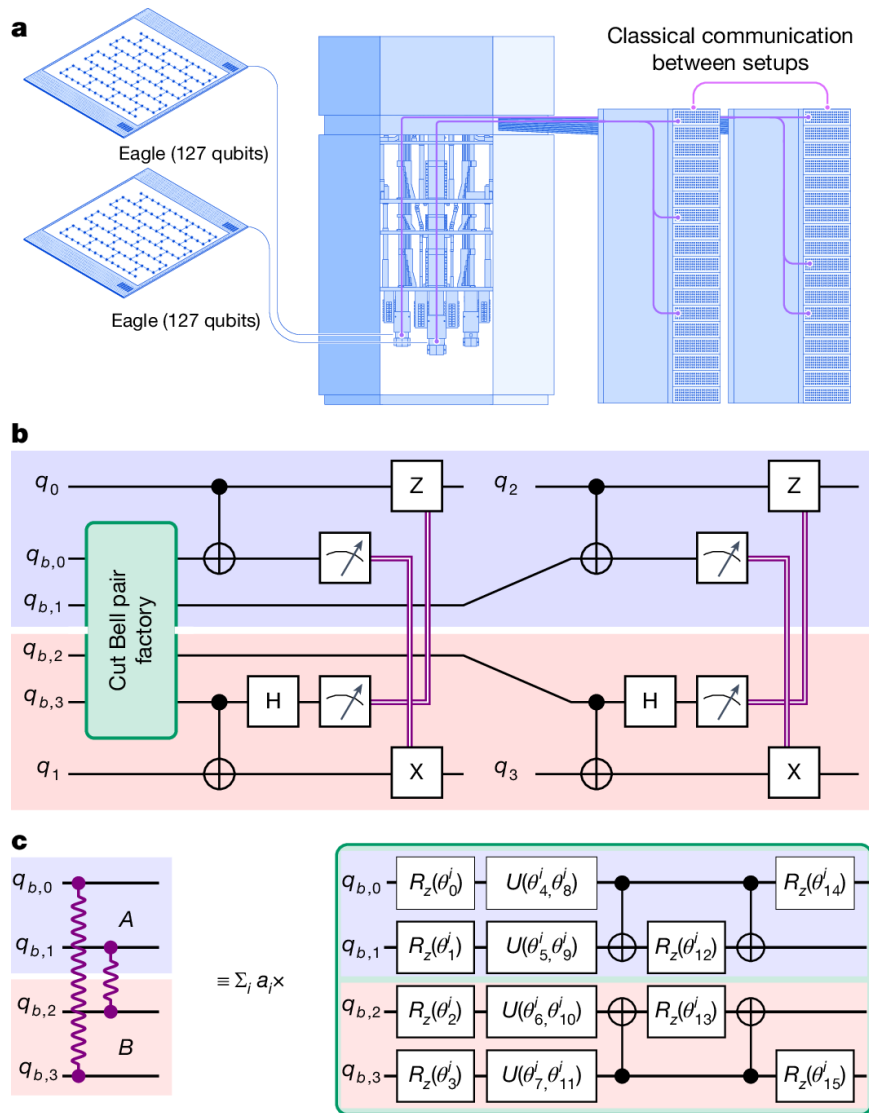


Figure 32 : Schémas de principe de la connexion de 2 cœurs quantique Eagle de 127 qubits et des « paires de Bell coupées ». Source : ¹⁰²

Cependant, la mise en œuvre de ce protocole nécessite **un nombre de qubits surnuméraires très significatif**, qui peut interroger sur le potentiel de scalabilité de cette approche.

En parallèle, IBM travaille sur une connexion quantique à courte distance. En novembre 2024, IBM a annoncé avoir mis au point **la preuve de concept Crossbill** en connectant **3 QPUs Hérons via des coupleurs entre les puces**. A l'heure où nous écrivons ces lignes, nous n'avons **pas trouvé d'article scientifique qui donne des spécifications précises** ou une mise en œuvre de ce QPU multicœurs.

¹⁰² <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08178-2>

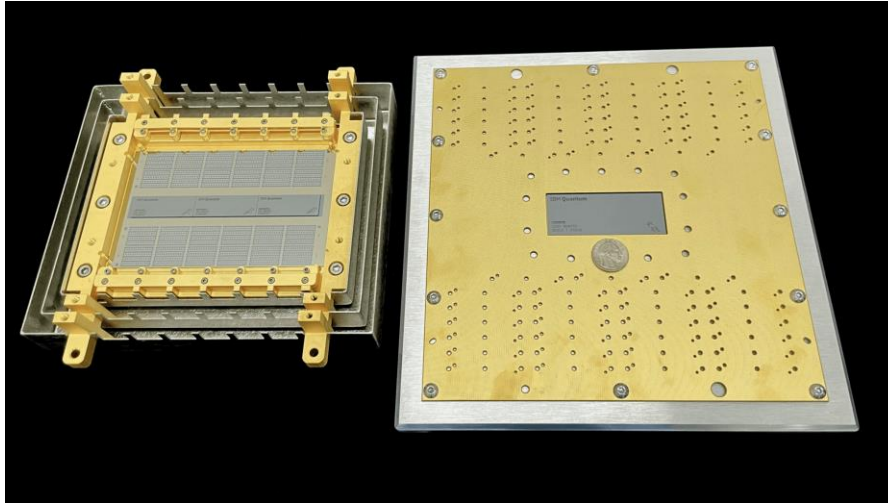


Figure 33 : Comparaison entre la puce Crossbill et la puce Condor.

Source : https://www.ibm.com/quantum/blog/qdc-2024?social_post=sf207457441&sf207457441=1

D'autres articles ont été publiés sur le sujet. Ainsi, une équipe du MIT a pu établir **l'intrication quantique entre 2 cœurs quantiques supraconducteurs sur une distance de 6 cm**¹⁰³. Pour cela, l'équipe a utilisé un câble supraconducteur ainsi que plusieurs qubits surnuméraires pour assurer la transmission. La fidélité n'était que de 62% pour la génération d'états intriqués à 4 qubits, du fait des pertes de propagation et de la décohérence des qubits.

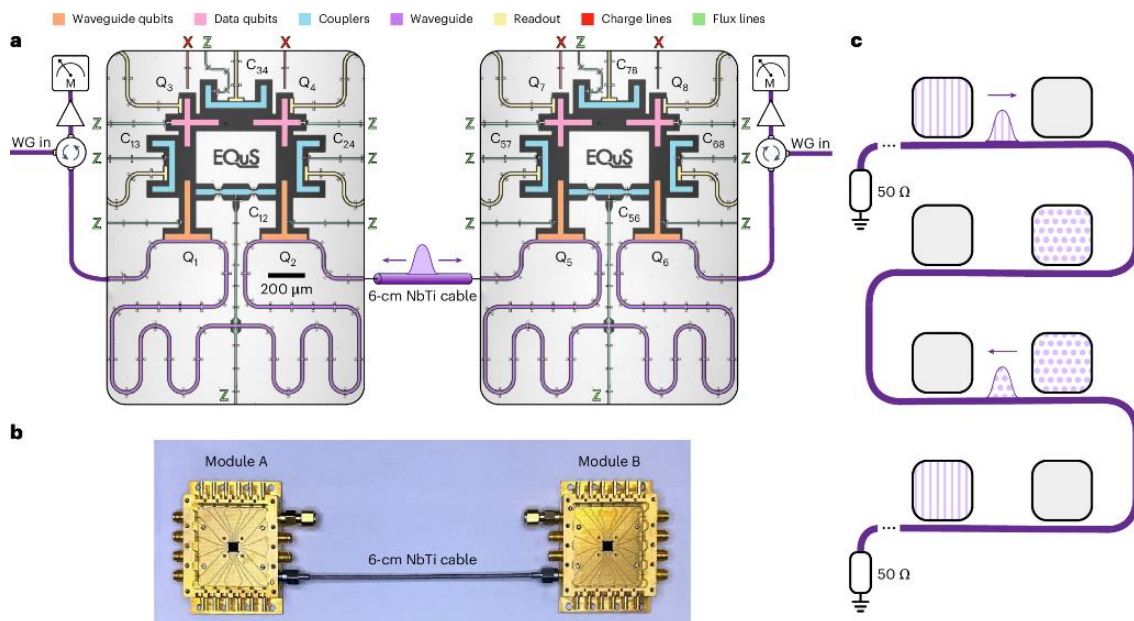


Figure 34 : Schémas et photo de 2 cœurs connectés par câble supraconducteurs NbTi. Source : ¹⁰⁴

Certaines technologies comme les ions piégés ou les atomes froids **ont l'avantage d'interagir nativement avec des photons visibles, compatibles avec les fibres optiques**. Ainsi, dans un autre article paru en février 2025 dans Nature, les auteurs ont mis en œuvre une téléportation quantique de portes CZ via une communication photonique entre 2 qubits à base d'ions piégés

¹⁰³ <https://www.nature.com/articles/s41567-025-02811-1>

¹⁰⁴ <https://www.nature.com/articles/s41567-025-02811-1>

situés sur des modules distants d'environ 2 mètres¹⁰⁵. La fidélité mesurée était de 86%. Ils ont aussi implémenté d'autres portes à 2 qubits, ainsi que l'algorithme de Grover de façon distribuée avec un taux de succès de 71% sur 500 répétitions.

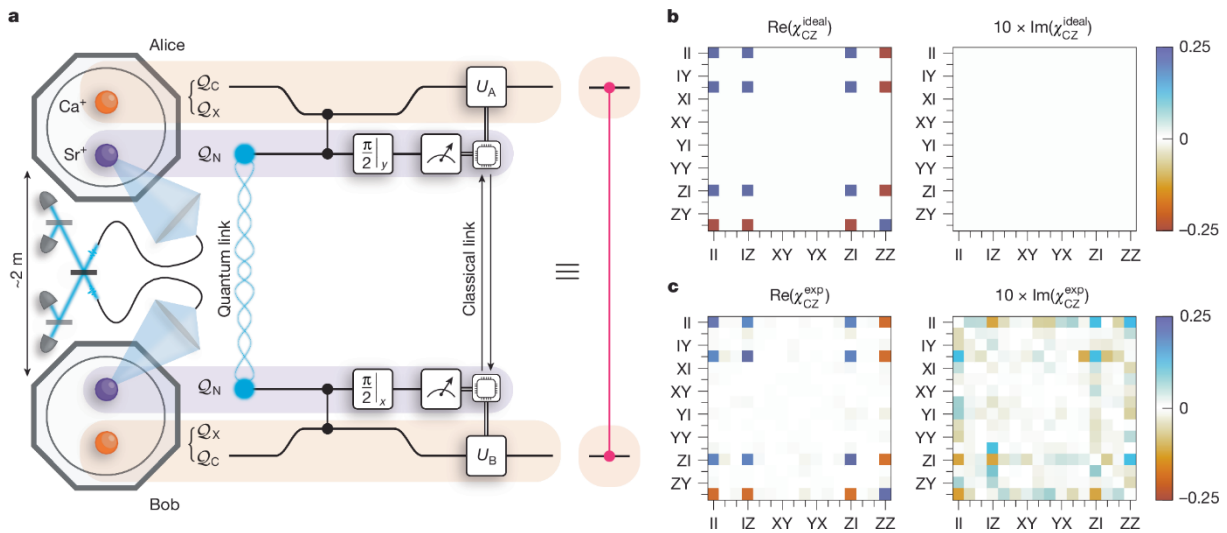


Figure 35 : Schéma de principe de la téléportation d'une porte CZ entre 2 QPUs distants de 2 m.

