



"Amis de la science et de la volupté, Ils cherchent le silence et l'horreur des ténèbres ;"-
Les Chats... de Baudelaire :)

Qubits sous Contrôle : Le Grand Défi de la Stabilité Quantique

4 mars 2025

Introduction

L'informatique quantique s'impose comme une révolution technologique majeure, avec la promesse de résoudre des problèmes inaccessibles aux systèmes classiques. Cependant, la décohérence – c'est-à-dire la perte d'information due aux interactions avec l'environnement – reste un obstacle important à la fiabilité des systèmes quantiques.

Dans ce contexte, l'innovation apportée par la puce Ocelot d'Amazon, qui exploite une architecture hybride combinant des cat-qubits bosoniques et des transmons pour la détection d'erreurs, se distingue.

Par ailleurs, la startup française Alice & Bob propose une approche reposant exclusivement sur des cat-qubits, sans recourir aux transmons, offrant ainsi des perspectives intéressantes en termes de stabilité et de scalabilité.

La propriété intellectuelle d'Alice & Bob aura sans doute obligé AWS à recourir à une architecture hybride (catqubits + transmons), mais des considérations d'annonce marketing ont pu aussi gouverner ce choix pour mettre au point la puce Ocelot plus rapidement (et contrer l'annonce de la puce de Majorana de Microsoft).

Cette technologie innovante (catqubits) se démarque des qubits traditionnels (tels que les qubits de transmon ou les ions piégés) (voir

https://www.linkedin.com/posts/jeromev_qubitabrphysique-architectures-maturitaez-activity-7293237419514998784-H2nd?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAACHnekBGRF-CabUoQQTa69kbB9dT2pmuMI) en s'appuyant sur les propriétés particulières des "catqubits", permettant de préserver l'information quantique sur des périodes plus longues.

Dans ce second « trou normand » (on risque de finir en coma éthylique avant la louche 3 si les annonces continuent à ce rythme), nous explorerons d'abord les fondements de la physique quantique nécessaires pour comprendre ces avancées, puis nous décrirons les cat-qubits et leur implémentation sur la puce Ocelot, avant de conclure sur les perspectives d'avenir pour l'informatique quantique.

Fondements de la Physique Quantique

Fermions et Bosons : Différences Fondamentales

En physique quantique, les particules se classifient en deux grandes familles :

- **Fermions** : Les fermions (électrons, protons, neutrons, etc.) possèdent un spin demi-entier ($1/2$, $3/2$, etc.) et obéissent au principe d'exclusion de Pauli, qui interdit à deux fermions identiques d'occuper le même état quantique simultanément. Leur comportement est décrit par la statistique de Fermi-Dirac. Cette contrainte est à l'origine de la structure électronique des atomes et, par extension, de la diversité de la matière
- **Bosons** : Les bosons, quant à eux, ont un spin entier (0, 1, 2, etc.) et peuvent partager le même état quantique. Cela leur permet de jouer un rôle fondamental en tant que vecteurs d'interaction entre les particules. Ils obéissent à la statistique de Bose-Einstein, qui autorise des accumulations macroscopiques dans un état particulier – un phénomène exploité dans la réalisation de condensats de Bose-Einstein : émergence de phénomènes collectifs qui se produit lorsque des particules bosoniques occupent massivement le même état fondamental à très basse température. Cette propriété est exploitée dans la conception des cat-qubits pour créer des superpositions d'états robustes. Parmi ces bosons, on trouve les photons (porteurs de la force électromagnétique), les gluons (responsables de la force forte), ainsi que les bosons W et Z qui interviennent dans la force faible.

Le cas particulier du Boson de Higgs

Le boson de Higgs, découvert en 2012 au Large Hadron Collider, mais théorisé bien avant sa détection (« découverte physique ») représente l'aboutissement d'un long

processus de recherche dans le cadre du modèle standard. Contrairement aux bosons médiateurs des forces, le boson de Higgs est associé au champ de Higgs omniprésent dans l'univers.

1. **Mécanisme de Brout-Englert-Higgs** : Ce mécanisme explique comment les particules acquièrent leur masse. En interagissant avec le champ de Higgs, chaque particule se voit conférer une inertie. Plus cette interaction est forte, plus la particule est massive.
2. **Distinction avec les bosons médiateurs** : Alors que des bosons comme le photon transmettent directement l'interaction électromagnétique, le boson de Higgs ne joue pas le rôle de médiateur de force. Son rôle est de "donner" la masse, un paramètre fondamental qui, par la suite, influence la manière dont les particules interagissent dans l'univers, y compris via la gravitation.

