

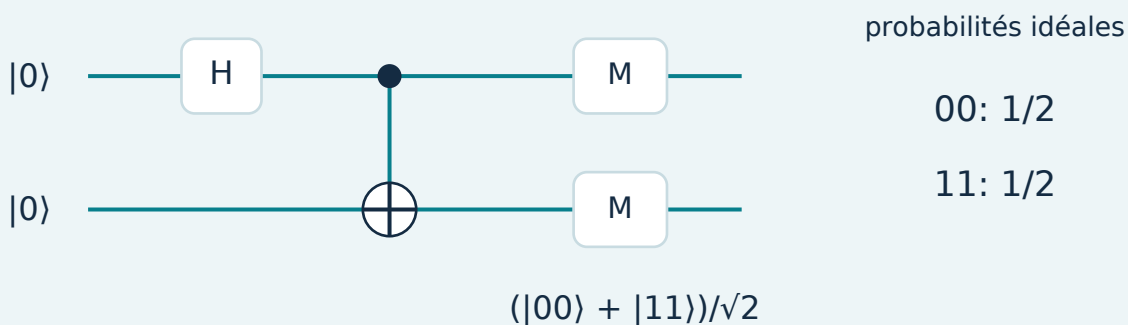
Technologies quantiques

Des principes physiques aux processeurs, réseaux et capteurs

Édition pédagogique de référence

26.09.2026 | v1.0 | FR

Un guide original et structuré pour les lecteurs curieux, les étudiants et les équipes techniques. Il propose une synthèse pédagogique large, et non un inventaire exhaustif de chaque expérience ou un manuel de construction de laboratoire. Les mathématiques éclairent les mécanismes. Les schémas sont conceptuels et ne sont pas à l'échelle. État des recherches vérifié le 26 septembre 2026 ; les dates des résultats figurent dans les références.



Sommaire

01 Le paysage des technologies quantiques	3
02 Un siècle d'idées et d'expériences	3
03 États, amplitudes et mesure	4
04 La superposition ne contient pas des réponses lisibles	4
05 Intrication, corrélations et non-clonage	5
06 Portes, circuits et première expérience	5
07 Algorithmes et conditions d'accélération	6
08 Comment le matériel encode un qubit	6
09 Le processeur n'est qu'une partie de la machine	7
10 Électronique de contrôle, optique et cryogénie	7
11 Bruit et correction d'erreurs	8
12 Qubits logiques et tolérance aux fautes	8
13 La pile logicielle quantique	9
14 Des benchmarks réellement informatifs	9
15 Communications et internet quantique	10
16 Capteurs et mesure de précision	10
17 Cryptographie post-quantique et QKD	11
18 Résultats à la date de revue de 2026	11
19 Perspectives conditionnelles, non inévitables	12
20 Parcours d'apprentissage et exercices	12
21 Utiliser la bibliothèque de manière responsable	13
Bibliographie et lectures complémentaires / 14+	

01 Le paysage des technologies quantiques

Les technologies quantiques exploitent des systèmes physiques contrôlés dont le comportement nécessite la mécanique quantique. Le calcul traite l'information ; les communications distribuent des états ou des clés ; les capteurs mesurent des grandeurs physiques. Lasers, transistors et résonance magnétique reposent déjà sur la physique quantique. Les approches récentes utilisent des systèmes individuels, la cohérence et parfois l'intrication comme ressources maîtrisées.

Un ordinateur quantique est généralement un accélérateur relié à des ordinateurs classiques. Il ne remplace pas tous les processeurs et n'accélère pas toutes les tâches. Un avantage utile signifie une meilleure solution à un coût total acceptable, préparation, contrôle, répétitions et validation compris. Aucune technologie expérimentalement établie ne se situe simplement au-dessus de toutes les technologies quantiques. Chaque architecture répond à des problèmes différents. [R1, R2]

02 Un siècle d'idées et d'expériences

Planck introduit la quantification de l'énergie en 1900 ; Einstein relie les quanta de lumière à l'effet photoélectrique en 1905. Les mécaniques matricielle et ondulatoire apparaissent en 1925-1926. L'argument EPR de 1935 et le théorème de Bell de 1964 précisent l'importance de corrélations impossibles à reproduire par des modèles classiques locaux sous les hypothèses considérées.

Dans les années 1980, Feynman motive la simulation quantique et Deutsch formalise le calcul quantique universel. BB84 propose la distribution quantique de clés en 1984. L'algorithme de Shor de 1994 et celui de Grover de 1996 établissent des possibilités majeures ; la correction quantique d'erreurs apparaît en 1995. Suivent les portes contrôlées, les processeurs accessibles dans le cloud, des simulateurs plus puissants et les démonstrations de qubits logiques. Ces réalisations distinctes ne prouvent pas que toute application utile soit déjà pratique. [R1, R2, R10]

