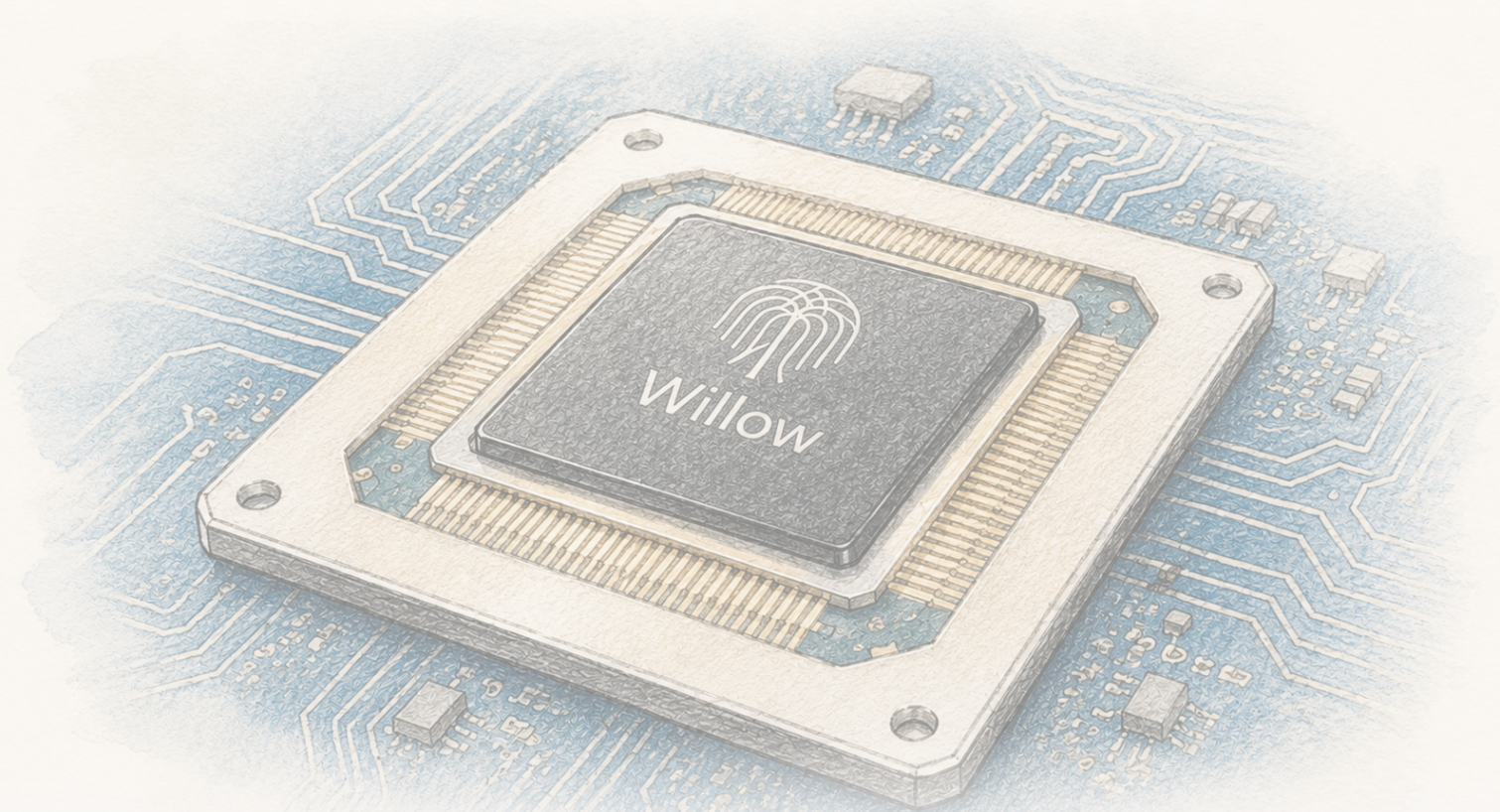




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Une mémoire quantique s'est enfin améliorée en grandissant — le vrai jalon, et la machine que ce n'est pas