« Masse(S) » et Gravitation

La notion de masse se décline en deux aspects complémentaires :

1. **Masse inertielle** : Elle mesure la résistance d'un objet à toute variation de son état de mouvement. Plus la masse inertielle est grande, plus il faut d'effort (ou de force) pour modifier la vitesse de l'objet ou son vecteur « quantité de mouvement ».
2. **Masse gravitationnelle** : Elle détermine l'intensité de l'attraction gravitationnelle entre deux objets. Dans la relativité générale d'Einstein, la masse (ainsi que l'énergie) courbe l'espace-temps, et c'est cette courbure qui se manifeste sous la forme de la gravitation.

Le boson de Higgs intervient indirectement dans la gravitation en expliquant l'origine de la masse, sans toutefois être le vecteur de la force gravitationnelle elle-même. La gravitation reste quant à elle décrite par la courbure de l'espace-temps, concept qui s'inscrit dans une approche géométrique des interactions.

Les Cat-Qubits : Définition, Principe et Avantages

Définition et Principe de Fonctionnement

Pour rappel, les ordinateurs quantiques sont principalement exposés à deux catégories d'erreurs induites par les perturbations environnementales : l'erreur « bit-flip », qui consiste en un renversement de l'état du qubit et altère ainsi l'information stockée, et l'erreur « phase-flip », qui modifie la phase de la superposition et peut compromettre le résultat des calculs quantiques (nous verrons cela dans l'article "louche #3" en manipulant des qubits).

Les cat-qubits, nommés en référence au paradoxe du chat de Schrödinger, reposent sur la création de superpositions d'états quantiques macroscopiquement distincts.

Typiquement, l'information est encodée dans deux états cohérents opposés, notés $|a\rangle$ et $|-a\rangle$. Cette superposition confère aux cat-qubits une résistance accrue aux perturbations environnementales, en particulier aux erreurs de type « bit-flip ».

Exploitation des Propriétés Bosoniques et Correction d'Erreurs

Grâce à la capacité des bosons à occuper simultanément le même état, il est possible de créer des superpositions redondantes qui facilitent la mise en place de codes de correction d'erreurs. La symétrie intrinsèque des états bosoniques permet d'identifier et de compenser automatiquement certaines erreurs, améliorant ainsi la robustesse globale du système quantique.

Cette approche mettant en oeuvre les "catqubits" permet de **bénéficier de symétries particulières** et d'un certain biais dans le type d'erreur subie, ouvrant la voie à des stratégies de correction d'erreurs plus efficaces. Cette superposition permet de créer des états dits « robustes », qui, grâce à leur structure particulière, sont moins sensibles aux perturbations environnementales, notamment aux erreurs de type « bit-flip ».

Du même coup, si les catqubits permettent de mettre en oeuvre des "circuits" quantiques auto-résilients vis à vis des erreurs "bit-flip", il ne reste alors plus qu'à corriger "algorithmiquement" les erreurs de "phase flip" (voir cela dans l'article à venir "louche #3").

Le boson exploité dans la puce Ocelot est le photon de micro-ondes. Ces photons, utilisés dans des cavités supraconductrices, permettent de créer et de manipuler des états cohérents (cat-qubits) qui bénéficient d'une meilleure résistance aux erreurs, notamment celles de type « bit-flip ».

Tiens, tiens, tiens (vaut mieux que trois tu l'auras ?)

L'exploitation des propriétés des bosons pour concevoir des qubits plus stables s'appuie sur la capacité unique de ces particules à occuper simultanément le même état quantique (cf condensant de Bose-Einstein). Cette caractéristique permet de créer des superpositions d'états — en d'autres termes, de combiner plusieurs configurations quantiques dans un même système — qui offrent une redondance intrinsèque. Cette redondance, sous-tendue par la symétrie des états bosoniques, facilite l'implémentation de codes de correction d'erreurs robustes, capables de compenser les perturbations qui pourraient autrement conduire à la décohérence.

La symétrie de ces états joue alors un rôle crucial : elle assure que les perturbations locales affectant une partie du système n'altèrent pas globalement l'information encodée, car la symétrie rend le système moins sensible aux fluctuations environnementales.