Source : ¹⁰⁶

La technologique des QPUs photonique, du fait de l'utilisation de photons comme source et vecteur d'information quantique, est à priori celle qui a nativement le plus de possibilités pour mettre en œuvre la communication entre cœurs. C'est aujourd'hui le pari de Xanadu avec son système Aurora, présenté plus haut. Cependant, même pour les technologies photoniques, limiter les pertes optiques lors du transport et générer une intrication entre 2 photons de façon déterministe et efficace sont encore des points durs à lever.

4.5 Mémoire quantique

Une des limitations qui avait été identifiée dans l'étude prospective Quantum 2042 était la mise au point d'une mémoire quantique. La notion même de mémoire quantique peut être l'objet d'interprétations différentes. Dans ce rapport, nous parlerons de mémoire quantique dans le cas d'un **système dédié permettant de stocker et récupérer des états quantiques pour une utilisation à la demande par des algorithmes quantiques**.

Les applications de la mémoire quantique sont nombreuses. Certains algorithmes quantiques complexes comme l'algorithme de Shor, nécessitent au sein de leur déroulement des ressources mémoires importantes. Le fait de permettre le stockage de données avant traitement est un élément clé pour développer et fiabiliser l'interface entre le monde classique et quantique. Enfin, l'interconnexion entre les processeurs quantiques peut nécessiter une sorte de « mémoire quantique tampon » pour synchroniser les 2 cœurs. En dehors du calcul quantique, une mémoire quantique serait probablement nécessaire pour le développement de la communication quantique à longue distance qui nécessitera des répéteurs quantiques.

¹⁰⁵ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08404-x>

¹⁰⁶ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08404-x>

Les verrous pour la mise au point d'une mémoire quantique sont sérieux. D'une part, il faut pouvoir préserver l'information quantique sur un temps suffisamment long, ce qui est en relation direct avec le temps de cohérence et la fidélité des qubits. D'autre part, il faut être capable d'écrire et de lire cette mémoire plus rapidement le temps de décohérence, à la demande, sans erreurs, le tout sans violer le théorème de non clonage des états quantiques.

Sur le temps de cohérence, les développements récents montrent des avancées significatives de certaines technologies en cours de développement comme à base de centres NV ou de spins nucléaires.

Pour la plupart des technologies, il sera nécessaire d'avoir une amélioration de la fidélité des qubits et de développer les algorithmes de corrections d'erreurs. On peut ainsi noter que **les technologies nécessaires au développement d'une mémoire quantique sont les mêmes que celles nécessaires au développement du FTQC**¹⁰⁷.

En termes de réalisations, on peut citer un article paru dans Physical Review en Avril 2024 sur la réalisation par une équipe chinoise d'une mémoire photonique¹⁰⁸. Les auteurs ont utilisé un nuage d'atomes de Rubidium 87 séparés en 12x12 zone, permettant le stockage de 72 qubits photoniques. Par ailleurs, la société française Weling a annoncé dans un communiqué de presse en mars 2025 le lancement de QDrive, une mémoire quantique à base d'atomes neutres¹⁰⁹¹¹⁰. Elle est présentée comme une solution facilitant l'interconnexion entre cœurs permettant un stockage sur des durées de 200 microsecondes avec une efficacité de stockage – récupération de 90%. Il faut cependant noter que ce communiqué n'est pas accompagné aujourd'hui d'une publication scientifique.

Le développement d'une mémoire quantique reste aujourd'hui un sujet controversé, et certains scientifiques pensent que c'est fondamentalement une impasse technologique¹¹¹. Malgré certains doutes, les recherches continuent dans le domaine, du fait de son importance pour la création de systèmes FTQC scalables¹¹².

4.6 Algorithmie

Le développement des premiers algorithmes quantiques de Grover et de Shor au milieu des années 90 a été le déclencheur de l'engouement autour du calcul quantique, en promettant des accélérations significatives pour la résolution de certaines classes de calcul par rapport aux méthodes classiques.

Cependant, les machines actuelles limitées en nombre de qubits, fidélité et temps de cohérence n'ont pas aujourd'hui les capacités pour implémenter et exécuter ces algorithmes phares sur des cas d'usages industriels. Par conséquent, les développements actuels en

¹⁰⁷ <https://medium.com/%40sidman/how-far-can-quantum-computing-go-without-quantum-memory-9451aa56e36f>

¹⁰⁸ <https://journals.aps.org/prx/pdf/10.1103/PhysRevX.14.021018>

¹⁰⁹ <https://weling.notion.site/Weling-Launches-Its-World-Record-Storage-Solution-for-Quantum-Computing-Scale-Out-1b497107255580d8b2e6c53f03f61057>

¹¹⁰ <https://thequantuminsider.com/2025/03/19/weling-launches-its-storage-solution-for-quantum-computing-scale-out/>

¹¹¹ <https://arxiv.org/pdf/2305.10310>

¹¹² <https://postquantum.com/quantum-networks/quantum-memories/>

algorithmie quantique tiennent compte de ces limitations et cherchent à réduire significativement le nombre d'opérations et de qubits nécessaire¹¹³.

Il faut rappeler que les ordinateurs quantiques ne peuvent travailler seuls et qu'il est nécessaire de les coupler avec un ordinateur classique. Une des voies est dans le développement d'algorithmes hybrides entre machines quantiques et les ordinateurs haute performance : ces algorithmes distribuent les tâches entre les HPC et CPU, le tout essayant de minimiser les effets de bords entre le monde classique et quantique.

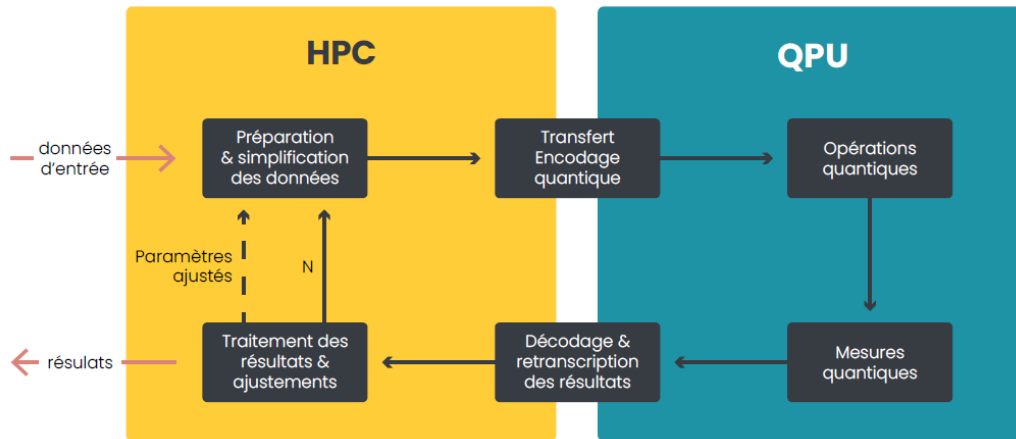


Figure 36 : Hybridation calculateur Haute performances (HPC) et processeur quantique (QPU)
Source : Quantum 2042¹¹⁴.

4.6.1 Approche quantique analogique

Comme expliqué dans le rapport Quantum 2042, il existe 2 approches pour le calcul quantique : les calculateurs quantiques analogiques et les ordinateurs à portes quantiques. Les calculateurs analogiques utilisent le principe de recuit quantique (annealing) : on initialise le système dans une configuration énergétique (formulations d'Ising) qui représente par analogie le problème à résoudre, puis on le laisse évoluer vers son état d'énergie minimum. On obtient alors théoriquement la solution recherchée.

Beaucoup de problèmes classiques peuvent ainsi être représentés et traités par cette approche¹¹⁵. Cependant, certains problèmes comme la factorisation ne peuvent pas être transcrits en modèle d'Ising. D'autres problèmes relativement simples peuvent mettre la méthode de recuit quantique en défaut.

Cette approche est portée par des sociétés comme D-Wave ou Pasqal. Dans le cas de D-Wave, la configuration et la connectivité des qubits est fixe, définie par la configuration des qubits supraconducteurs dans la machine. Les machines à atomes froids de Pasqal permettent quant à elles de définir (dans certaines limites) la configuration des qubits représentant le problème pour ensuite la mettre en œuvre avec des atomes froids.

¹¹³ <https://arxiv.org/pdf/2408.10907>

¹¹⁴ https://yspot.fr/wp-content/uploads/2024/04/rapport-public_quantum2042_numerique_avril2024.pdf

¹¹⁵ <https://arxiv.org/pdf/1302.5843v3>

Les limitations techniques actuelles (connectivité, nombre de qubits, fidélité, décohérence) sont aujourd’hui un frein significatif pour la mise en pratique de cette méthode sur des cas réels. De plus, plusieurs articles ont montré un intérêt limité, voir l’infériorité du recuit quantique par rapport à des solveurs classiques¹¹⁶¹¹⁷, ou même par rapport à une approche à porte¹¹⁸.

A notre connaissance, il n’y a pas aujourd’hui de publication démontrant une implémentation réussie ni d’utilisation récurrente du recuit quantique sur un cas d’usage industriel. On peut d’ailleurs remarquer que les approches analogiques sont considérées par leurs promoteurs comme une solution intermédiaire avant la mise au point de solutions à portes, comme semble l’indiquer les annonces de DWave¹¹⁹ ou de Pasqal¹²⁰.

4.6.2 Approche quantique à portes

Contrairement à l’approche analogique, les algorithmes à portes quantiques sont considérés comme une solution « universelle », qui devrait permettre de traiter l’intégralité des problèmes adressables en calcul quantique. Dans cette approche, les données encodées dans les qubits passent à travers une succession de portes logiques quantiques, qui représente l’algorithme quantique. A l’issue du processus, les mesures permettent d’obtenir le résultat de notre problème. A noter que la nature probabiliste de la mécanique quantique implique de répéter la même séquence plusieurs fois afin d’obtenir la réponse la plus probable.