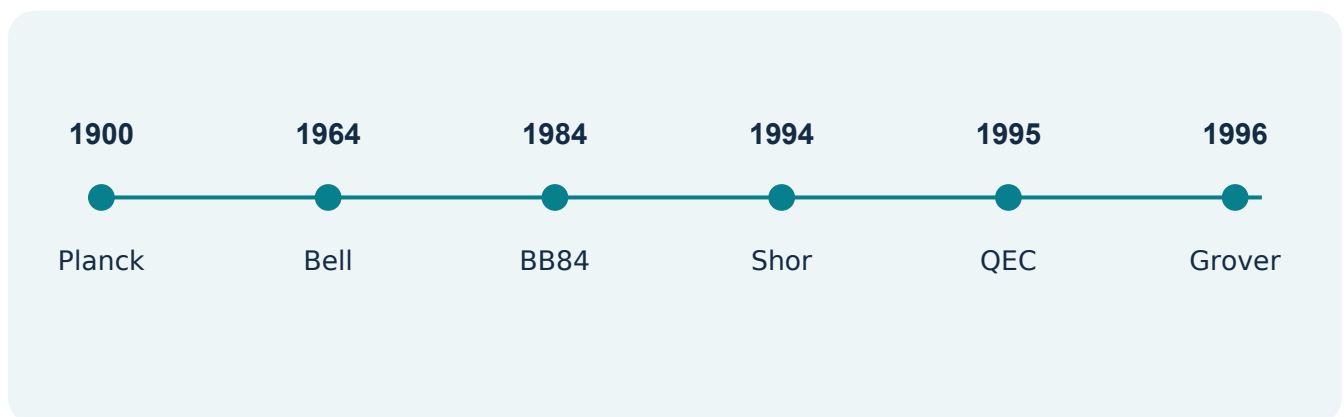


Schéma pédagogique original 01. Jalons historiques choisis ; les dates indiquent des idées, pas des produits disponibles.

03 États, amplitudes et mesure

Un qubit est un système quantique contrôlable à deux niveaux. Dans une base choisie, son état pur est $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, avec des amplitudes complexes et $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. La mesure donne 0 ou 1 avec les probabilités correspondantes. Une seule mesure ne révèle pas les deux amplitudes ; estimer l'état demande de nombreux exemplaires préparés identiquement et plusieurs réglages de mesure.

La phase relative modifie les interférences ; une phase globale ne change pas les prédictions. L'évolution cohérente d'un système isolé est unitaire ; un Hamiltonien décrit son énergie et sa dynamique. Les états mixtes représentent une incertitude ou une intrication avec un environnement non observé et nécessitent une matrice de densité. La sphère de Bloch représente les états purs d'un qubit à sa surface et les états mixtes à l'intérieur, et non la trajectoire d'un électron. [R10, R11]

04 La superposition ne contient pas des réponses lisibles

Les états $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ et $|-\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ donnent les mêmes probabilités 0/1 dans la base de calcul. Une porte de Hadamard H avant la mesure les distingue : $H|+\rangle = |0\rangle$ et $H|-\rangle = |1\rangle$. L'interférence transforme donc la phase en différences de probabilités observables.

Un état pur de n qubits comporte 2^n amplitudes, mais sa lecture ne fournit pas 2^n réponses classiques. L'algorithme doit organiser les interférences pour favoriser les résultats utiles. La taille de l'espace des états ne prouve pas une accélération : certains grands circuits quantiques se simulent efficacement sur des machines classiques. Le défi technique consiste à conserver les interférences voulues tout en supprimant les interactions indésirables. [R2, R10]

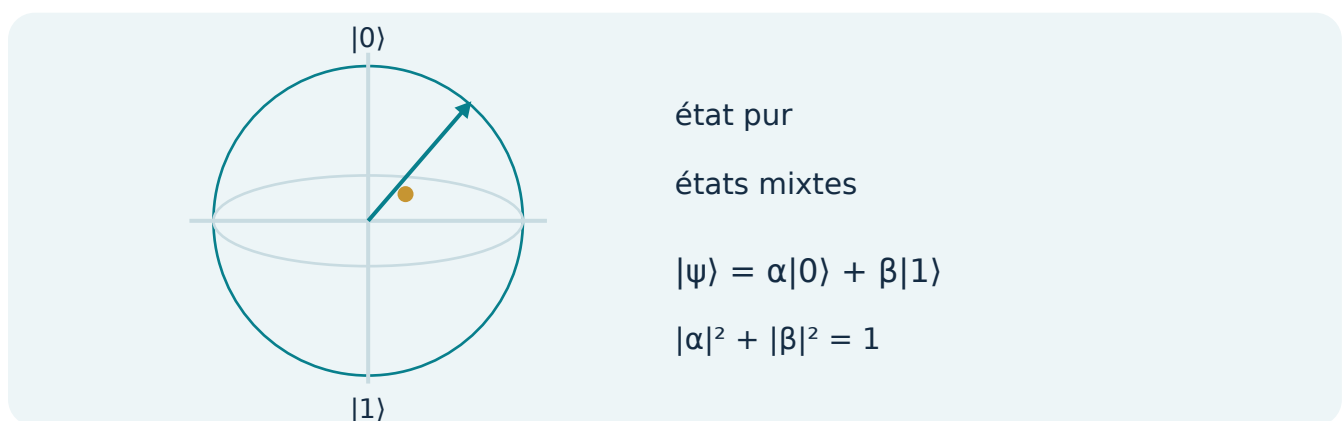


Schéma pédagogique original 02. Sphère de Bloch : représentation géométrique d'un qubit, pas une orbite électronique.