On retrouve ce concept fascinant et sous-jacent de la symétrie dans le cas des qubits topologique : On rappelle ici que les fermions de Majorana ont été théorisés par

Ettore Majorana, en 1937, pour simplifier la description théorique et ouvrir la voie à des symétries plus fines. Dans ces systèmes « topologiques », l'information quantique est protégée par la topologie du système lui-même. La symétrie topologique agit comme une barrière naturelle contre la décohérence en confinant les erreurs dans des régions locales, sans permettre leur propagation à l'ensemble du système.

De la même manière, l'utilisation de bosons dans la conception de cat-qubits tire parti de la symétrie inhérente des états bosoniques pour stabiliser l'information. La cohabitation de multiples états quantiques dans un même mode bosonique permet d'implémenter des codes de correction d'erreurs qui, grâce à cette symétrie, détectent et corrigent automatiquement certaines erreurs sans nécessiter une intervention externe constante.

Performances techniques vis à vis de la décohérence

L'utilisation de systèmes bosoniques pour implémenter des qubits permet de tirer parti de la capacité des bosons à se regrouper dans un même état quantique, facilitant ainsi la mise en place de protocoles de correction d'erreurs et de stabilisation.

- **Protection Intrinsèque** : Dans un qubit traditionnel, tel que le qubit de transmon ou l'ion piégé, les erreurs de décohérence peuvent survenir à cause d'interactions imprévues avec l'environnement, perturbant l'état quantique fragile du système (en dépit des systèmes cryogéniques proches du 0K, des chambres à vide poussé, etc...). Grâce à la structure des cat-qubits, certaines perturbations de l'environnement peuvent être compensées ou annulées, permettant d'améliorer significativement la durée de cohérence du qubit. **La société "Alice & Bob" avec sa puce quantique "Boson-4" a atteint 7 minutes de stabilité/cohérence** (à mettre en regard des durées de quelques μ s ou ms d'autres technologies). On peut tester cette technologie "Boson-4" via Google Cloud ([Quantum Cloud Felis | Alice & Bob](#)). On rappelle ici que les "catqubits" (TomCat) mis en oeuvre par "ALice & Bob" ne font pas appel à un "second étage" de transmons (contrairement à la puce Ocelot d'AWS) : TomCat emploie un protocole de tomographie quantique performant, permettant de contrôler les états quantiques sans recourir au transmon, circuit couramment utilisé par de nombreuses entreprises quantiques, mais qui est l'une des principales sources d'erreurs de type bit-flip pour les cat-qubits. Cette approche réduit également l'empreinte du qubit sur la puce en éliminant le besoin de conduites, câbles et instruments, ce qui rend le qubit à la fois stable et évolutif (ce qui va faciliter la "scalabilité" en s'affranchissant d'une architecture "transmon" chargée du contrôle d'erreur). La durée de cohérence sur la puce Ocelot d'AWS pourrait atteindre la seconde.

- **Perspective sur la Scalabilité** : L'amélioration de la robustesse est un pas crucial vers la réalisation de systèmes quantiques à grande échelle, où la correction d'erreurs et la fidélité des opérations deviennent déterminantes. Encore une fois, non pas tant par la miniaturisation des systèmes produisant les cat-qubits, mais par la simplification de tous les systèmes matériels ou logiciels de correction d'erreurs. La puce Ocelot fait appel à une architecture hybride mettant en oeuvre une couche de "transmons" pour le contrôle d'erreur. Nous avons déjà vu que la scalabilité des systèmes à base de qubits supraconducteurs type transmon était problématique, car elle obligeait, outre le refroidissement proche de 0K qui est une contrainte très partagée par toutes les architectures de qubits, à déployer pour chaque transmon (jonction Josephson + condensateur) des lignes de micro-ondes pour contrôler les états quantiques des paires de Cooper. AWS a dû recourir à ce type d'architecture sans doute pour pouvoir avancer plus rapidement vers la réalisation de la puce Ocelot (et rester dans la course des annonces au qubit le plus stable), et a dû être gêné aux entournures par la propriété intellectuelle d'Alice & Bob qui met en oeuvre des catqubits "purs", sans architecture transmon associée pour le contrôle d'erreur. L'architecture "tomcat" mise en oeuvre dans les puces "Boson-X" d'Alice & Bob est sans doute plus aisée à mettre à l'échelle d'un point de vue ingénierie. **Alice & Bob ont déjà réalisé une puce quantique mettant en oeuvre 16 catqubits qui a un taux d'erreur inférieur à 10^{-6} !** Les cat-qubits "TomCat" d'Alice & Bob permettent de réduire les besoins en matériel jusqu'à 60 fois par rapport aux autres approches. Récemment, Alice & Bob ont démontré qu'un système basé sur des cat-qubits pouvait diminuer le nombre de qubits nécessaires pour exécuter l'algorithme de Shor, passant de 20 millions à seulement 350 000.

