



Interaction – Intelligence Artificielle Générale et Informatique Quantique

L'émergence de l'informatique quantique et la quête de l'intelligence artificielle générale (AGI) représentent deux des avancées technologiques les plus transformatrices du XXI^e siècle. Leur convergence offre des possibilités sans précédent pour résoudre des problèmes complexes tout en soulevant des questions cruciales concernant la durabilité environnementale et énergétique. Cette synthèse examine comment l'intégration de l'AGI avec l'informatique quantique peut contribuer à un développement technologique durable, en analysant les défis techniques, les applications pratiques, et les implications pour l'avenir de la computation.^{[1][2][3]}

Conceptual framework showing the interplay between AGI, Quantum Computing, and Sustainability with their key components and interconnections.

Les recherches récentes démontrent que l'informatique quantique peut améliorer significativement l'efficacité énergétique des systèmes d'intelligence artificielle, avec des réductions de coûts opérationnels atteignant 27 à 34% dans les infrastructures cloud. Parallèlement, l'AGI nécessite des architectures computationnelles qui dépassent les capacités des systèmes classiques, rendant l'informatique quantique non seulement souhaitable mais potentiellement essentielle. Cette confluence technologique doit cependant être développée dans une perspective de durabilité à long terme, prenant en compte l'empreinte carbone, la consommation énergétique et l'utilisation responsable des ressources.^{[1][3][4][5][6]}

Fondements Théoriques de l'Interaction AGI-Quantique

Architecture Computationnelle pour l'AGI

L'intelligence artificielle générale représente un système capable de comprendre, apprendre et appliquer des connaissances à travers différents domaines de manière comparable à l'intelligence humaine. Contrairement à l'intelligence artificielle étroite (narrow AI) qui excelle dans des tâches spécifiques, l'AGI nécessite des capacités cognitives généralisées incluant le raisonnement abstrait, le transfert des connaissances inter-domaines, et l'adaptation contextuelle. Les architectures actuelles d'IA, bien que performantes dans leurs domaines spécifiques, demeurent fondamentalement limitées par leur nature déterministe et leur incapacité à généraliser véritablement.^{[1][3][7][8][9]}

Le développement de l'AGI s'appuie sur plusieurs paradigmes computationnels convergents. L'informatique hyperdimensionnelle et les architectures symboliques vectorielles offrent des mécanismes pour représenter et manipuler des informations de manière à imiter les processus cognitifs humains. Ces approches exploitent des espaces de grande dimension pour encoder des relations sémantiques complexes et permettent des opérations qui préservent la structure informationnelle. Les réseaux neuronaux profonds, bien qu'efficaces pour l'apprentissage de motifs, nécessitent des

améliorations substantielles en termes d'efficacité computationnelle et de capacité de généralisation pour atteindre le niveau de l'AGI.^{[3][8][1]}

L'intégration de principes quantiques dans les architectures AGI promet de surmonter plusieurs limitations fondamentales. La superposition quantique permet l'exploration simultanée de multiples états computationnels, tandis que l'intrication offre des mécanismes de corrélation non-classiques qui pourraient faciliter le transfert de connaissances et l'apprentissage contextuel. Les réseaux neuronaux quantiques (QNN) démontrent des capacités d'apprentissage améliorées avec une complexité algorithmique réduite par rapport à leurs homologues classiques. Cette synergie entre principes quantiques et architectures cognitives constitue une voie prometteuse vers la réalisation de l'AGI tout en maintenant une efficacité énergétique acceptable.^{[7][10][11][12][1]}

Principes de l'Informatique Quantique

L'informatique quantique exploite les propriétés fondamentales de la mécanique quantique pour effectuer des calculs qui seraient impraticables avec des ordinateurs classiques. Le qubit, unité élémentaire de l'information quantique, peut exister dans une superposition d'états 0 et 1, permettant un parallélisme computationnel massif. Cette capacité de traitement simultané d'informations multiples constitue l'avantage fondamental de l'informatique quantique et s'avère particulièrement pertinente pour les problèmes d'apprentissage automatique et d'optimisation.^{[12][13][14][15][16][17]}

Les portes quantiques manipulent les qubits à travers des transformations unitaires, créant des circuits quantiques complexes capables d'effectuer des calculs sophistiqués. L'intrication quantique, phénomène par lequel des qubits deviennent corrélés de manière non-classique, permet la création d'états qui n'ont pas d'équivalent dans la computation classique. Cette propriété s'avère cruciale pour certains algorithmes quantiques qui surpassent exponentiellement leurs homologues classiques dans des tâches spécifiques comme la factorisation ou la recherche dans des bases de données non structurées.^{[14][15][16][17][12]}