4.6.2.1 Controverse sur l’utilité du NISQ

Pour rappel, les QPUs actuels sont des machines dites NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum Computer), qui utilisent des qubits « bruités ». A terme, les fabricants cherchent à développer des calculateurs dits FTQC (Fault Tolerant Quantum Computers) en implémentant des codes correcteurs d’erreurs sur un ensemble de qubits.

Il faut noter qu’aujourd’hui, une controverse est active sur l’utilité et les capacités des ordinateurs quantiques bruités NISQ. Certains auteurs sont ainsi très critiques quant aux capacités actuelles et futures du NISQ. Par ailleurs, les progrès concomitants des machines et algorithmes classiques peuvent réduire significativement l’utilité des algorithmes quantiques dans certains domaines. Certains chercheurs avancent que, si aucun démonstrateur d’intérêt industriel n’émerge d’ici quelques années, l’investissement dans les machines NISQ risque de détourner des ressources nécessaires à la recherche sur les FTQC.

D’autres scientifiques estiment que l’investissement en temps et en argent dans des machines NISQ est justifié pour développer des compétences, des algorithmes hybrides et des techniques de mitigation d’erreurs. Des auteurs ont une lecture plus optimiste des faits et, dans un article de Janvier 2025, ils présentent les « mythes » du calcul quantique NISQ et évaluent leurs pertinences¹²¹.

¹¹⁶ <https://arxiv.org/pdf/2409.05542>

¹¹⁷ <https://arxiv.org/pdf/2501.05253>

¹¹⁸ <https://arxiv.org/pdf/2406.01743>

¹¹⁹ <https://techcrunch.com/2021/10/05/d-wave-plans-to-build-a-gate-model-quantum-computer/>

¹²⁰ <https://www.pasqal.com/technology/roadmap/>

¹²¹ <https://arxiv.org/pdf/2501.05694v1>

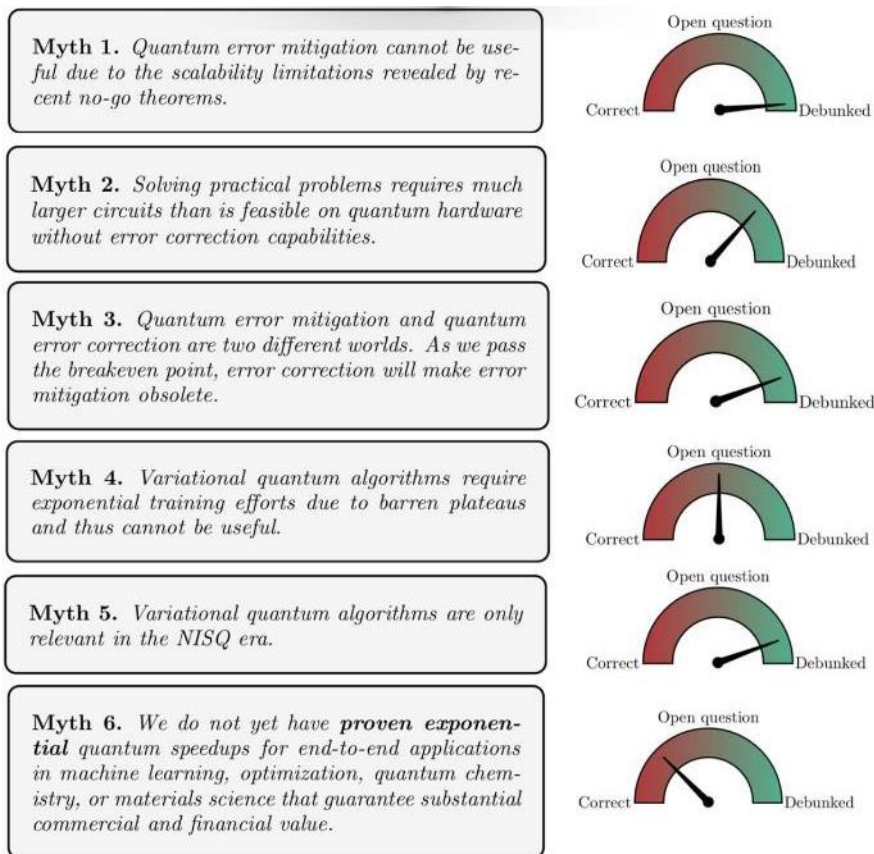


Figure 37 : « Mythes » sur calcul quantique NISQ & leur pertinence évaluée par les auteurs.

Source : ¹²²

Il apparait dans cet article que les auteurs ont une vision nuancée : des verrous ont été levés, des blocages sont confirmés, et certains points restent ouverts et débattus.

Les discussions actuelles sur ce sujet sont une raison supplémentaire pour avoir une approche active de la veille sur le calcul quantique, afin d'avoir la vision la plus à jour sur le sujet.

4.6.2.2 Synthèse des algorithmes quantiques

Pour les personnes qui aimeraient avoir un aperçu des capacités du calcul quantique, il était jusqu'alors assez difficile de s'y retrouver dans les multiples algorithmes quantiques développées ces dernières années.

Plusieurs équipes de recherche ont tenté de remédier à ce manque. On peut ainsi citer un article récent publié sur Arxiv en Juillet 2024 qui établit une typologie très exhaustive des algorithmes quantiques¹²³. Il présente les primitives et routines de bases utilisées par les différents types d'algorithmes. Les auteurs ont complété cet article par un ensemble de graphiques, un tableau et une carte mentale regroupant l'intégralité des algorithmes cités, le tout disponible sur GitHub¹²⁴.

¹²² <https://arxiv.org/pdf/2501.05694v1>

¹²³ <https://arxiv.org/pdf/2407.05178v1>

¹²⁴ <https://github.com/Evi-Ksn/Typology-of-Quantum-Algorithms>

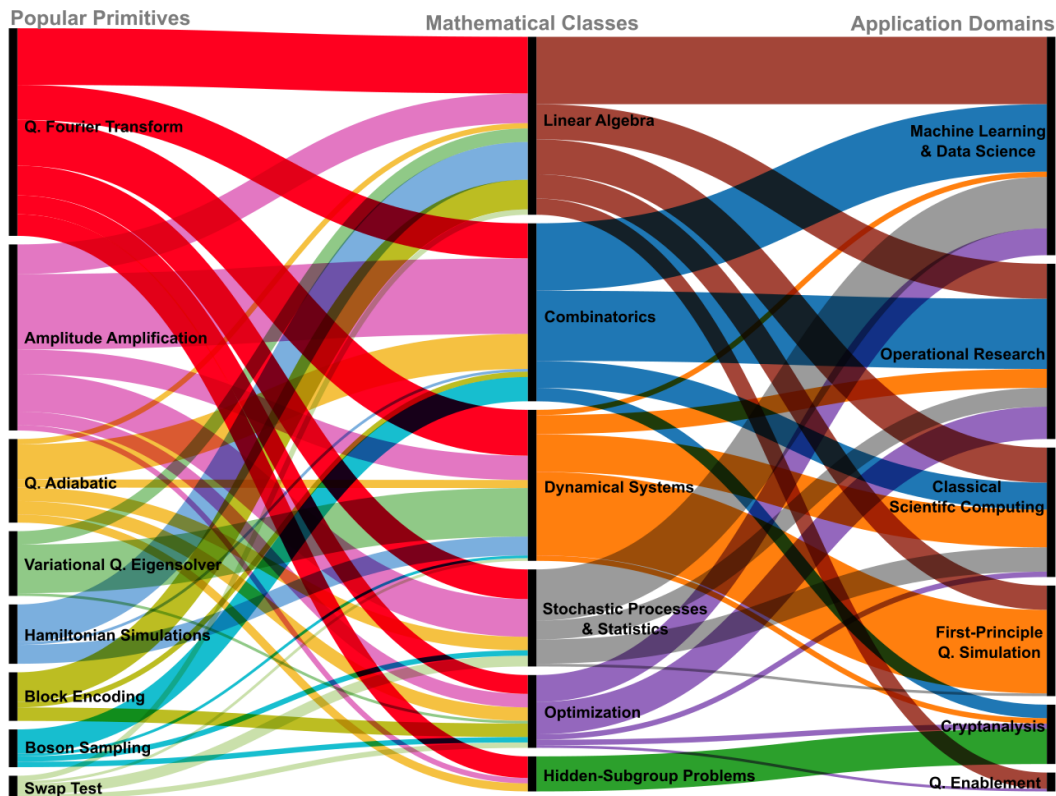


Figure 38 : Diagram « SanKey » montrant la corrélation entre les primitives quantiques, les classes de problèmes mathématiques et les domaines d'applications. Source : ¹²⁵

Dans un autre article publié en octobre 2023, les auteurs proposent une synthèse des algorithmes quantiques par le prisme des applications¹²⁶. C'est un complément au précédent article, qui détaille de façon approfondie les modèles mathématiques utilisés et la complexité d'un très grand nombre de problèmes mathématiques classiques. On peut enfin trouver dans la littérature récente certains articles plus focalisés sur des domaines précis, comme les algorithmes quantiques pour les applications scientifiques¹²⁷, ou des algorithmes dédiés à l'optimisation¹²⁸.

Grace à ces travaux académiques, il est aujourd'hui plus facile pour les personnes désirant explorer le calcul quantique pour leurs cas d'usage d'identifier le problème mathématique sous-jacent, de trouver des voies algorithmiques de résolution, de faire une première évaluation de la complexité de la tâche et éventuellement de se lancer sur une exploration.

4.6.2.3 Développements d'algorithmes spécifiques

De nombreux développements sont en cours en algorithmie quantique sur certaines applications très spécifiques. Il est très difficile de suivre l'ensemble des études, mais on peut remarquer que certains travaux se focalisent sur des problèmes que l'on considère comme difficile à traiter en calcul quantique.

¹²⁵ <https://arxiv.org/pdf/2407.05178v1>

¹²⁶ <https://arxiv.org/pdf/2310.03011>

¹²⁷ <https://arxiv.org/pdf/2312.14904>

¹²⁸ <https://arxiv.org/pdf/2312.02279>

Ainsi, lors de l'étude prospective Quantum 2042, nous avons évalué que certains problèmes resteraient hors de portée à court terme, comme la factorisation ou les équations différentielles.