Google Quantum AI a montré, proprement pour la première fois, qu'une mémoire quantique en code de surface peut fonctionner sous le seuil : quand le code a grandi de la distance 3 à 5 puis 7, le taux d'erreur logique a baissé exponentiellement (environ $2,14\times$ par deux pas), et la plus grande mémoire, distance 7 et 101 qubits, a survécu plus longtemps que son meilleur qubit physique — au-delà du breakeven — avec une correction d'erreurs en temps réel. C'est un jalon d'ingénierie longtemps attendu. C'est aussi un seul qubit logique servant de mémoire, à un taux d'erreur encore loin de ce que demandent les vrais algorithmes, sans opérations logiques effectuées, avec un plancher d'erreurs inexplicable signalé par les auteurs, et des ordres de grandeur d'échelle devant lui. Un seuil franchi, pas un ordinateur livré.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: Quantum error correction below the surface code threshold, Google Quantum AI and Collaborators, Nature 638, 920 (2025) · DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y

Le moment où la courbe s'est pliée dans le bon sens

Pendant trente ans, la correction d'erreurs quantiques a reposé sur une promesse qui n'avait jamais été tenue proprement. La théorie dit que si l'on répartit une unité d'information quantique — un qubit *logique* — sur de nombreux qubits physiques bruités, et si ces qubits physiques sont assez bons, alors en ajouter *davantage* devrait rendre le qubit logique *meilleur*, avec des erreurs qui diminuent exponentiellement à mesure que le code grandit. Le piège est dans le « si » : sous un seuil critique de bruit, plus de qubits aident ; au-dessus, plus de qubits ne font qu'ajouter plus de bruit. Toutes les expériences précédentes étaient restées du mauvais côté de cette ligne, ou n'avaient pas montré la tendance proprement. Agrandir le code empirait les choses au lieu de les améliorer.

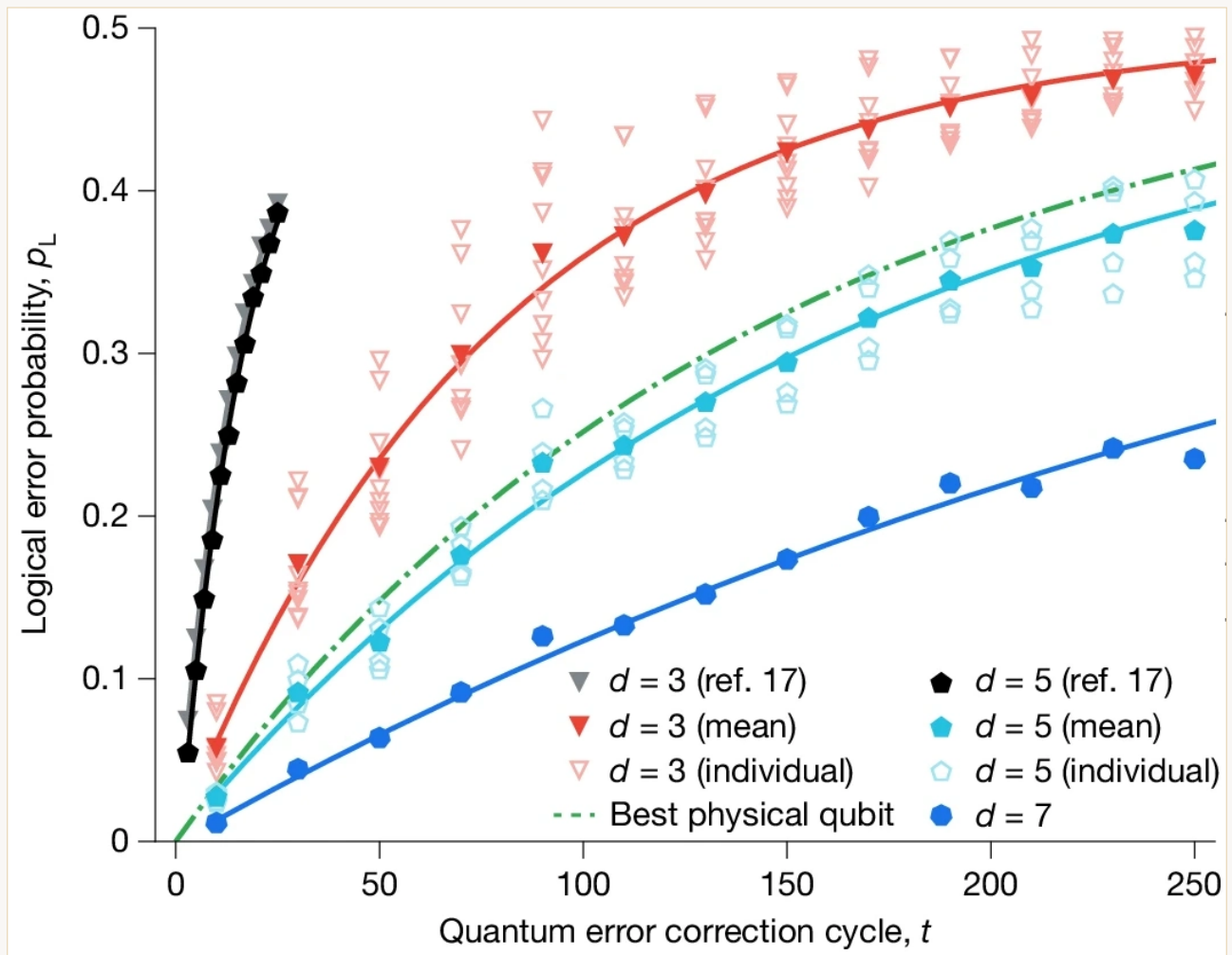
En décembre 2024, Google Quantum AI a rapporté la première démonstration claire de l'autre régime. Sur Willow, sa nouvelle génération de processeurs supraconducteurs, l'équipe a construit des mémoires en code de surface aux distances 3, 5 et 7, et a vu le taux d'erreur logique *baisser* chaque fois que le code devenait plus grand — d'un facteur $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ pour chaque augmentation de deux pas en distance. La plus grande mémoire, à distance 7 et 101 qubits, a conservé un qubit logique avec une erreur de $0,143 \% \pm 0,003 \%$ par cycle de correction, et — le titre dans le titre — a survécu *plus longtemps que son meilleur qubit physique*, par un facteur de $2,4 \pm 0,3$. On appelle cela être « au-delà du breakeven », et c'est la première fois que tout l'appareil de correction d'erreurs paie son propre coût sur ce matériel.