La Puce Ocelot d'Amazon : Architecture et Implémentation

La puce Ocelot comme la puce Majorana de Microsoft représentent une avancée significative dans l'implémentation des technologies quantiques (si tant est que leurs revendications technologiques respectives se vérifient à l'usage) à grands coups d'annonces tonitruantes. Mais il convient aussi de conserver un regard attentif sur des sociétés "pure players" comme "Alice & Bob" ou "Pasqal" (d'Alain Aspect) qui avancent avec leurs levées de fonds de 100 millions d'euros investis dans la R&D plus que dans le marketing.

Architecture matérielle

Le prototype Ocelot est composé de deux micropuces en silicium, empilées et reliées électriquement. Chaque puce, couvrant une surface d'environ 1 cm^2 , intègre 14 composants clés, répartis ainsi :

- **Cinq qubits de données (cat-qubits) :** Ces qubits contiennent l'information quantique encodée dans des états « cat », c'est-à-dire des superpositions cohérentes d'états macroscopiquement distincts.
- **Cinq circuits tampons :** Ils assurent la stabilisation des cat-qubits en compensant les fluctuations et en améliorant la robustesse des états.
- **Quatre qubits supplémentaires (transmons) :** Spécialement dédiés à la détection d'erreurs, ils permettent de surveiller et corriger les perturbations susceptibles d'affecter les cat-qubits. Nous avons déjà détaillé l'architecture des transmons dans https://www.linkedin.com/posts/jeromev_qubitabrphysique-architectures-maturitaez-activity-7293237419514998784-H2nd?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAACHnekBGRF-CabUoQQTa69kbB9dT2pmuMI . Ces éléments non linéaires, sont des jonctions Josephson + condensateurs (vous vous souvenez, paire de Cooper, effet tunnel, transmons...), et sont intégrés pour manipuler ces états et pour réaliser des opérations de correction d'erreurs. Ces éléments permettent également de créer les interactions nécessaires pour la mise en œuvre des stabilisateurs, par exemple en contrôlant précisément l'évolution temporelle du système.

Détail de l'Architecture de la Couche Cat-Qubits

La couche des cat-qubits repose sur une conception qui exploite la physique des résonances dans des cavités supraconductrices :

- **Chambre de Résonance Supraconductrice :** Les cat-qubits sont réalisés dans des cavités résonantes où des photons de micro-ondes sont piégés. Ces cavités jouent le rôle d'un environnement contrôlé dans lequel les états cohérents (souvent notés $|\alpha\rangle$ et $|- \alpha\rangle$) sont générés et maintenus. Bien que les "catqubits" mettent en oeuvre des bosons, ici des photons de micro-ondes, cela ne fait pas de ces dispositifs, des puces "photoniques", notamment parce que ces "puces quantiques" ne font pas appel à des dispositifs d'optoélectronique.
- **Ingénierie de la Dissipation :** Pour stabiliser ces superpositions, des techniques avancées (souvent désignées sous le terme « dissipation engineering ») sont mises en œuvre. Cela implique le couplage de la cavité à des circuits de contrôle non linéaires qui favorisent le maintien des états cohérents et limitent les effets de décohérence.
- **Circuit de Contrôle et de Stabilisation :** La couche intègre également des circuits tampons qui interviennent pour corriger en temps réel les fluctuations du système. Ces circuits agissent comme une interface entre la cavité résonante et le reste de l'architecture, assurant une cohérence optimale des cat-qubits.

- **Intégration avec des Qubits Transmons pour la Correction d'Erreurs :** Bien que la couche cat-qubits soit conçue pour offrir une stabilité intrinsèque, les transmons ajoutés au prototype assurent une surveillance et une correction des erreurs potentielles (notamment les erreurs de phase-flip) qui pourraient survenir malgré tout.
- **Intégration hybride des Cat-Qubits avec des transmons :** En intégrant directement des cat-qubits bosoniques (résilient au "bit-flip") avec des transmons chargés de corriger les "phase-flip", la puce Ocelot vise à offrir une plateforme où les erreurs de décohérence sont minimisées, améliorant ainsi la performance globale et la stabilité des calculs quantiques.