05 Intrication, corrélations et non-clonage

À partir de $|00\rangle$, appliquons H au premier qubit puis CNOT, avec ce qubit comme contrôle. On obtient l'état de Bell $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$. Les résultats idéaux dans la base de calcul sont 00 et 11, équiprobables. Chaque sous-système paraît aléatoire. Des corrélations dans une seule base ne certifient pas l'intrication : un mélange classique de 00 et 11 donne la même distribution.

Un état intriqué ne peut pas s'écrire comme un mélange d'états produits. Des mesures adaptées ou des témoins d'intrication le distinguent de corrélations classiques. Il ne transmet pas de message contrôlable plus vite que la lumière. Le non-clonage interdit un copieur universel parfait d'un état quantique inconnu ; copier des états classiques orthogonaux connus reste possible. La téléportation consomme de l'intrication partagée et exige une communication classique. [R3, R10]

06 Portes, circuits et première expérience

X échange $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Z change le signe de l'amplitude de $|1\rangle$. H change de base entre calcul et superposition. S et T appliquent des phases relatives précises ; les rotations continues offrent une autre description. CNOT inverse sa cible lorsque le contrôle vaut $|1\rangle$ dans la base de calcul. Un ensemble universel de portes peut approximer tout calcul unitaire avec une précision choisie.

Les fils désignent les qubits et l'axe horizontal l'ordre des opérations, pas une distance physique. Préparez $|00\rangle$, appliquez H(0), CNOT(0,1), mesurez les deux qubits et répétez 1 000 fois. Idéalement, environ 500 résultats sont 00 et 500 sont 11, avec des fluctuations statistiques. Le bruit ajoute d'autres résultats. Notez le simulateur ou appareil, le circuit, l'ordre des bits, les répétitions et l'heure de calibration. Ceci illustre préparation et corrélation, pas un avantage de calcul. [R10, R11]

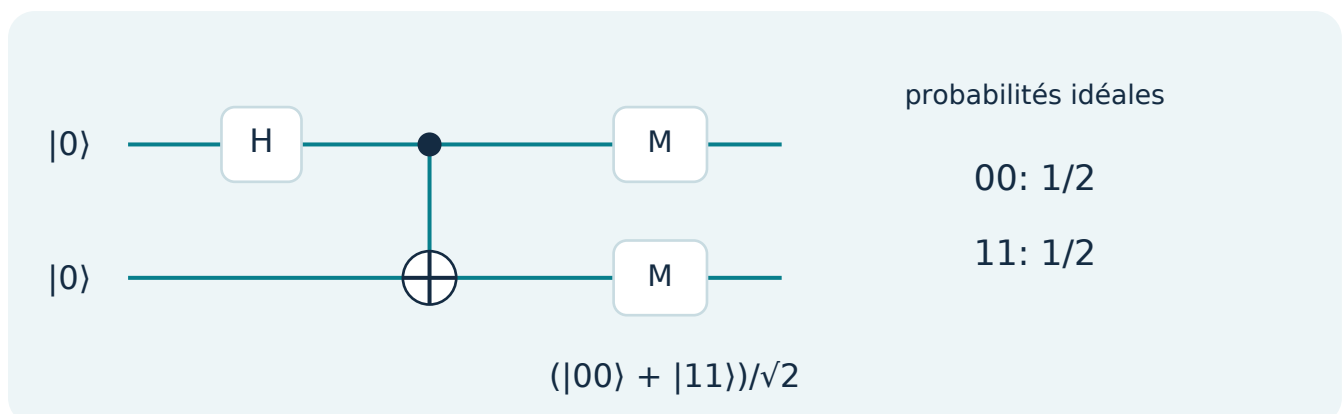


Schéma pédagogique original 03. Circuit de Bell : les comptes idéaux en base Z ne prouvent pas seuls l'intrication.

07 Algorithmes et conditions d'accélération

Shor ramène la factorisation et les logarithmes discrets à des calculs quantiques liés aux périodes, menaçant des systèmes à clé publique sur un matériel tolérant aux fautes suffisamment capable. Grover nécessite $O(\sqrt{N})$ appels à un oracle pour un élément marqué parmi N candidats, contre $O(N)$ requêtes classiques. L'oracle, l'accès aux données et la correction d'erreurs ont aussi un coût.

L'estimation de phase renseigne sur les valeurs propres lorsque les évolutions contrôlées et états d'entrée requis sont disponibles. La simulation quantique vise la dynamique moléculaire et des matériaux. VQE et QAOA associent circuits paramétrés et optimisation classique, sans supériorité pratique générale démontrée. Les propositions pour les systèmes linéaires ou l'apprentissage supposent souvent un chargement efficace, un bon conditionnement ou des sorties limitées. Il faut comparer des chaînes complètes à de bonnes méthodes classiques, pas seulement une sous-routine idéalisée. [R2, R1]

08 Comment le matériel encode un qubit

Les circuits supraconducteurs utilisent des oscillateurs électriques non linéaires, souvent des transmons, avec contrôle micro-onde et refroidissement au millikelvin. Les ions piégés utilisent des états atomiques internes confinés électromagnétiquement, avec des portes optiques ou micro-ondes. Les atomes neutres sont disposés par pinces ou réseaux optiques ; les interactions de Rydberg peuvent les intriquer.