Types de problèmes adressables *: taille du problème	SC1 LA PORTE ETROITE	SC2 EXTENSION DU DOMAINE	SC3 LES PORTES DU FTQC	SC4 LE SAUT QUANTIQUE
Optimisation	**	***	***	****
Simulation		*	**	**
QML	*	**	***	****
Recherche et adressage				*
Factorisation				
Equations différentielles				
Avantage de vitesse VS classique	<i>Linéaire</i>	<i>Jusqu'à polynomial</i>	<i>Jusqu'à super polynomial</i>	<i>Suprématie quantique</i>

Figure 39 : Problèmes adressables en fonction des scénarios prospectifs.

Source : Quantum 2042¹²⁹

Dans le cas des équations différentielles, les algorithmes variationnels hybrides classiques – quantique sont aujourd'hui une piste privilégiée par les développeurs. Un des acteurs sur le sujet est Colibri TD, dont l'algorithme H-DES vient d'être ajouté au catalogue des fonctions de Qiskit d'IBM¹³⁰¹³¹.

Dans un autre domaine, les approches développées par Qubit Pharmaceuticals¹³² pour les simulations chimiques de haute précision pour la recherche de nouveaux médicaments font l'objet de nombreuses publications récentes. La société travaille ainsi avec Pasqal sur le couplage de calculateurs quantique analogique et d'IA afin de réduire drastiquement le nombre de qubits nécessaire pour les simulations¹³³¹³⁴. Si ces résultats sont confirmés, cela permettrait d'anticiper l'apparition d'applications dans le domaine de la simulation chimique par rapport à nos prévisions précédentes.

Même l'algorithme de Shor, qui était lors de notre étude complètement hors de portée, semble plus accessible que prévu. Dans un article publié en mai 2025¹³⁵, Google revoit ainsi

¹²⁹ https://yspot.fr/wp-content/uploads/2024/04/rapport-public_quantum2042_numerique_avril2024.pdf

¹³⁰ <https://www.colibrityd.com/blogs-posts/quick-pde>

¹³¹ <https://docs.quantum.ibm.com/guides/colibrityd-pde>

¹³² <https://www.qubit-pharmaceuticals.com/>

¹³³ <https://www.scaleway.com/en/news/major-breakthrough-in-quantum-algorithms-qubit-pharmaceuticals-and-sorbonne-university-dramatically-reduce-the-number-of-qubits-needed-to-simulate-molecules/>

¹³⁴ <https://blog.qubit-pharmaceuticals.com/blog/qubit-pasqal-leveraging-analog-quantum-computing-for-drugdiscovery>

¹³⁵ <https://arxiv.org/pdf/2505.15917>

très significativement à la baisse le nombre de qubits physiques nécessaire pour casser les codes RSA 2048, passant de 20 millions en 2019 à moins de 1 million aujourd’hui.

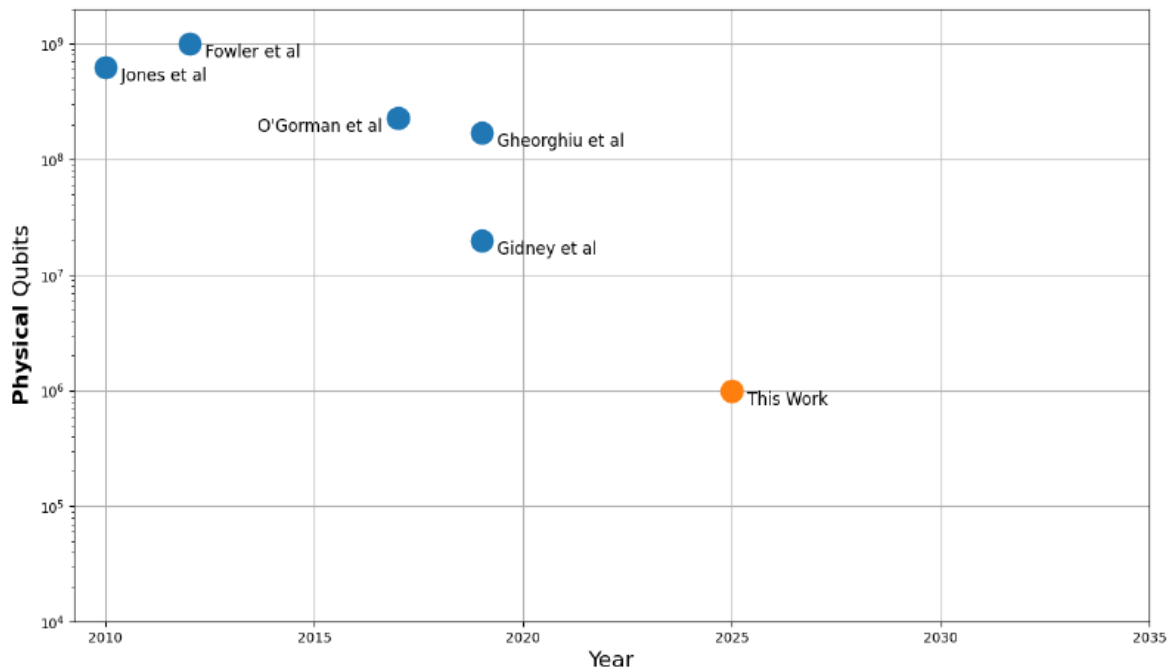


Figure 40 : Estimation du nombre de qubits physiques nécessaire pour factoriser un code RSA de 2048 bits. Source : ¹³⁶

Les améliorations proviennent de plusieurs sources comme l’utilisation de codes de surface, l’amélioration de l’allocation des qubits ancillaires, ou la réduction du nombre de portes de Toffoli nécessaire à l’algorithme.

Même si les avancées citées dans les articles précédents restent souvent théoriques et doivent encore être mises en œuvre sur des cas d’usage réels, elles montrent l’impact très important que peut avoir la recherche en algorithmie quantique. Une nouvelle approche innovante dans ce domaine peut ainsi rapidement rebattre les cartes de l’utilité et de la pertinence des ordinateurs quantiques sur certains domaines d’applications.

4.6.3 Approche « Quantum inspired » & réseaux de tenseurs

En parallèle du développement du calcul quantique, de nouvelles méthodes classiques se développent. Elles s’appuient sur la progression constante des matériels HPC et sont parfois inspirées des approches quantiques (Quantum Inspired). Une des approches les plus en pointe actuellement est le développement d’algorithmes à base de réseaux de tenseurs.

Un tenseur est un objet mathématique qui généralise les scalaires (0-tenseurs), vecteurs (1-tenseurs) et matrices (2-tenseurs) à des objets d’indices multiples. On représente graphiquement le tenseur par une forme quelconque dotée d’un nombre d’arêtes, égal à sa dimension, issues de cette forme.

¹³⁶ <https://arxiv.org/pdf/2505.15917>

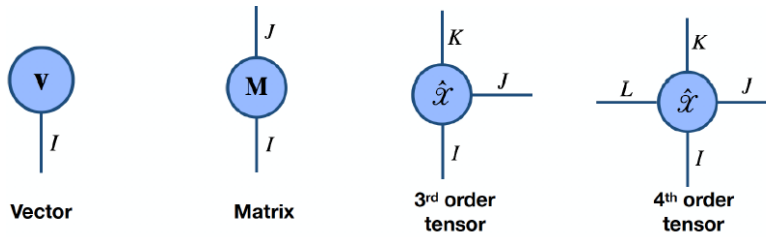


Figure 41 : Représentation de tenseurs. Source : ¹³⁷

Tout comme les vecteurs et les matrices qui peuvent être multipliés, il est possible d'appliquer aux tenseurs une opération élémentaire : la contraction. Cette opération consiste à multiplier les coefficients de 2 tenseurs et à sommer sur une paire d'indices fixés à l'identique. Lorsque l'on contracte de nombreux tenseurs entre eux, on obtient un réseau de tenseur.

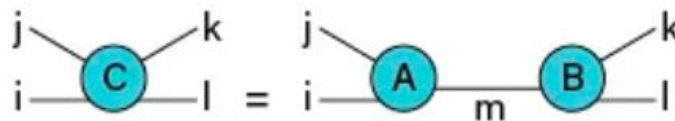


Figure 42 : Exemple de la contraction d'un tenseur C d'ordre 4 en un réseau de 2 tenseurs A et B d'ordre 3. Source : ¹³⁸

Les réseaux de tenseurs sont donc une représentation des vecteurs d'espaces de Hilbert de très grandes dimensions, applicables dans de nombreux problèmes de calcul intensifs, en intelligence artificielle et en calcul quantique. Il faut souligner que les circuits quantiques peuvent être représentés par un réseau de tenseurs.

En contractant un tenseur en un réseau de tenseurs, on réduit la dimension du problème. Cette opération se justifie lorsqu'il existe une certaine « localité » ou corrélations limitées dans le tenseur d'origine : la compression par réseau de tenseurs repose sur l'idée que la plupart des informations ne sont pas toutes nécessaires pour capturer la structure physique ou statistique du problème, grâce à des propriétés d'entropie limitée. Ainsi, les états quantiques avec des corrélations conditionnelles à courte portée peuvent être représentés et contractés de façon efficace¹³⁹.

Il est donc intéressant d'explorer les méthodes et les algorithmes permettant la contraction des réseaux de tenseurs tout en conservant son expressivité. C'est un travail de recherche toujours en cours, avec des avancées récentes. On peut ainsi citer l'algorithme Tensor Cross Interpolation (TCI) qui a fait l'objet en décembre 2024 d'une publication très détaillée, avec des exemples de codes et d'applications¹⁴⁰.

Les réseaux de tenseurs ont permis de faire de grandes avancées dans des problèmes complexes, comme le problème à N corps, qui était une cible naturelle pour l'application calcul

¹³⁷ <https://developer.download.nvidia.com/video/gputechconf/gtc/2019/presentation/s9733-role-of-tensors-in-machine-learning.pdf>

¹³⁸ <https://www.pourlascience.fr/sd/physique-theorique/reseaux-de-tenseurs-les-ordinateurs-classiques-contre-attaquent-26738.php#:~:text=Les%20r%C3%A9seaux%20de%20tenseurs%20sont%20un%20concurrent%20s%C3%A9rieux%20des%20ordinateurs,qui%20d%C3%A9crit%20le%20syst%C3%A8me%20%C3%A9tudi%C3%A9.>

¹³⁹ <https://arxiv.org/pdf/2410.23152>

¹⁴⁰ <https://arxiv.org/pdf/2407.02454>

quantique¹⁴¹. Cependant, certains auteurs entrevoyent des limites à cette approche¹⁴². Ainsi, les systèmes fortement intriqués présentant des corrélations à longues distances, ou certaines portes quantiques réalisant un déphasage de qubit (porte T) seraient difficiles à transcrire en réseau de tenseurs.