Implémentation du Code de Correction dans Ocelot

Dans le dispositif Ocelot, les étapes de la correction d'erreurs se déroulent de la manière suivante :

1. **Préparation de l'État Codé :** Les cat-qubits sont initialement préparés en formant des superpositions d'états cohérents avec une parité bien définie. Des impulsions de contrôle sont appliquées pour créer $|C_{\alpha\pm}\rangle$.
2. **Mesure de Parité en Temps Réel :** Un circuit de lecture est dédié à mesurer la parité de la cavité. Cela permet de détecter rapidement toute perte de photon, qui se traduirait par un changement de la valeur mesurée de l'opérateur de parité.
3. **Application de la Correction :** Dès qu'une anomalie est détectée, le système effectue automatiquement une opération de correction. Cette opération, programmée via un ensemble de portes quantiques adaptées, ramène l'état dans l'espace codé stabilisé par P^\wedge .
4. **Répétition et Redondance :** Le protocole peut être itéré de façon périodique pour maintenir une haute fidélité de l'information. Grâce à la symétrie bosonique, le code permet de corriger non seulement les erreurs de perte de photon, mais aussi d'autres types de déphasages mineurs.

Résultats Expérimentaux et Simulations

Des études préliminaires, qu'elles soient issues de simulations ou d'expérimentations en laboratoire, indiquent que la puce Ocelot présente des taux d'erreurs significativement réduits par rapport aux technologies concurrentes.

- **Données de Cohérence :** Les mesures de cohérence temporelle montrent que les cat-qubits peuvent conserver leur état superposé plus longtemps, traduisant une meilleure résistance aux perturbations extérieures. La puce Ocelot atteint une durée de cohérence de l'ordre de la seconde.

- **Comparaisons Quantitatives** : En se basant sur des comparaisons avec des qubits de transmon ou d'ions piégés, l'approche bosonique permet d'envisager des opérations quantiques avec une fidélité accrue, un critère essentiel pour le développement d'algorithmes quantiques complexes. AWS indique que cette architecture permet de réduire de 90% les besoins en contrôle d'erreur matériels (transmons ici) et logiciels.

Avantages Concurrentiels

L'approche adoptée par la puce Ocelot offre plusieurs avantages compétitifs :

- **Stabilité et Fiabilité** : La robustesse des cat-qubits bosoniques se traduit par une amélioration notable dans la durée de vie des états quantiques.
- **Perspectives d'Évolutivité** : Une réduction significative du bruit et des erreurs ouvre la voie à l'intégration de nombreux qubits dans une même puce, un pas indispensable vers l'ordinateur quantique universel.
- **Synergies avec les Protocoles de Correction d'Erreurs** : La structure même des cat-qubits facilite l'implémentation de schémas de correction d'erreurs, rendant ainsi le système global plus tolérant aux imperfections inhérentes aux dispositifs physiques.
- **Pas de nécessité de réaliser un « tressage » adiabatique** : Les cat-qubits présentent l'avantage de ne pas nécessiter de transformations adiabatiques pour réaliser certaines opérations de correction d'erreurs, contrairement aux qubits topologiques qui reposent sur des processus de braiding adiabatiques pour manipuler les anyons ou mode Zero de Majorana de manière à conserver leur protection topologique. Cette absence de contrainte de transformation adiabatique dans les cat-qubits peut, en théorie, permettre des opérations plus rapides, car on ne risque pas la décohérence liée à une transformation non adiabatique (dans le cadre d'une transformation adiabatique, l'entropie du système ne peut qu'augmenter, mais si la transformation est suffisamment lente, l'entropie est constante, le système conserve sa cohérence).

Discussion et Perspectives d'Avenir

Enjeux et Défis Techniques

Bien que prometteuse, la technologie des cat-qubits bosoniques et leur implémentation sur la puce Ocelot posent encore plusieurs défis (qui sont identiques à ceux de la puce de Majorana de Microsoft, et de même nature que pour les autres architectures de qubits) !

- **Contrôle et Manipulation / lecture** : La manipulation précise des états quantiques reste complexe et nécessite des avancées en ingénierie cryogénique et en électronique ultra-rapide.
- **Correction d'Erreurs à Grande Échelle** : L'implémentation de protocoles de correction d'erreurs efficaces sur un grand nombre de qubits demeure un enjeu majeur, requérant une synergie entre physique fondamentale et ingénierie des systèmes.
- **Les "TomCats" d'Alice & Bob** : Alice & Bob misent sur une architecture sans transmons, permettant une réduction significative de l'empreinte matérielle et des besoins en contrôle, tout en améliorant la scalabilité. Par exemple, des systèmes basés sur des cat-qubits « purs » ont montré la capacité de réduire les ressources matérielles nécessaires jusqu'à 60 fois et de diminuer drastiquement le nombre de qubits requis pour exécuter des algorithmes complexes, comme l'algorithme de Shor (passant de 20 millions à 350'000).