Les qubits de spin en semi-conducteur utilisent des spins électroniques ou nucléaires et promettent une fabrication dense, avec des difficultés de contrôle uniforme et d'interconnexion. La photonique encode l'information dans la lumière, par exemple ses modes ou sa polarisation ; pertes, sources, détection et opérations intrigantes comptent. Les centres colorés associent spins solides et interfaces optiques. Les approches topologiques recherchent des encodages protégés, mais nécessitent une vérification indépendante et des portes extensibles. Le nombre de qubits ne suffit pas à classer les plateformes. [R3, R8, R21]



Schéma pédagogique original 04. Six approches physiques ; les cases sont des catégories, pas un classement.

09 Le processeur n'est qu'une partie de la machine

Un système fonctionnel exige préparation, adressage, interactions intriquantes, lecture, réinitialisation et calibration. La connectivité détermine les interactions directes possibles. Le routage peut ajouter des opérations SWAP et augmenter durée et erreurs. Les fuites quittent le sous-espace à deux niveaux prévu ; la diaphonie permet à une commande de perturber un autre qubit.

Rendement de fabrication, assemblage, alignement optique, vide et câblage peuvent compter autant qu'une fidélité de porte record. Les processeurs modulaires nécessitent des liens rapides et fiables et des protocoles tenant compte des tentatives d'intrication échouées. Simulation analogique et recuit quantique emploient des modèles de contrôle différents des circuits universels ; leurs nombres de qubits et performances ne sont pas directement interchangeables. [R1, R3, R8]

10 Électronique de contrôle, optique et cryogénie

Pour un processeur supraconducteur, le logiciel classique demande des impulsions ; générateurs de formes d'onde et composants micro-ondes les façonnent ; des lignes filtrées et atténuées les conduisent à la puce froide. Les signaux de lecture reviennent par amplification et numérisation. Un décodeur ou contrôleur de rétroaction doit parfois répondre dans les délais imposés par la correction d'erreurs.

Un réfrigérateur à dilution fournit plusieurs étages thermiques ; le millikelvin n'est pas le zéro absolu. Davantage de fils apporte chaleur, bruit et contraintes d'intégration. CMOS cryogénique et multiplexage visent à réduire cette charge, mais dissipation et fidélité doivent être mesurées. Ions et atomes neutres dépendent surtout de lasers, de vide et d'optique, pas des mêmes exigences de refroidissement. Certains détecteurs photoniques restent cryogéniques. Les schémas expliquent les fonctions, sans constituer des plans de fabrication. [R8, R3, R21]

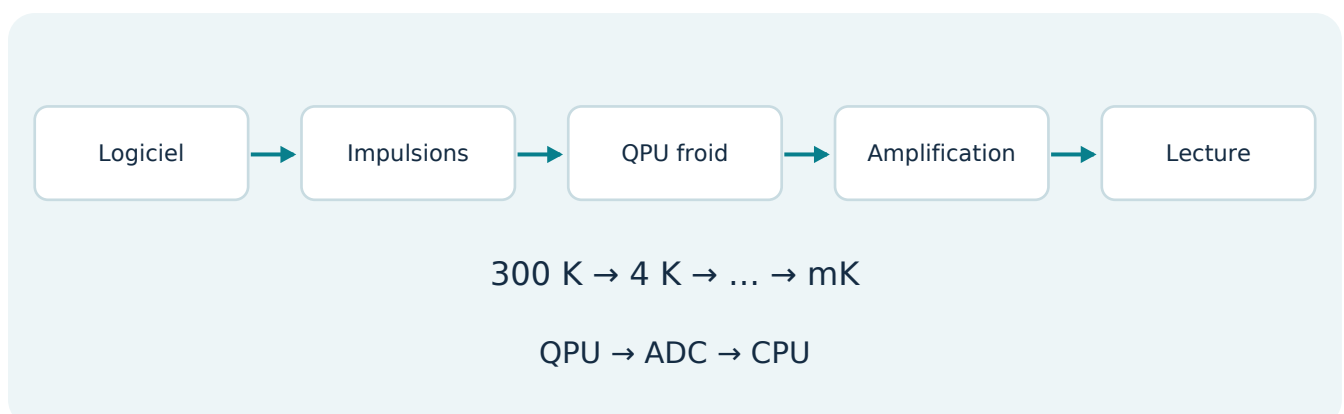


Schéma pédagogique original 05. Chaîne fonctionnelle supraconductrice ; le retour exige amplification et numérisation.

11 Bruit et correction d'erreurs

La relaxation, souvent caractérisée par T_1 , modifie les populations excitées ; le déphasage réduit la cohérence de phase (T_2). Erreurs de portes et de mesure, pertes et perturbations corrélées ont des effets différents. L'atténuation des erreurs estime des résultats moins biaisés par échantillonnage ou modélisation supplémentaire ; elle n'assure généralement pas une tolérance aux fautes extensible.