4.7 Benchmarking & comparaison des technologies

La diversité et la complexité du sujet rendent la comparaison entre les technologies quantiques très difficile. Le benchmarking, essentiel pour évaluer les performances des ordinateurs quantiques, est aujourd'hui un sujet de recherche en soi, qui mobilise plusieurs équipes dans le monde.

Dans un article publié sur Arxiv en mars 2025, on peut trouver une vue synthétique des différents métriques spécifiques utilisés en les segmentant en différentes catégories en fonction du niveau adressé : composants, système, logiciel, intégration HPC/Cloud ou application¹⁴³. Par ailleurs, l'article liste les différentes initiatives mondiales dans ce domaine. Il souligne la nécessité de standardiser les protocoles pour la reproductibilité et la comparabilité des résultats entre différents systèmes quantiques.

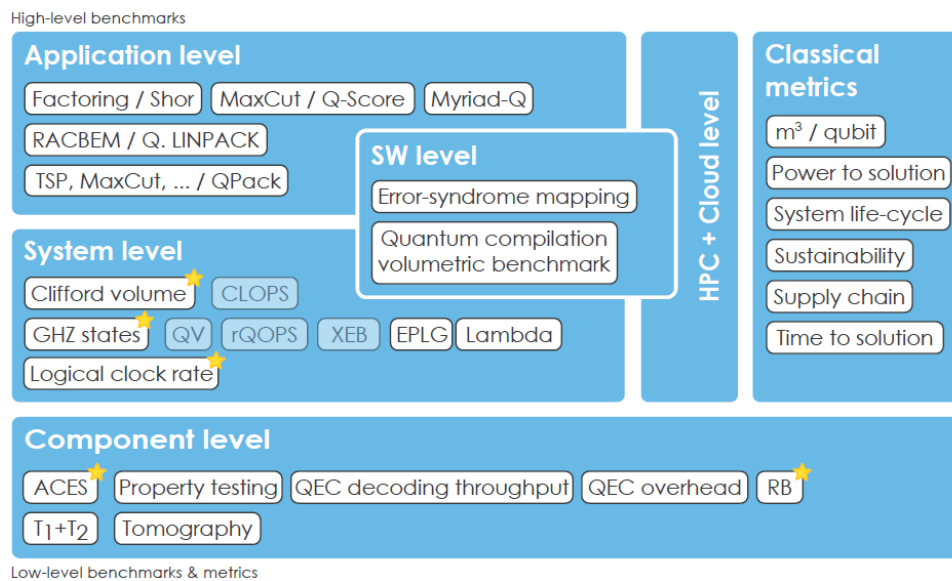


Figure 43 : Revue des différents benchmarks utilisé en calcul quantique.

Source : ¹⁴⁴

On peut aussi citer sur le sujet l'initiative Quantum Benchmark Zoo¹⁴⁵. Ce site internet mis en ligne en 2025 liste et met à jour régulièrement les différentes figures de mérites et

¹⁴¹ <https://www.pourlascience.fr/sd/physique-theorique/reseaux-de-tenseurs-les-ordinateurs-classiques-contre-attaquent-26738.php#:~:text=Les%20r%C3%A9seaux%20de%20tenseurs%20sont%20un%20concurrent%20s%C3%A9rieux%20des%20ordinateurs,qui%20d%C3%A9crit%20le%20syst%C3%A8me%20%C3%A9tudi%C3%A9.>

¹⁴² <https://www.pourlascience.fr/sd/informatique/ou-se-cache-l-avantage-quantique-26343.php>

¹⁴³ <https://arxiv.org/pdf/2503.04905>

¹⁴⁴ <https://arxiv.org/pdf/2503.04905>

¹⁴⁵ <https://quantumbenchmarkzoo.org/>

benchmarks quantiques. On peut aussi y trouver un ensemble de liens et de références, permettant d’avoir une vue d’ensemble sur le sujet.

Avant l’arrivée des machines quantiques, les équipes de recherche travaillent sur émulateur. Il en existe plusieurs, avec des performances qu’il est aussi nécessaire de comparer : c’est sur émulateur que l’on vérifie la pertinence d’un algorithme appliqué sur un cas d’usage. Ces émulateurs sont eux même en évolution constante, permettant de simuler de plus en plus de qubits. On peut ainsi trouver dans un article publié en Avril 2025 un benchmark de 7 émulateurs quantiques capable de traiter plus de 100 qubits, testé sur 13 types de circuits issus d’une bibliothèque spécifique sur le sujet, MQTBench, en les classant via un score ELO¹⁴⁶.

emulator	Elo Average	Std
MIMIQ-MPS	1,529	16
Qiskit-MPS	1,435	40
QMatchaTea-MPS	1,241	34
Quimb-MPS	1,132	51
Pyqrack	1,030	51
MQT-DDS	1,026	55
Quimb-TN	1,005	37

Figure 44 : Score ELO et déviation standard d’émulateurs sur 13 types de simulations et 200k séquences randomisées. Source : ¹⁴⁷

Dans cet article, on peut lire que 8 émulateurs peuvent traiter fidèlement certains problèmes jusqu’à 1024 qubits. La scalabilité des différentes solutions est aussi évaluée, montrant une évolution polynomiale du temps d’exécution sur une large gamme de circuits, même au-delà de 100 qubits. Il est intéressant de voir qu’avec la progression des matériels classiques et des algorithmes, il est possible de simuler de plus en plus de qubits, questionnant parfois l’utilité des machines quantiques pour certaines applications.

4.8 Avancement dans les scénarios prospectifs

Au vu des informations que nous avons collectées lors de notre veille sur les 18 derniers mois, les conclusions de l’étude prospective Quantum 2042 sont toujours d’actualité :

- Malgré les avancées significatives sur le nombre de qubits, il n’y a pas à ce jour de machine accessible pour le grand public offrant un accès à plus de 1000 qubits intriqués.
- Actuellement, aucune technologie ne se démarque sensiblement et chacune a ses avantages et ses inconvénients. Pour l’ensemble des partenaires, il est impossible de définir aujourd’hui quelle sera la technologie gagnante pour le calcul quantique de demain
- Il faut noter l’accent mis par les groupes de recherche sur l’amélioration de la fidélité des qubits, sur l’interconnexion de cœurs et sur la mise en œuvre des codes correcteurs d’erreurs, qui ont débouchés ces derniers mois sur des avancées tangibles.

¹⁴⁶ <https://arxiv.org/pdf/2504.14027>

¹⁴⁷ <https://arxiv.org/pdf/2504.14027>

- Si dans les prochains mois ou années, ces développements sur la fidélité et la correction d'erreurs sont reproduits et améliorés, le scénario 2 « Extension du Domaine du Quantique – Large NISQ & Analogique » deviendrait de moins en moins probable.
- Parallèlement, avec l'avancée sur les réseaux de tenseurs et technologies classiques, les émulateurs quantiques améliorent leurs capacités. C'est une opportunité qui permet aux utilisateurs de tester des problèmes sérieux avant l'avènement des ordinateurs quantiques. Cependant, les mêmes développements technologiques sont aussi en compétition avec le calcul quantique, car utilisés pour développer des approches concurrentes, comme la compression de réseau de tenseurs.
- Dans tous les cas, les différentes annonces & publications des derniers mois ont montré la nécessité de maintenir une veille régulière permettant d'analyser avec méthode et un certain recul les avancées en calcul quantique et des technologies connexes.

5 Les cas d'usages – Nouveaux développement 2024-2025

Au cours de notre veille au sein du Hub quantique, nous avons parfois pu identifier des publications montrant des utilisations de calculateurs quantiques dans des applications variées. Dans les chapitres suivants, nous présentons ces articles.

5.1 Chimie, Santé, Pharmaceutique et associés

Dans l'étude Quantum 2042, nous avons identifié la chimie et la santé comme les marchés où le calcul quantique devrait avoir le plus grand impact. Il est donc normal de voir un nombre considérable de publications sur le sujet, miroir des efforts déployés par la communauté pour adresser ces sujets majeurs. Certaines sociétés, comme Qubits Pharmaceuticals déjà citée plus haut¹⁴⁸, travaillent uniquement sur ce domaine d'application.

En Septembre 2024, Microsoft a publié un article sur la simulation quantique d'un système chimique de bout en bout¹⁴⁹. Elle a pour cela utilisé une approche hybride combinant HPC, IA et le QPU à ions piégés H1 de Quantinuum. Cette machine a été configurée avec 13 qubits physiques, utilisés pour encoder 2 qubits logiques afin d'améliorer la précision.

Dans un autre article publié par IBM en collaboration avec la Cleveland Clinic et l'Université du Michigan, des dimères d'eau et de méthane ont été simulés pour modéliser respectivement les interactions hydrophiles et hydrophobes¹⁵⁰.

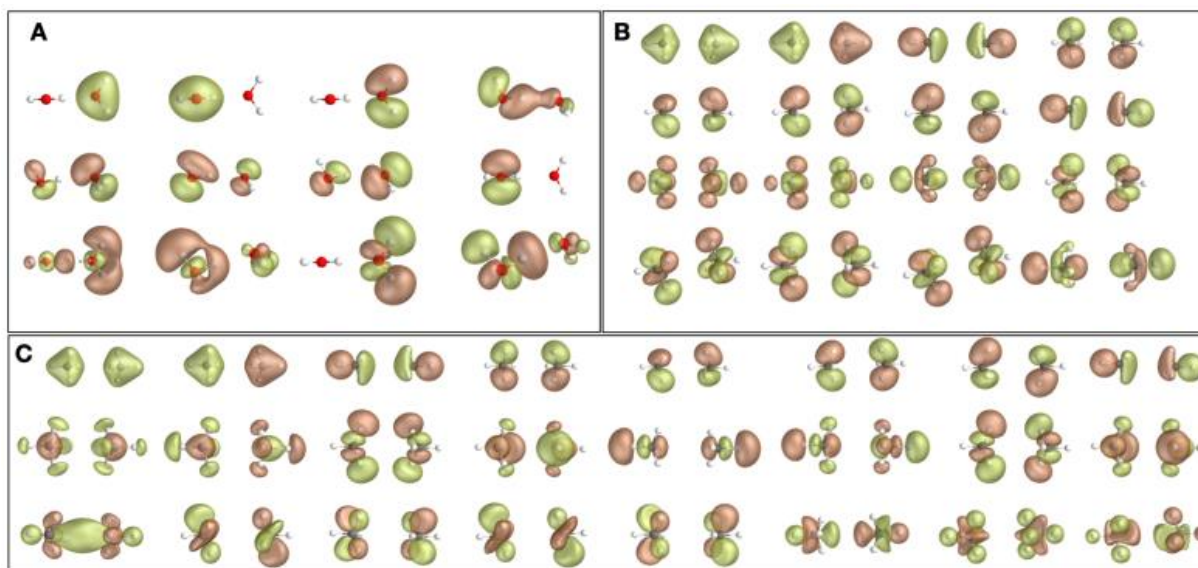


Figure 45 : Espaces actifs utilisés

A : 16 électrons et 12 orbitales d'un dimère d'eau.