C'est une vraie étape, et il vaut la peine d'être précis sur son type. C'est la preuve que l'échelle va maintenant dans le bon sens. Ce n'est pas un ordinateur quantique fonctionnel, et l'article ne prétend pas l'être.

Ce que signifient « code de surface », « distance » et « sous le seuil »

Un **qubit logique** est une unité protégée d'information quantique encodée sur de nombreux qubits physiques. Le **code de surface** est une manière particulière de faire cet encodage sur une grille 2D, où des qubits supplémentaires de « mesuré » vérifient constamment les erreurs sans perturber l'information stockée. La **distance** du code d n'est pas une distance physique : c'est le plus petit nombre d'erreurs bien placées qui peuvent corrompre le qubit logique sans être remarquées par le code. Un d plus grand est une parcelle plus grande et plus robuste — il dépense plus de qubits physiques (environ $2d^2 - 1$) et corrige plus d'erreurs simultanées, jusqu'à $(d - 1)/2$. Les trois tailles testées ici, distances 3, 5 et 7, corrigent donc 1, 2 et 3 erreurs simultanées et dépensent environ 17, 49 et 97 qubits physiques — la mémoire distance 7 construite par Google en utilisait 101, un peu au-dessus de ce minimum théorique.

« **Sous le seuil** » est l'expression cruciale. La correction d'erreurs n'aide que si votre taux d'erreur physique se situe sous une valeur critique ; là, chaque augmentation de distance supprime exponentiellement le taux d'erreur logique. Le facteur de suppression Λ mesuré cela — $\Lambda > 1$ signifie qu'agrandir le code aide, et plus Λ est élevé, mieux c'est. Google rapporte $\Lambda \approx 2,14$, ce qui veut dire que chaque augmentation de deux pas en distance a à peu près divisé par deux le taux d'erreur logique. Que Λ soit confortablement au-dessus de 1 est tout le résultat.