La correction quantique encode l'information logique dans plusieurs degrés de liberté physiques et mesure des syndromes sans lire directement les amplitudes logiques. Un code de répétition à trois qubits transforme $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ en $\alpha|000\rangle + \beta|111\rangle$ et corrige une inversion de bit sous son modèle d'erreur ; il ne corrige pas les erreurs de phase arbitraires. Une protection complète exige des codes plus riches. Les mesures de syndrome peuvent elles-mêmes échouer et doivent généralement être répétées. [R4, R12]

12 Qubits logiques et tolérance aux fautes

Un code de surface utilise des contrôles locaux de parité sur un réseau. La distance du code fixe la plus petite erreur logique indétectable ; l'augmenter demande davantage de qubits physiques. Sous un seuil de bruit adapté, l'erreur logique peut diminuer avec la taille du code. Ce seuil dépend du modèle, des circuits et du décodeur ; ce n'est pas une spécification matérielle universelle.

La tolérance aux fautes exige aussi des portes logiques fiables, la préparation, les mesures et le décodage en temps réel. Certaines opérations non-Clifford nécessitent des ressources auxiliaires coûteuses, comme des états magiques distillés. Les codes bosoniques et LDPC quantiques explorent d'autres compromis. Une mémoire protégée ne démontre pas un ordinateur complet utile. Les estimations doivent préciser algorithme, probabilité d'échec visée, bruit physique, durée du cycle, code et connectivité. [R4, R13]

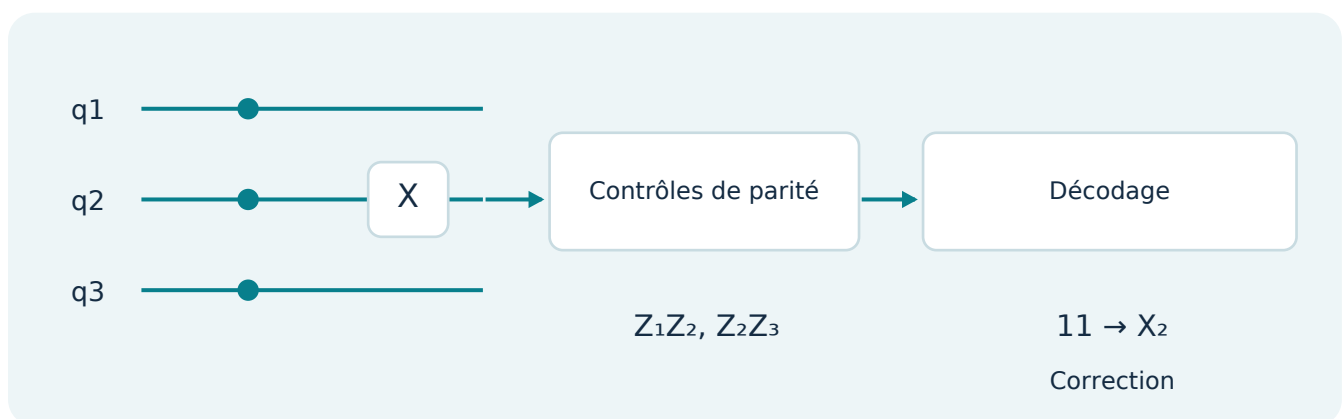


Schéma pédagogique original 06. Code à trois qubits : les parités identifient une inversion de bit, pas les erreurs de phase générales.

13 La pile logicielle quantique

Un travail commence par un modèle du problème et une référence classique. L'algorithme devient un circuit ou une représentation intermédiaire. La compilation décompose en portes natives, choisit les qubits physiques et route les interactions. L'ordonnancement et les impulsions relient programme et appareil. Les mesures reviennent au traitement classique ; les méthodes hybrides répètent cette boucle.

Qiskit, Cirq et PennyLane accompagnent certaines étapes ; OpenQASM décrit les programmes quantiques. Les interfaces évoluent : les exemples exécutables doivent fixer leurs versions et citer la documentation courante. Un simulateur peut représenter états idéaux, canaux bruités ou structures particulières. Le coût classique dépend de la structure, pas seulement du nombre de qubits. Conservez code, graines aléatoires, choix de compilation, calibrations et résultats bruts pour la reproductibilité. [R14, R15]

14 Des benchmarks réellement informatifs

Séparez qubits physiques et logiques. Les métriques utiles incluent erreurs de portes et de lecture, cohérence, connectivité, profondeur, débit, erreur logique par cycle et durée totale jusqu'à la précision visée. Le benchmarking randomisé estime l'erreur sous certaines hypothèses ; l'entropie croisée et les tests applicatifs répondent à d'autres questions. Un score unique cache les compromis.

Une affirmation crédible d'avantage définit tâche et précision, inclut préparation, répétitions et surcoûts classiques, et compare les meilleures méthodes pertinentes. Vérifiez les résultats ou utilisez une validation statistique adaptée. Distinguez une expérience difficile à simuler d'une application rentable. Les feuilles de route industrielles sont des prévisions. Un record obtenu lors d'une calibration n'est pas automatiquement une capacité de production durable. [R1, R16, R20]