B : 16 électrons et 16 orbitales d'un dimère de méthane.

C : 16 électrons et 24 orbitales d'un dimère de méthane. Source : ¹⁵¹

¹⁴⁸ <https://www.qubit-pharmaceuticals.com/>

¹⁴⁹ <https://arxiv.org/pdf/2409.05835>

¹⁵⁰ <https://arxiv.org/pdf/2410.09209>

¹⁵¹ <https://arxiv.org/pdf/2410.09209>

La méthode utilisée était une méthode hybride classique – quantique de diagonalisation quantique basée sur des échantillons, utilisant des processeurs supraconducteurs Eagle d’IBM. Les résultats semblent encourageants, avec une précision comparable aux standards classiques. Il faut cependant souligner que ces molécules sont très petites, et que la portée de ce calcul est donc assez limitée.

Un autre axe de recherche est l’utilisation couplé de technologie d’IA et de calcul quantique, souvent nommé Quantum Machine Learning, dont les différentes approches et le potentiel pour les applications santé et pharmaceutiques sont présentés dans cet article de Septembre 2024¹⁵². La mise en œuvre d’une architecture de réseau de neurones quantiques reste cependant extrêmement complexe, du fait des limitations en connectivité et en performances des machines actuelles. Les auteurs sont néanmoins confiants quant à l’amélioration des capacités des machines quantiques qui devrait permettre à moyen terme de dépasser les limitations actuelles.

5.2 Finance (banque, assurances)

Avec la santé, la finance est le secteur qui pourrait être impacté le premier par l’arrivée du calcul quantique. De nombreuses études ont déjà été lancées par plusieurs grands groupes afin d’utiliser les capacités du calcul quantique pour la finance, et de nombreux cas d’usages ont été identifiés.

On trouvera dans l’article « A Survey of Quantum Computing for Finance » de Juin 2022 disponible sur Arxiv un résumé extensif et référencé de l’état de l’art des algorithmes quantiques pour les applications financières, ainsi qu’une présentation complète des cas d’usages envisagés ¹⁵³. Les auteurs concluent qu’aujourd’hui, les calculateurs quantiques ne sont pas encore capables de traiter un cas d’usage financier réel plus efficacement qu’avec des ordinateurs classiques. Cependant, ils sont confiants quant à l’avancée de la technologie et à la démonstration prochaine d’un avantage quantique dans le domaine de l’optimisation de portefeuille, l’évaluation des produits dérivés, l’évaluation des risques ou la détection de fraudes.

Dans un autre article plus récent, dans lequel Quantinuum et HSBC ont contribué, les auteurs explorent l’utilisation des routines de Monte Carlo quantique pour des applications d’optimisation financière, en les comparant à leur équivalent classique.¹⁵⁴ Les auteurs montrent une possibilité d’accélération quadratique des calculs, mais uniquement si les erreurs générées lors des opérations quantiques restent sous un certain seuil. Ils proposent une approche hybride mêlant les approches Monte Carlo classique et quantique pour obtenir le meilleur des 2 mondes.

¹⁵² <https://arxiv.org/pdf/2409.15645>

¹⁵³ <https://arxiv.org/pdf/2201.02773>

¹⁵⁴ <https://arxiv.org/pdf/2410.03926>

5.3 Physique, Recherche fondamentale

La physique et la recherche fondamentale ont beaucoup à gagner à l'avènement du calcul quantique. Plusieurs études explorent ainsi les possibilités offertes par les QPUs.

Dans un article paru en Aout 2024¹⁵⁵, un panel d'experts présente une feuille de route pour l'intégration de l'informatique quantique dans la physique des hautes énergies. Il vise à identifier des cas d'usage pertinents pouvant être abordés dès aujourd'hui avec du matériel NISQ (≈ 100 qubits, quelques milliers de portes deux-qubits). Il couvre la simulation en temps réel de théories de jauge et d'oscillations neutrino (combat au "sign problem"), des applications de machine learning quantique pour la détection de signaux rares et le clustering de jets, la génération quantique d'événements et la reconstruction de trajectoires via des QUBO et des VQA.

Les auteurs soulignent un potentiel prometteur pour les calculs dynamiques non perturbatifs (collisions, brisure de corde) et encouragent la réalisation de démonstrations pratiques sur les plateformes existantes pour préparer l'avantage quantique à moyen terme.

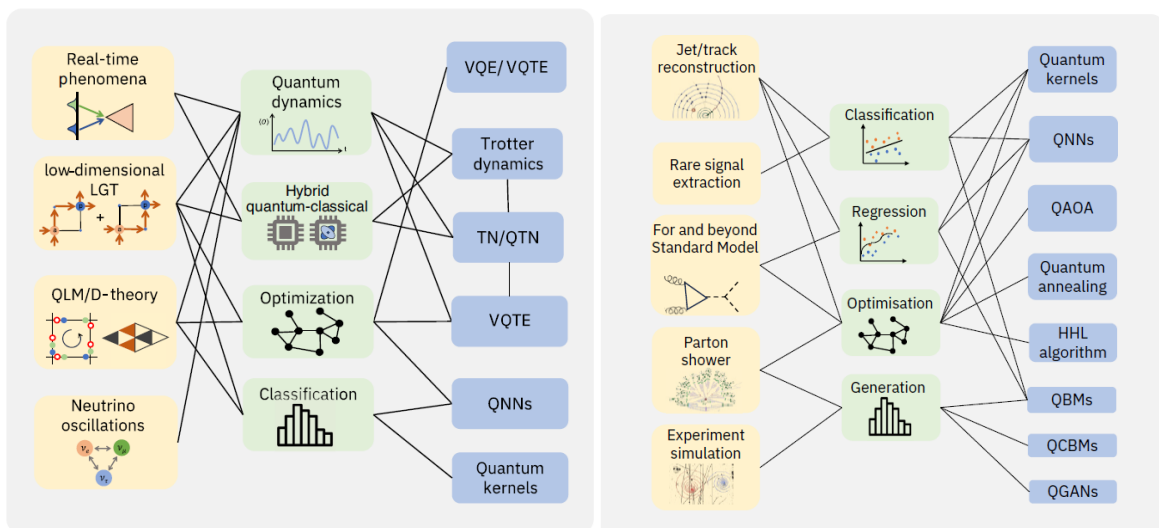


Figure 46 : Modèles de physique théorique proposé (Jaune) avec l'approche mathématique correspondante (vert) et les algorithmes quantiques (bleus). Source : ¹⁵⁶

Le problème à N Corps est un autre sujet de physique théorique très difficile à adresser en calcul classique avec nombreuses applications en physique de la matière condensée, en chimie quantique ou en optimisation combinatoire. Les calculateurs quantiques offrent une nouvelle approche pour résoudre ces problèmes, potentiellement plus efficace que les méthodes classiques, car « nativement compatible » avec les capacités du calcul quantique.

Un autre article récent paru dans les comptes Rendus Physique de l'Académie des Sciences présente ainsi une comparaison détaillée des approches classiques et quantiques appliquées aux problèmes à N Corps¹⁵⁷. L'auteur propose ainsi une approche hybrides réseau de tenseurs

¹⁵⁵ <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.5.037001>

¹⁵⁶ <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.5.037001>

¹⁵⁷ <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/articles/10.5802/crphys.229/>

/ calculateur quantiques pour adresser le problème. L'auteur est optimiste quant à l'avenir des calculateurs quantiques, mais confirme que les machines NISQ actuelles sont largement dominées par les algorithmes classiques.

5.4 Energie

Les systèmes énergétiques ont des problématiques d'allocations d'énergies, de partages des coûts et d'équilibrage de réseaux, qui sont des problèmes d'optimisation combinatoire très complexes avec l'augmentation du nombre de points de connexion. De nombreux énergéticiens explorent donc les capacités du calcul quantique pour trouver des solutions plus rapidement et/ou plus efficacement qu'avec des méthodes classiques.

Un exemple dans la littérature récente est l'expérience menée par EON pour l'allocation équitable des coûts d'exploitation du réseau électrique sur un marché en réseau pair à pair¹⁵⁸. 3 approches ont été comparées : optimisation classique (Gurobi), heuristiques classiques (Simulated Annealing, Tabu Search) et optimisation quantique (Quantum Annealing sur une machine D-Wave). On y montre qu'actuellement, les solveurs classiques sont meilleurs que les méthodes quantiques pour la qualité des solutions, surtout pour les réseaux complexes. Les solutions quantiques actuelles nécessitent des qubits physiques supplémentaires et un matériel plus robuste pour être compétitives.

D'autres exemples se rattachent à l'électrification des usages et au développement des véhicules électriques. On trouve ainsi dans cet article sur l'optimisation quantique plusieurs exemples : la planification pour la charge des voitures électriques dans un parking, la charge et la décharge des véhicules, ou encore l'optimisation de la livraison d'énergie en tenant compte du stockage sur batterie.¹⁵⁹

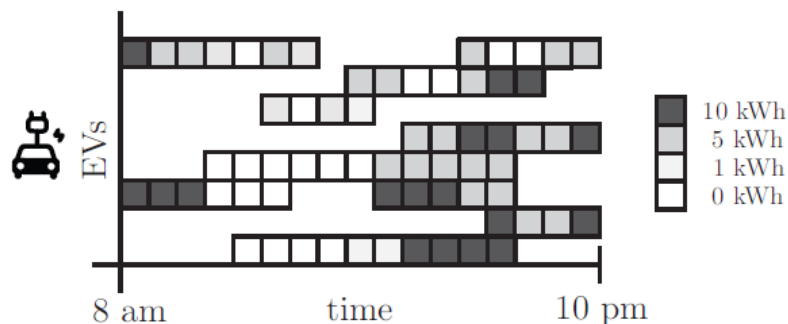


Figure 47 : problème de la planification de la charge de véhicules électriques dans un parking.
Source : ¹⁶⁰

¹⁵⁸ <https://arxiv.org/pdf/2501.05253>

¹⁵⁹ <https://arxiv.org/pdf/2312.02279>

¹⁶⁰ <https://arxiv.org/pdf/2312.02279>

5.5 A la recherche de l'avantage quantique

5.5.1 Multiplications des publications et des annonces

De nombreuses expérimentations sont toujours en cours au sein des centres de recherches académiques et industriels, avec pour objectif commun de démontrer un avantage de l'ordinateur quantique par rapport aux méthodes classiques. Pour mémoire, cet avantage peut être en rapidité, en précision de calcul ou en consommation énergétique¹⁶¹.