Comment l'erreur logique s'accumule au fil des cycles de correction, pour les mémoires de distance 3, 5 et 7 (de haut en bas). La ligne à regarder est la ligne verte en pointillés — le *meilleur qubit physique individuel* de la puce. La mémoire de distance 7 (bleue, la plus basse) accumule l'erreur plus lentement que cette ligne, donc le qubit encodé survit plus longtemps que le meilleur qubit physique dont il est construit — « au-delà du breakeven », par un facteur de $2,4 \times$. C'est le résultat de durée de vie ; la suppression sous le seuil elle-même ($\Lambda = 2,14$, quand le code grandit de la distance 3 à 5 puis 7) se trouve dans les chiffres du texte.

Google Quantum AI and Collaborators / Nature CC BY-NC-ND 4.0

Ce que les auteurs ont fait

- Construit des mémoires en code de surface sur deux puces Willow : un processeur de 105 qubits qui a exécuté les codes de distance 3, 5 et 7 pour le test d'échelle (la plus grande étant la mémoire distance 7 de 101 qubits, dont 49 qubits de données), et un processeur de 72 qubits qui a exécuté une mémoire de distance 5 avec un décodeur en temps réel ainsi que des codes de répétition à grande distance.
- Mesuré comment l'erreur logique *par cycle* changeait quand ils augmentaient la distance du code de 3 à 5 puis 7, en extrayant le facteur de suppression Λ .
- Comparé la durée de vie du qubit logique à celle du meilleur qubit physique individuel de la même

puce, pour tester le « breakeven ».

- Exécuté le code de distance 5 avec un **décodeur en temps réel** — du matériel classique qui interprète les vérifications d'erreurs aussi vite qu'elles sont produites — pendant jusqu'à un million de cycles, pour montrer que la correction d'erreurs peut suivre la machine.
- Poussé des **codes de répétition** plus simples jusqu'à la distance 29 pour chercher les sources d'erreurs rares et profondes qui fixent un plancher de performance.

Ce qu'ils ont trouvé

- **Le code est sous le seuil.** L'erreur logique par cycle a diminué d'un facteur $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ pour chaque augmentation de deux en distance — une suppression exponentielle propre, le comportement promis par la théorie et qu'aucun processeur n'avait définitivement montré.
- **La mémoire de distance 7 a atteint 0,143 % $\pm$ 0,003 % d'erreur par cycle**, et a vécu **2,4 $\pm$ 0,3 fois plus longtemps** que son meilleur qubit physique — au-delà du breakeven.
- **Le décodage en temps réel a suivi.** Le décodeur a eu en moyenne 63 microsecondes de latence à la distance 5 contre un cycle de 1,1 microseconde, sur un million de cycles — la correction d'erreurs tournait en direct, pas seulement dans une analyse après coup.
- **Une source d'erreurs rare et profonde reste présente.** Dans les tests de code de répétition, la performance a finalement été limitée par des rafales d'erreurs corrélées se produisant environ **une fois par heure** (environ une fois tous les 3×10^9 cycles), fixant un plancher d'erreur près de 10^{-10} dont l'origine, disent les auteurs, n'est **pas encore comprise**.

Ce que cela ne prouve pas

- Ce n'est **pas** un ordinateur quantique qui calcule. C'est une *mémoire* quantique : elle stocke et protège un qubit logique. Elle n'effectue pas d'opérations logiques (portes) entre qubits logiques et n'exécute aucun algorithme.
- Ce n'est **pas** un qubit de plus avant des machines utiles. Un qubit logique de distance 7 dépense environ 101 qubits physiques ; un taux d'erreur par cycle de 0,1 % reste très au-dessus des $\sim 10^{-6}$ à 10^{-10} dont les vrais algorithmes ont besoin. Combler cet écart exige de pousser à des distances beaucoup plus grandes — beaucoup plus de qubits physiques par qubit logique — et les algorithmes utiles ont besoin de *milliers* de qubits logiques à la fois. Le budget de qubits physiques se compte alors en millions.
- Le « **si l'on met à l'échelle** » **fait un vrai travail**. La conclusion de l'article est que les performances du dispositif, *si elles sont mises à l'échelle*, pourraient satisfaire les exigences de grands algorithmes. Montrer que la tendance est bonne sur un qubit logique n'est pas la même chose qu'avoir construit la machine mise à l'échelle, et rien ici ne garantit que la tendance survive à des tailles beaucoup plus grandes.
- Le **plancher d'erreurs inexpliqué est un problème vivant**. Les rafales corrélées qui limitent la performance des codes de répétition sont, selon les auteurs, des ordres de grandeur plus grandes qu'attendu et empêcheraient de plus grandes applications tolérantes aux fautes tant qu'elles ne

sont pas comprises — une faille ouverte, dite clairement, pas un détail résolu.