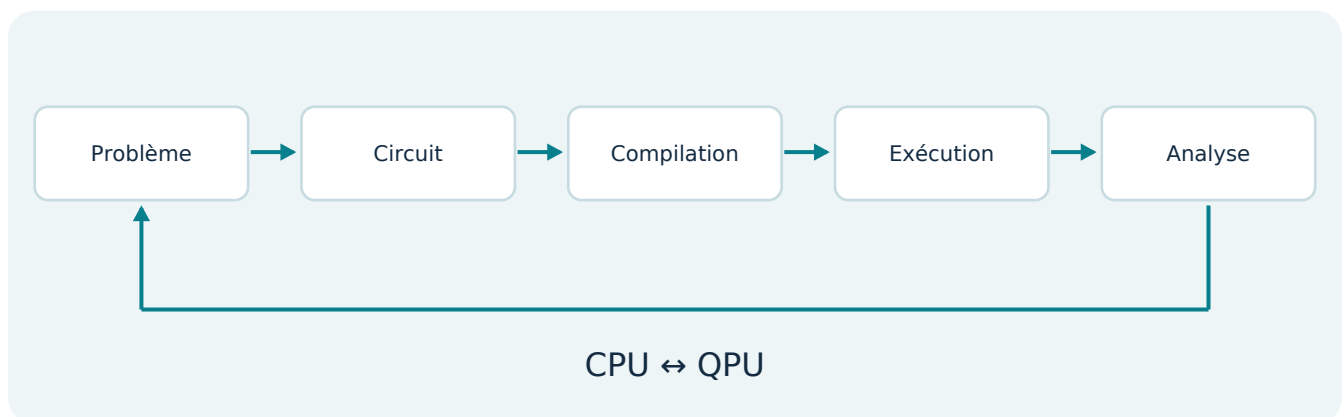


Schéma pédagogique original 07. Flux logiciel : les mesures reviennent à l'analyse classique et peuvent déclencher une nouvelle exécution.

15 Communications et internet quantique

Les photons transportent des états quantiques dans les fibres ou l'espace libre. Les pertes augmentent avec la distance et un état inconnu ne peut être amplifié par simple copie. Les répéteurs quantiques visent à combiner création d'intrication, mémoires et échange d'intrication, parfois purification ou correction d'erreurs, pour étendre les liens utilisables.

La téléportation transfère un état grâce à une paire intriquée et deux bits classiques dans le protocole usuel à qubit ; elle ne déplace pas la matière et ne dépasse pas la lumière. Des réseaux pourraient relier des processeurs, distribuer des clés ou améliorer la mesure collective. Les liens et petits réseaux démontrés sont importants, mais un internet quantique universel et extensible reste un objectif. Les réseaux à nœuds de confiance et les réseaux d'intrication à répéteurs offrent des garanties et fonctions différentes. [R3]

16 Capteurs et mesure de précision

Les capteurs quantiques traduisent champ, accélération ou fréquence en modifications d'un état contrôlé. Dans une séquence de Ramsey, une première impulsion crée la cohérence, l'évolution libre accumule une phase dépendant du signal, puis une seconde convertit cette phase en population mesurable. Horloges atomiques, interféromètres atomiques et magnétomètres de spin suivent des idées apparentées.

Pour des sondes idéales indépendantes, l'incertitude statistique diminue généralement comme $1/\sqrt{N}$. Des ressources intriquées peuvent améliorer cette loi sous certaines hypothèses, mais bruit, pertes, préparation et lecture peuvent annuler le gain. Évaluez ensemble sensibilité, bande passante, résolution spatiale, dérive et environnement. Certaines technologies sont mûres ; beaucoup d'applications biomédicales ou distribuées restent des recherches, pas des dispositifs diagnostiques validés. [R5, R17]

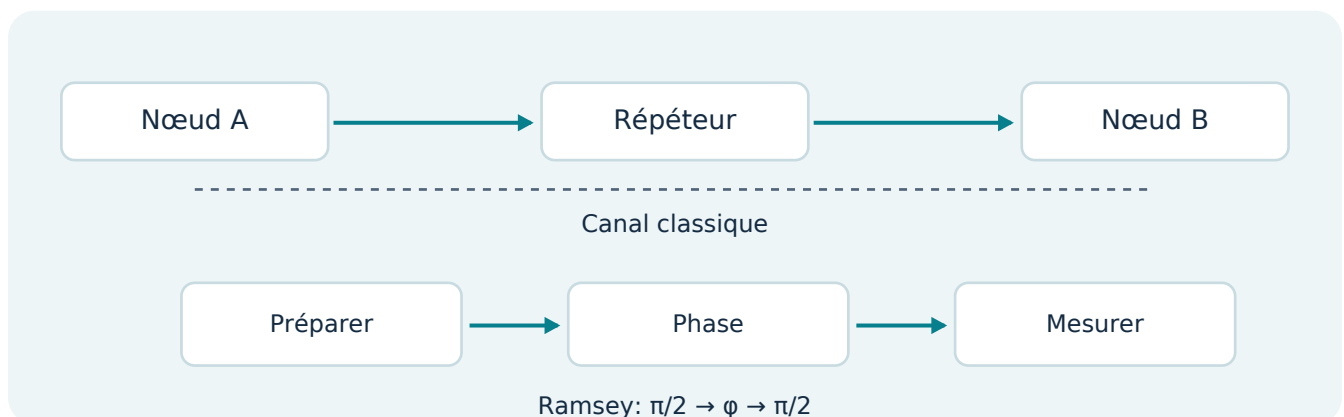


Schéma pédagogique original 08. Les liens quantiques exigent une coordination classique. Ramsey convertit une phase en signal.