Les cas d'usages cités précédemment ne sont qu'un échantillon très réduit d'études applicatives. Le nombre de publications dans le domaine du calcul quantique est très important, de l'ordre de la centaine de publications par jours sur Arxiv. Ce nombre est en croissance constante, témoignant du foisonnement de la recherche dans le domaine, et inclus de plus en plus d'articles sur les cas d'usages. Ces articles sont parfois accompagnés d'une campagne de communication massive, simplifiant parfois à outrances les résultats des recherches

5.5.2 Cadre d'analyse des cas d'usages

O. Ezratti propose dans son ouvrage¹⁶² et sur son site¹⁶³ un cadre très pertinent permettant d'analyser de façon objective les cas d'usages, basé sur 7 critères :

- **Dimensionnement du problème** : Le cas d'usage traite-t-il des données et paramètres correspondant à des besoins réels ou seulement à des prototypes miniaturisés ? La plupart des études publiées utilisent des jeux de données de petite taille qui ne reflètent pas les exigences industrielles réelles
- **Estimations de ressources** : Tout bon cas d'usage doit expliciter les ressources quantiques et classiques nécessaires pour atteindre l'avantage quantique. Cela inclut le nombre de qubits, leur fidélité, la profondeur des circuits et les ressources classiques pour la préparation des données, la post-correction d'erreurs et les traitements associés.
- **Nature de l'avantage quantique** : accélération en vitesse, amélioration de la qualité des résultats, efficacité énergétique. Chaque type d'avantage nécessite une validation différente.
- **Comparaison classique honnête** : Les meilleurs algorithmes classiques actuels doivent servir de référence, pas des approches obsolètes. Cette comparaison doit intégrer le coût total (matériel, énergie, développement).
- **Progrès algorithmique** : Y a-t-il une réelle innovation algorithmique ou une simple transposition de méthodes existantes ? Les vrais innovations pour la résolution de cas d'usages reposent sur des algorithmes quantiques fondamentalement différents.
- **Nature des qubits et fidélités** : Les estimations doivent préciser le type de qubits considérés (supraconducteurs, ions piégés, atomes froids, photons) et les fidélités requises. Ces paramètres influencent drastiquement la faisabilité

¹⁶¹ <https://yspot.fr/etude-quantum-2042/>

¹⁶² <https://www.oezratty.net/wordpress/2025/understanding-quantum-technologies-2025/>

¹⁶³ <https://www.oezratty.net/wordpress/2023/a-framework-to-analyze-quantum-computing-case-studies/>

- **Documentation scientifique** : Un cas d'usage doit obligatoirement s'accompagner de publications scientifiques évaluées par les pairs.

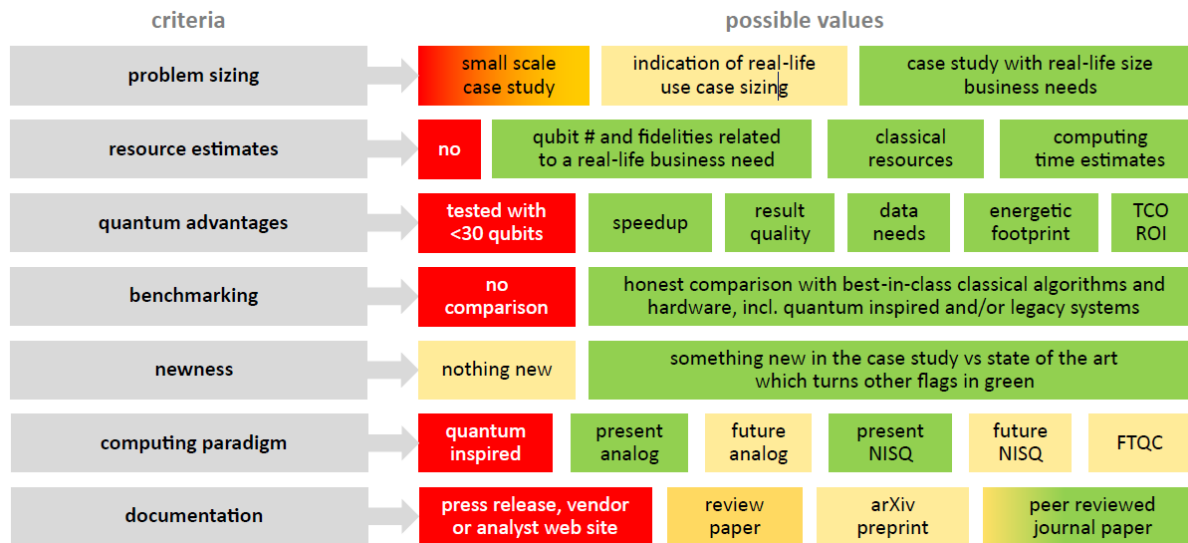


Figure 48 : Cadre de référence pour l'analyse des cas d'usages quantique. Les points rouges sont des lacunes majeures qui rendent l'étude inappropriée pour démontrer un avantage quantique. Les points oranges représentent des situations intermédiaires mais ne constituent pas des blocages majeurs. Les points verts indiquent un cas d'usage crédible. Source : O. Ezratty

Ce cadre permet tout à chacun d'identifier rapidement les articles et annonces qui relèvent plus de la communication que de l'avancée scientifique et technique.

5.5.3 Etat des lieux en Juin 2025

En Juin 2025, il n'y a pas eu à notre connaissance de démonstration publiée et validée par la communauté scientifique d'un avantage quantique sur un cas réel d'applications. Si tel avait été le cas, l'écho de cette publication aurait été tel qu'il n'aurait pas été possible d'y échapper, malgré le manque d'exhaustivité de notre approche.

Cependant, comme nous l'avons souligné tout au long de ce rapport, des progrès significatifs ont été réalisés très rapidement dans de nombreux domaines : nombres de qubits, fidélité, correction d'erreurs, etc... Ceci laisse espérer **qu'une démonstration d'avantage quantique pourrait être réalisée** sur un domaine spécifique (finance, simulation chimique simple, optimisation logistique) dans un futur relativement proche, **d'ici 2 et 5 ans.**

6 Conclusions

1. Un écosystème en mouvement, des fondamentaux inchangés

Dix-huit mois après la publication de l'étude prospective Quantum 2042, le paysage du calcul quantique a connu des évolutions notables sans pour autant remettre en cause les conclusions fondamentales de notre analyse initiale. **Le calcul quantique reste une technologie prometteuse mais immature.**

Les quatre scénarios prospectifs définis en 2024 demeurent pertinents. **Le seuil symbolique des 1 000 qubits physiques a certes été franchi** par plusieurs acteurs et avec des technologies différentes, mais la fidélité de ces systèmes reste insuffisante pour des calculs utiles à grande échelle. Aucune machine commerciale n'offre aujourd'hui un accès à plus de 1 000 qubits pleinement intriqués et exploitables.

2. Pluralité technologique

Notre analyse confirme qu'**aucune technologie de qubits ne se démarque définitivement** à ce stade. Les supraconducteurs conservent une avance en maturité, mais les atomes neutres ont démontré une scalabilité impressionnante. Les ions piégés affichent les meilleures fidélités, tandis que les semi-conducteurs promettent une intégration industrielle facilitée par la compatibilité CMOS. La photonique mise sur des architectures modulaires originales. En parallèle, de nouvelles technologies comme les centres NV ou les spin nucléaires sortent des laboratoires pour apporter des solutions possibles aux problèmes fondamentaux de fidélité ou de durée de vie.

Cette **coexistence des technologies** devrait perdurer dans les années à venir, sauf rupture scientifique majeure. Pour les industriels, cela implique de maintenir une veille pluri technologique et d'éviter de parier trop tôt sur une seule approche.

3. Des avancées techniques significatives sur les verrous clés

La période 2024-2025 se distingue par une **intensification remarquable des efforts sur la correction d'erreurs quantiques**, le verrou critique identifié dans notre étude comme la condition nécessaire au passage vers le FTQC. Plusieurs démonstrations méritent d'être soulignées :

- **Google Willow** a montré qu'augmenter la taille du code de surface pouvait réduire le taux d'erreur logique, validant expérimentalement le principe de la correction d'erreurs.
- **Atom Computing et Microsoft** ont démontré l'intrication de 24 qubits logiques à partir de 112 qubits physiques avec une fidélité de 99,6%, illustrant la faisabilité de systèmes modulaires.
- La puce **Ocelot d'AWS** explore une voie hybride combinant qubits de chat et transmons pour simplifier l'architecture de correction.

Ces résultats, s'ils se confirment et s'améliorent dans les prochains mois, pourraient **rendre le scénario 2 moins probable**, en ouvrant potentiellement **un chemin plus direct vers le scénario 3**.

Par ailleurs, de nouveaux développements sont en cours sur l'interconnexion quantique, sur la mémoire quantique : ce sont des verrous clés majeurs qu'il faudra dépasser pour débloquer à terme tout le potentiel du calcul quantique.

4. Une compétition classique-quantique qui s'intensifie

Parallèlement aux progrès du matériel quantique, **les méthodes classiques de simulation ne cessent de progresser**. Les réseaux de tenseurs ont permis de résoudre en quelques heures sur des machines classiques des problèmes que D-Wave prétendait nécessiter un million d'années, et ont remis en perspective plusieurs revendications de suprématie quantique, y compris celles de Google.

Cette dynamique crée **une cible mouvante pour l'avantage quantique** : chaque progrès des calculateurs quantiques doit être comparé aux avancées concomitantes des méthodes classiques, qu'il s'agisse des réseaux de tenseurs, du HPC ou de l'intelligence artificielle. **Cette compétition**, loin d'être un obstacle, stimule l'innovation des deux côtés et **produit des outils utiles pour les utilisateurs industriels dès aujourd'hui**.

5. Recommandations pour les organisations

Au regard de cette mise à jour, nous réitérons et précisons les recommandations formulées dans Quantum 2042 :

- **Maintenir une veille active et critique** face aux annonces. L'écart entre communication marketing et réalité technique reste important. Les métriques de performance (nombre de qubits, fidélité, qubits logiques) doivent être analysées avec rigueur et en contexte.
- **Développer les compétences internes** en algorithmie quantique et hybride. La reformulation des problèmes métiers en termes quantiques est un travail de long terme qui doit débiter le plus rapidement possible.
- **Expérimenter sur les plateformes disponibles**, qu'elles soient quantiques ou classiques pour préparer les cas d'usage et identifier les problèmes pertinents.
- **Ne pas attendre le FTQC pour agir**. Les approches hybrides classique-quantique et les méthodes quantum-inspired offrent déjà des opportunités d'apprentissage et dans quelques cas de la valeur ajoutée.