Implications pour l'Industrie et la Recherche Fondamentale

L'adoption des cat-qubits bosoniques ne représente pas uniquement une amélioration technique :

- **Convergence des Disciplines** : L'innovation illustre parfaitement comment la recherche fondamentale en physique des particules et en théorie quantique peut se traduire par des applications industrielles concrètes. Ce croisement de domaines permet d'envisager des solutions aux problèmes computationnels les plus complexes.
- **Impact sur la Compétition Technologique** : Dans un contexte de concurrence mondiale pour la suprématie quantique, des avancées telles que la puce Ocelot d'Amazon renforcent la position des entreprises investissant massivement dans la R&D quantique (oui et aussi le marketing :)

Vision à Long Terme

- **Ordinateurs Quantiques Universels** : La possibilité de combiner une grande stabilité avec des schémas de correction d'erreurs performants ouvre la voie à des systèmes capables de résoudre des problèmes NP-difficiles. Pour l'heure nous avons des calculateurs quantiques... il faudra augmenter la densité de qubits logiques fiables et développer les protocoles idoines, ainsi que les langages de programmation (nous sommes encore un peu loin du "hello world") pour réaliser un véritable ordinateur quantique.

Conclusion

L'informatique quantique est sur le point de transformer radicalement notre monde en résolvant des problèmes bien au-delà des capacités des ordinateurs classiques. Dans cette course vers la suprématie quantique, des acteurs majeurs adoptent des approches distinctes : Amazon innove avec sa puce Ocelot, basée sur des cat-qubits bosoniques intégrés dans une architecture hybride associant des transmons pour la détection d'erreurs, tandis que Microsoft mise sur sa puce Majorana, qui exploite des états topologiquement protégés pour atténuer la décohérence.

Les cat-qubits tirent parti de la superposition des états bosoniques pour encoder l'information dans des états ultra-robustes, protégés par des symétries naturelles qui permettent une correction d'erreurs en temps réel sans lourdes contraintes adiabatiques. La puce Ocelot démontre ainsi comment une exploitation fine de ces propriétés peut renforcer la cohérence et la fiabilité des systèmes quantiques.

À l'inverse, la puce Majorana de Microsoft offre une alternative complémentaire en utilisant la protection topologique des quasi-particules pour réduire significativement les effets de décohérence. Ces deux innovations illustrent brillamment la capacité de la recherche fondamentale en physique quantique à se traduire rapidement en avancées technologiques à fort potentiel industriel.

Alors que IBM et Google, avec leurs qubits supraconducteurs à base de transmons, font face à des défis de fragilité et de décohérence limitant la fidélité à long terme, l'exploration et la combinaison de diverses architectures apparaissent essentielles pour bâtir l'ordinateur quantique universel.

La compétition est également vive en Chine. En 2023, le processeur Jiuzhang-3 (faisant référence aux 9 chapitres -Jiuzhang- d'un célèbre traité de mathématiques chinois), à 255 photons, a démontré une suprématie quantique en surpassant les supercalculateurs classiques de 10^{16} fois, tandis qu'en octobre 2024, la puce Sycamore de Google, à 67 qubits, a atteint une performance supérieure de neuf ordres de grandeur par rapport aux systèmes classiques. Par ailleurs, en s'appuyant sur le succès du Zuchongzhi-2 à 66 qubits, l'équipe de l'USTC a développé le Zuchongzhi-3 (du nom d'un célèbre mathématicien chinois), intégrant 105 qubits et 182 coupleurs, avec un temps de cohérence de 72 μ s et des fidélités de portes de l'ordre de 99,90 % (qubit unique) et 99,62 % (deux qubits). Une tâche de random circuit sampling réalisée sur 83 qubits répartis sur 32 couches a montré une accélération de 15 ordres de grandeur par rapport au meilleur algorithme classique, dépassant également les performances de Sycamore de 6 ordres de grandeur !

En somme, la convergence d'approches – des cat-qubits bosoniques aux puces topologiques en passant par les transmons – dessine les contours d'une nouvelle ère pour l'informatique quantique. La synergie entre recherche fondamentale et innovation appliquée promet des applications révolutionnaires, de la cryptographie quantique aux

simulations complexes, propulsant l'industrie vers des horizons jusqu'alors insoupçonnés.