17 Cryptographie post-quantique et QKD

La cryptographie post-quantique (PQC) emploie des algorithmes classiques conçus pour résister aux attaques classiques et quantiques connues, sur infrastructure classique. FIPS 203 de NIST, publié en 2024, définit ML-KEM pour l'établissement de clés ; FIPS 204 et 205 définissent les signatures ML-DSA et SLH-DSA. Ce sont des fonctions distinctes, pas trois chiffrements interchangeables.

La distribution quantique de clés (QKD) utilise des signaux quantiques et un canal classique authentifié, sous hypothèses explicites. Elle n'authentifie pas seule les identités, ne protège pas les terminaux compromis et n'élimine pas les attaques d'implémentation. Migrer vers la PQC exige inventaire cryptographique, tests de compatibilité et logiciels maintenus ; ce guide n'est pas une spécification de déploiement. Les secrets durables motivent le risque « collecter maintenant, déchiffrer plus tard ». Consultez normes, errata et recommandations à jour avant mise en œuvre. [R6, R7, R9, R18]

18 Résultats à la date de revue de 2026

Des expériences publiées établissent des processeurs contrôlables, des liens quantiques et des progrès de réduction des erreurs logiques. Le travail de Google sur le code de surface, publié en ligne en décembre 2024 puis dans Nature en 2025, rapporte un comportement sous le seuil dans un dispositif précis. Il ne démontre pas toute application tolérante aux fautes à grande échelle. L'étude de contrôle de spin par CMOS au millikelvin de 2025 traite un obstacle concret d'intégration. [R13, R8]

La Quantum Benchmarking Initiative de DARPA étudie si un calcul industriellement utile peut être réalisé avant 2033 ; cette date est un objectif, pas une garantie. Aucun classement ne représente toutes les plateformes et applications. Cette édition retient des jalons vérifiés plutôt qu'un tableau exhaustif des records ; toute performance doit être lue avec sa date, ses hypothèses et son benchmark. [R16]

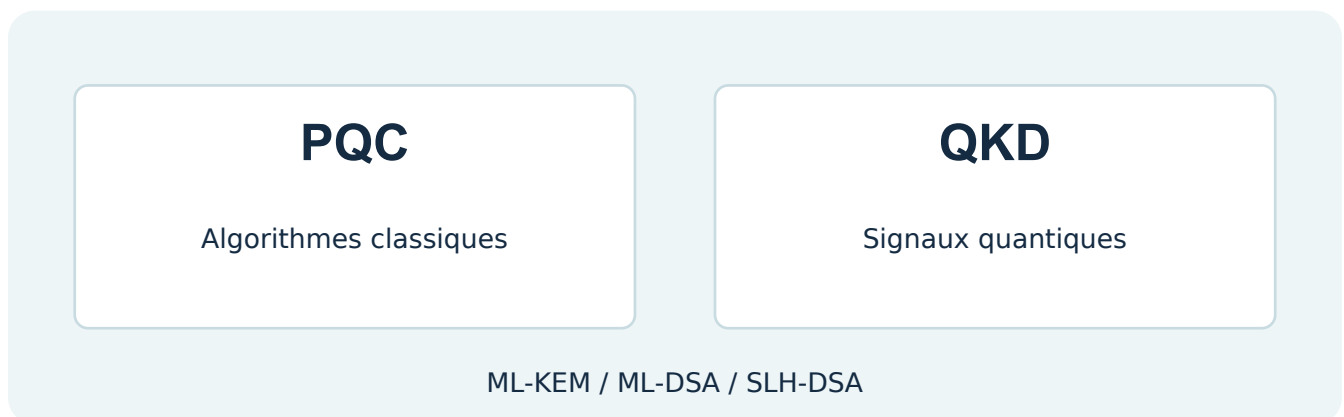


Schéma pédagogique original 09. PQC utilise du matériel classique ; QKD exige des signaux quantiques et une communication classique authentifiée.

19 Perspectives conditionnelles, non inévitables

Les pistes majeures incluent opérations logiques plus fiables, codes moins coûteux, meilleurs décodeurs, interconnexions modulaires, fabrication et contrôle intégrés. Des systèmes hétérogènes pourraient attribuer mémoire, calcul et communication à différentes plateformes. DARPA HARQ étudie cette intégration ; le programme n'établit pas une supériorité universelle de ces machines. [R19]

Apprentissage quantique, propositions neuromorphiques, encodages topologiques et capteurs distribués sont des domaines actifs à preuves variables. Accélération exponentielle universelle, réponses parallèles illimitées ou technologie au-delà de la physique quantique ne sont pas établies. Une feuille de route utile fixe un jalon testable : précision logique, durée stable, taux de réussite des liens ou bénéfice applicatif complet. Les projections doivent expliciter leurs hypothèses et évoluer avec les résultats. [R1, R2, R16]

20 Parcours d'apprentissage et exercices

Commencez par vecteurs, nombres complexes, probabilités et petits circuits. Calculez H, X et CNOT sur papier puis dans un simulateur idéal. Ajoutez un bruit simple et comparez les distributions. Étudiez une plateforme matérielle puis l'extraction des syndromes et les opérations logiques. Le manifeste conduit des introductions aux revues et expériences originales.