6. Perspectives : une fenêtre d'observation critique

Les prochaines années seront décisives pour évaluer la crédibilité des feuilles de route des acteurs majeurs. Les annonces de **qubits logiques fonctionnels d'ici 2026-2027 constitueront des points d'inflexion majeurs à surveiller**.

Si ces jalons sont atteints, la trajectoire vers le scénario 3 (ouverture des portes du FTQC) deviendra plus probable, avec des implications significatives pour les secteurs identifiés comme prioritaires : chimie, santé, finance et recherche fondamentale. Dans le cas contraire, le scénario 2 d'un NISQ optimisé coexistant avec l'analogique resterait l'horizon le plus vraisemblable à 2042.

Le calcul quantique n'est ni une révolution imminente ni une chimère. C'est une technologie en construction, dont la maturation nécessite encore des ruptures scientifiques et techniques. Le rôle du Hub Quantique CEA est précisément d'accompagner les industriels dans cette phase d'incertitude, en leur fournissant une analyse factuelle et régulièrement mise à jour des évolutions du domaine.

7 ANNEXES

7.1 ANNEXE 1 : Glossaire du calcul quantique

Les principaux termes utilisés dans ce rapport font l'objet d'une proposition de définition ci-dessous. 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.

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...

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).

Calculateur analogique : catégorie de calculateurs quantiques résolvant des problèmes par analogie avec le comportement d'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.

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.

Fidélité / taux d'erreurs : la fidélité d'un ordinateur quantique désigne sa robustesse face aux différents types d'erreur pouvant affecter la cohérence des qubits et l'application de portes logiques. Les constructeurs communiquent généralement sur les taux d'erreurs de portes à 1 ou 2 qubits, ou sur la mesure (*exprimés 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 calculateur sur un calcul donné. Par exemple, on dit d'un calculateur 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 universel, 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.

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. Cette propriété constitue avec la superposition quantique l'une des explications fondamentales de la supériorité théorique du calcul quantique par rapport aux méthodes classiques pour traiter des problèmes particulièrement complexes.

Mitigation d'erreurs : méthode visant à garder un sens aux résultats lors de la mise en œuvre d'un algorithme sur un calculateur 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-bruité¹⁶⁴.

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.

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 (qubits de chat d'Alice&Bob) 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 1 000. Celle-ci peut regrouper au sein des scénarios différentes configurations selon les technologies qubits. Par exemple, pour 100 qubits logiques on pourrait avoir besoin d'environ 3 000 qubits physiques de chat, ou de 100 000 qubits supraconducteurs type IBM.

¹⁶⁴ C'est notamment l'approche d'IBM : <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06096-3>

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.

Qubit physique (QPB) : Unité d'information dont le support physique est un système quantique à deux états superposables et intriquables avec d'autres qubits. Les jalons de nos scénarios supposent que les qubits physiques sont tous intriquables entre eux. Ce n'est aujourd'hui pas le cas dans les annonces des constructeurs : le nombre de qubits physiques réellement intriquables 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 affecté par différents types d'erreurs et par la décohérence quantique, le qubit logique se caractérise par une stabilité et une fidélité idéale, permettant d'appliquer des algorithmes sans contrainte de profondeur de circuit. 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 basent¹⁶⁵. 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 l'espace en fondu rouge/noir. On pourrait ainsi obtenir dans nos premiers scénarios des démonstrateurs de plusieurs qubits logiques sans pour autant qu'ils permettent d'atteindre le FTQC.

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

¹⁶⁵ https://www.theregister.com/2023/02/22/google_milestone_quantum/

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. Il s'agit d'un sous-ensemble de l'avantage quantique de vitesse. La suprématie quantique est donc un critère relatif aux différents usages du calcul quantique.

VLSQ (Very Large Scale Quantum Computer) : sous-catégorie du FTQC, désignant des calculateurs à portes composés de milliers de qubits logiques. Il s'agit donc d'un FTQC ayant réussi la montée en échelle, tant en matière d'implantation des codes correcteurs que de la chaîne de commandes. Le VLSQ ouvre la voie à l'application des algorithmes actuels les plus emblématiques (*Shor, HHL...*).

7.2 Tables des illustrations

Figure 1 : Tableau récapitulatif des différents types de qubits et de leurs caractéristiques principales.	22
Figure 2 : Roadmap d'IBM Quantum (Mai 2025). Source : IBM.....	23
Figure 3 : Capture d'écran de l'états des QPUs Heron d'IBM au 22/04/2025. Source : https://quantum.ibm.com/services/resources	24
Figure 4 : Information sur le QPU ibm_pittsburg. Source : post LinkedIn de Jay Gambetta,	24
Figure 5 : D-Wave Advantage System. Source : D-Wave.	25
Figure 6 : le processeur Sycamore de Google. Source : https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5	26
Figure 7 : le processeur Willow. Source : Google.	27
Figure 8 : Roadmap d'IQM (Mai 2025). Source : IQM	28
Figure 9 : Schéma d'implémentation des qubits de la puce Ocelot d'AWS. Source : https://www.nature.com/articles/s41586-025-08642-7	29
Figure 10 : Roadmap d'Alice & Bob – Décembre 2024. Source : Alice & Bob.....	29
Figure 11 : Puce Helium 3 à 16 Qubits de Alice & Bob. Source : https://alice-bob.com/wp-content/uploads/2024/12/Think-Inside-The-Box-Alice-Bob-Whitepaper.pdf	30
Figure 12 : Photo du QPU à 256 Qubits de Fujitsu. Source : https://www.fujitsu.com/global/images/gig5/20250422-01f.pdf	30
Figure 13 : Illustration du processeur Quantique Zuchongzhi 3.0. Source : https://arxiv.org/pdf/2412.1192431	
Figure 14 : la puce H2. Source : Quantinuum.....	32
Figure 15 : Puce à base d'ions piégés d'IonQ. Source : IonQ.	32
Figure 16 : Roadmap de Pasqal . Source : Site de Pasqal, Avril 2025	33
Figure 17 : QuEra Roadmap (Janvier 2024). Source QuEra	34
Figure 18 : QuEra Aquila QPU de 256 Qubits. Source : QuEra	34
Figure 19 : Feuille de route conjointe de Microsoft & Atom Computing. Source : Atom Computing	36
Figure 20 : Vue de l'architecture de la puce Omega. Source : PsiQuantum	37
Figure 21 : Schema de principe du système Aurora et des ses modules principaux. Sources : https://www.nature.com/articles/s41586-024-08406-9/figures/2	38
Figure 22 : Diagramme de principe de la plateforme Ascella de Quandela. Source : https://www.nature.com/articles/s41566-024-01403-4	39
Figure 23 : la puce « Tangle Lake » d'Intel. Source : https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/research/quantum-computing.html	40
Figure 24 : Bell-1 d'Equal1. Source : Equal1	41
Figure 25 : Schéma de principe de l'architecture de système quantique sur puce UnityQ	41
Figure 26 : PCB dédié au test cryogénique de la puce de lecture. Source : Quobly.....	42
Figure 27 : Prototype de mémoire quantique combinant un cristal de diamant contenant 1011 centres NV et un qubit supraconducteur. Source : CEA - IRAMIS.....	43
Figure 28 : La puce Majorana-1. Source : Microsoft.....	45
Figure 29 : Schéma d'un code de répétition (chaîne 1D de 21 qubits) et d'un code de surface de distance 2 (7 qubits). Source : Google	48
Figure 30 : Roadmap pour le développement du FTQC d'IBM. Source :	49
Figure 31 : Système Flamingo à base de 2 modules Herons connectés. Source : https://www.ibm.com/quantum/blog/qdc-2024?social_post=sf207457441&sf207457441=1	51
Figure 32 : Schémas de principe de la connexion de 2 cœurs quantique Eagle de 127 qubits et des « paires de Bell coupées ». Source :	52
Figure 33 : Comparaison entre la puce Crossbill et la puce Condor. Source : https://www.ibm.com/quantum/blog/qdc-2024?social_post=sf207457441&sf207457441=1	53
Figure 34 : Schémas et photo de 2 cœurs connectés par câble supraconducteurs NbTi. Source :	53
Figure 35 : Schéma de principe de la téléportation d'une porte CZ entre 2 QPUs distants de 2 m. Source : ...	54
Figure 36 : Hybridation calculateur Haute performances (HPC) et processeur quantique (QPU) Source : Quantum 2042.	56
Figure 37 : « Mythes » sur calcul quantique NISQ & leur pertinence évaluée par les auteurs. Source :	58
Figure 38 : Diagram « SanKey » montrant la corrélation entre les primitives quantiques, les classes de problèmes mathématiques et les domaines d'applications. Source :	59
Figure 39 : Problèmes adressables en fonction des scénarios prospectifs. Source : Quantum 2042.....	60

Figure 40 : Estimation du nombre de qubits physiques nécessaire pour factoriser un code RSA de 2048 bits.	
Source :	61
Figure 41 : Représentation de tenseurs. Source :	62
Figure 42 : Exemple de la contraction d'un tenseur C d'ordre 4 en un réseau de 2 tenseurs A et B d'ordre 3.	
Source :	62
Figure 43 : Revue des différents benchmarks utilisé en calcul quantique. Source :	63
Figure 44 : Score ELO et déviation standard d'émulateurs sur 13 types de simulations et 200k séquences randomisées. Source :	64
Figure 46 : Espaces actifs utilisés A : 16 électrons et 12 orbitales d'un dimère d'eau. B : 16 électrons et 16 orbitales d'un dimère de méthane. C : 16 électrons et 24 orbitales d'un dimère de méthane. Source :	66
Figure 45 : Modèles de physique théorique proposé (Jaune) avec l'approche mathématique correspondante (vert) et les algorithmes quantiques (bleus). Source :	68

**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 :**Auteur**

Christophe VAUTEY – Responsable du Hub Quantique (2024-2025)
christophe.vautey@gmail.com

Contacts Hub Quantique :

Tiana DELHOME – Responsable du Hub Quantique (2025)
tiana.delhomecea.fr

Francesco BINANTI - Coordination scientifique du Hub Quantique
francesco.binanti@cea.fr

Mélusine SUEL - Chargée de la veille au sein du Hub Quantique
melusine.suel@cea.fr