- Cela ne dit rien sur le fait de **casser le chiffrement ou sur la « suprématie quantique » pour des tâches utiles**. Cela demande la machine tolérante aux fautes complète dont ce résultat est une pierre de fondation, pas une démonstration.

Quelle est la solidité des preuves

- **Le cœur de l'affirmation est solide et important.** Un fonctionnement sous le seuil avec une suppression exponentielle nette sur trois distances de code, plus une durée de vie au-delà du breakeven et un décodeur en temps réel fonctionnel, est exactement la combinaison que le domaine essayait d'atteindre, et elle est démontrée directement plutôt qu'inférée. Ce n'est pas un artefact de hype ; c'est un vrai résultat d'ingénierie d'un groupe de premier plan.
- **Les auteurs sont prudents sur le périmètre.** Ils le présentent comme une *mémoire* sous le seuil, signalent eux-mêmes le plancher d'erreurs corrélées inexpliqué et conditionnent l'avenir à ce « si mis à l'échelle » très visible. Le dépassement, quand il apparaît, vient de la couverture autour du résultat qui arrondit « une mémoire corrigée d'erreurs s'améliore quand elle grandit » en « l'ordinateur quantique est là ».
- **Le statut honnête est une étape fondamentale, proprement franchie.** Un qubit logique, protégé assez bien pour que l'ajout de redondance aide enfin — avec encore une longue route difficile et non garantie d'échelle, de portes logiques et d'erreurs inexpliquées.

Pourquoi c'est important

L'informatique quantique tolérante aux fautes a toujours eu un air de problème de poule et d'œuf : les machines utiles demandent des taux d'erreur qu'aucun qubit physique ne peut atteindre, et la solution — la correction d'erreurs — ne fonctionne que si le matériel est déjà assez bon pour être sous le seuil. Franchir cette ligne, même une seule fois, même sur un seul qubit logique, change la question de « est-ce possible ? » à « jusqu'où peut-on mettre cela à l'échelle, et à quelle vitesse ? ». C'est un déplacement réel et significatif, et c'est pourquoi le résultat mérite l'attention.

Mais le même soin qui rend le résultat crédible doit tempérer l'histoire autour de lui. C'est la première brique d'une fondation, bien posée. Ce n'est pas le bâtiment, et ceux qui l'ont posée sont les premiers à le dire. La bonne manière de suivre l'informatique quantique dans les prochaines années est exactement cette courbe peu glamour : le facteur de suppression tient-il quand les codes grandissent, les portes logiques peuvent-elles être faites aussi proprement que la mémoire logique, et cette mystérieuse erreur d'environ une fois par heure sera-t-elle expliquée ?

Résumé clair

Google Quantum AI a montré, proprement pour la première fois, qu'une mémoire quantique en code de surface peut fonctionner *sous le seuil* : à mesure qu'ils ont agrandi le code de la distance 3 à 5 puis 7, le taux d'erreur logique a baissé exponentiellement (d'environ $2,14\times$ par deux pas), et la plus grande mémoire, distance 7 et 101 qubits, a survécu plus longtemps que son meilleur qubit physique — au-delà du breakeven — pendant que la correction d'erreurs tournait en temps réel. C'est une étape authentique et longtemps attendue dans l'ingénierie des ordinateurs quantiques. C'est aussi un seul qubit logique agissant comme mémoire, avec un taux d'erreur encore loin de ce que demandent les vrais algorithmes, sans opérations logiques effectuées, avec un plancher d'erreurs inexplicable signalé par les auteurs, et des ordres de grandeur d'échelle encore devant lui. Un seuil franchi — pas un ordinateur livré.

Sources

Google Quantum AI and Collaborators, Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 638, 920 (2025)

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

Author Correction: Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 653, E5 (2026) — corrects a Fig. 3a axis label and legend keys; does not affect the below-threshold (Fig. 1) results

<https://www.nature.com/articles/s41586-026-10559-8>