Exercice 1 : si $\alpha = \sqrt{3}/2$ et $\beta = 1/2$, combien vaut $P(1)$? Réponse : $1/4$. Exercice 2 : pourquoi les comptes 00/11 ne prouvent-ils pas l'intrication ? Un mélange classique produit les mêmes comptes. Exercice 3 : pour 1 000 essais indépendants avec $p = 1/2$, l'écart-type du compte est $\sqrt{(1000 \times 1/2 \times 1/2)}$, soit environ 15,8. Exercice 4 : le code de répétition corrige-t-il toute erreur ? Le code à trois qubits pour inversions de bit ne corrige pas les erreurs de phase générales.



Schéma pédagogique original 10. Les jalons sont conditionnels ; les flèches ne promettent aucune date de livraison.

21 Utiliser la bibliothèque de manière responsable

Chaque notice externe indique auteur, thème, source originale, licence, date de vérification et recommandation de publication. Les copies locales sont incluses uniquement si les conditions vérifiées autorisent cet usage. Un accès gratuit sans droit de redistribution reste un lien. Une restriction NonCommercial n'est pas présumée compatible avec un site d'entreprise. Les originaux tiers restent inchangés et ne deviennent pas des publications LIGHT BRIDGE GROUP.

Le guide et ses figures conceptuelles sont des contenus pédagogiques originaux créés pour LIGHT BRIDGE GROUP. Les références étayent les faits sans impliquer l'approbation des institutions citées. Les titres bibliographiques restent dans leur langue originale pour faciliter leur recherche. Vérifiez périodiquement les liens et errata, surtout ceux des normes cryptographiques.

01 → 06 → 11 → 17

R10 Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing

R1 Quantum Computing in the NISQ era and beyond

R2 Quantum algorithms: an overview

R4 A Short Introduction to Quantum Error Correction

R3 Quantum networks with neutral atom processing nodes

R5 Quantum sensing

R21 A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits

R6 FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard

Bibliographie et lectures complémentaires

R1 John Preskill / Caltech (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond.

<https://quantum-journal.org/papers/q-2018-08-06-79/>

R2 Ashley Montanaro / University of Bristol (2016). Quantum algorithms: an overview.

<https://www.nature.com/articles/npjqi201523>

R3 Jacob P. Covey; Harald Weinfurter; Hannes Bernien (2023). Quantum networks with neutral atom processing nodes.

<https://www.nature.com/articles/s41534-023-00759-9>

R4 Thiago Lucena de Macedo Guedes (2026). A Short Introduction to Quantum Error Correction.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13538-026-02007-9>

R5 C. L. Degen; F. Reinhard; P. Cappellaro (2017). Quantum sensing.

<https://arxiv.org/abs/1611.02427>

R6 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/final>

R7 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/final>

R8 Bartee, Samuel K. et al. (2025). Spin-qubit control with a milli-kelvin CMOS chip.

<https://www.nature.com/articles/s41586-025-09157-x>

R9 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 205: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/205/final>

R10 Thomas G. Wong / Creighton University (2023). Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing.

<https://www.thomaswong.net/>

R11 John Preskill / Caltech (updated chapters). Lecture Notes for Physics 219: Quantum Computation.

<https://www.preskill.caltech.edu/ph219/index.html>

R12 Joschka Roffe (2019). Quantum Error Correction: An Introductory Guide.

<https://arxiv.org/abs/1907.11157>

R13 Google Quantum AI and Collaborators (2024 online / 2025 volume). Quantum error correction below the surface code threshold.

<https://www.nature.com/articles/s41586-024-08449-y>

R14 IBM Quantum (2026). IBM Quantum documentation and learning.

<https://quantum.cloud.ibm.com/docs/en/guides>

R15 OpenQASM contributors (2026). OpenQASM Live Specification.

<https://openqasm.com/>

R16 DARPA (2026). Quantum Benchmarking Initiative (QBI).

<https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-benchmarking-initiative>

R17 Daniele Faccio / University of Glasgow (2024). The future of quantum technologies for brain imaging.

<https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3002824>

R18 Valerio Scarani; Helle Bechmann-Pasquinucci; Nicolas J. Cerf; Miloslav Dusek; Norbert Lutkenhaus; Momtchil Peev (2009). The Security of Practical Quantum Key Distribution.

<https://arxiv.org/abs/0802.4155>

R19 DARPA (2025-2026). Heterogeneous Architectures for Quantum (HARQ).

<https://www.darpa.mil/research/programs/heterogeneous-architectures-for-quantum>

R20 Akeel Hashim et al. (2025). Practical Introduction to Benchmarking and Characterization of Quantum Computers.

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.030202>

R21 Philip Krantz; Morten Kjaergaard; Fei Yan; Terry P. Orlando; Simon Gustavsson; William D. Oliver (2019). A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits.

<https://arxiv.org/abs/1904.06560>

Document créé par LIGHT BRIDGE GROUP | lbgroup.rs. Version 1.0, 26 septembre 2026. Texte original, traductions et schémas préparés pour LIGHT BRIDGE GROUP. Cette édition n'a pas fait l'objet d'une expertise scientifique indépendante. Les publications externes conservent leurs auteurs et leurs licences propres. Les éditions anglaise et serbe couvrent le même contenu ; les traductions préservent les distinctions scientifiques.