Les algorithmes quantiques pour l'apprentissage automatique (QML) exploitent ces propriétés pour améliorer l'efficacité et la performance des modèles d'apprentissage. Les machines à vecteurs de support quantiques (QSVM) démontrent des améliorations de 3 à 4% en précision par rapport aux approches classiques. Les classificateurs quantiques variationnels (VQC) et les réseaux neuronaux quantiques montrent des avantages encore plus significatifs, avec des améliorations pouvant atteindre 7% dans certaines applications. Ces gains, bien que modestes en termes absolus, deviennent substantiels lorsqu'on considère l'échelle des problèmes d'apprentissage profond nécessaires pour l'AGI.^{[11][18][19][20][21][22][12]}

Convergence Technologique

La convergence de l'AGI et de l'informatique quantique s'appuie sur plusieurs synergies technologiques fondamentales. L'apprentissage par renforcement quantique combine les capacités de décision adaptative de l'apprentissage par renforcement avec le parallélisme quantique pour explorer efficacement des espaces de solutions vastes. Cette approche s'avère particulièrement pertinente pour l'AGI, où la capacité à apprendre de manière autonome dans des environnements complexes constitue une exigence centrale.^{[7][10][17]}

Les autoencodeurs quantiques offrent des mécanismes efficaces pour la compression et la représentation de données dans des espaces de grande dimension. Ces structures peuvent capturer des relations complexes dans les données tout en maintenant une empreinte computationnelle réduite, un équilibre crucial pour les systèmes AGI qui doivent traiter d'énormes volumes d'informations diverses. L'algorithme d'optimisation approximative quantique (QAOA) fournit des solutions pour des problèmes d'optimisation combinatoire qui apparaissent fréquemment dans l'apprentissage automatique et l'entraînement de réseaux neuronaux.^{[12][19][23][24]}

L'intégration de l'informatique quantique dans les processus d'apprentissage profond promet des accélérations substantielles. Les recherches démontrent que les algorithmes quantiques peuvent réduire la complexité temporelle de logarithmique dans le nombre de vecteurs et leur dimension, représentant une accélération exponentielle par rapport aux algorithmes classiques. Cette efficacité devient critique lorsqu'on considère les milliards de paramètres requis pour les modèles de langage de grande taille et autres architectures profondes nécessaires à l'AGI. Cependant, la réalisation pratique de ces avantages théoriques nécessite des avancées continues dans le matériel quantique et les techniques de correction d'erreurs.^{[21][22][25][26]}

Percée de l'Avantage Quantique Vérifiable : L'Algorithme Quantum Echoes

Le Premier Avantage Quantique Vérifiable au Monde

En octobre 2025, l'équipe Google Quantum AI a franchi une étape historique en démontrant le premier algorithme au monde avec avantage quantique vérifiable, baptisé Quantum Echoes. Cette percée représente un moment décisif qui transforme l'informatique quantique d'une science théorique en un outil pratique pour faire de la science véritable. L'accomplissement devient d'autant plus significatif que, pour la première fois dans l'histoire, un ordinateur quantique a exécuté avec succès un algorithme vérifiable qui surpasse les capacités des superordinateurs classiques.^{[1][27][28][29]}

Le processeur quantique Willow de Google, équipé de 105 qubits, a exécuté l'algorithme Quantum Echoes 13 000 fois plus rapidement que l'un des superordinateurs les plus puissants au monde. Cette accélération spectaculaire démontre non seulement la supériorité computationnelle quantique, mais établit également un nouveau paradigme où les résultats peuvent être vérifiés de manière croisée par d'autres ordinateurs quantiques ou même par la nature elle-même. Cette propriété de vérifiabilité distingue fondamentalement cette démonstration des précédentes revendications de suprématie quantique, qui restaient difficiles à valider indépendamment.^{[27][28][29][30][1]}

Le processeur Willow représente l'aboutissement d'années de développement en correction d'erreurs quantiques et en conception de qubits supraconducteurs. Les circuits intégrés supraconducteurs de Willow offrent des portes quantiques d'une précision exceptionnelle, combinées à des techniques sophistiquées d'atténuation d'erreurs. Cette haute performance matérielle permet l'exécution de calculs très complexes impliquant des milliers de portes quantiques, une capacité essentielle pour extraire les signaux significatifs du bruit de fond. De plus, Willow peut effectuer des mesures quantiques à une vitesse extraordinaire, réalisant des millions de mesures en moins d'une minute.^{[28][1][27]}

L'échelle de l'expérimentation souligne la maturité croissante de la technologie quantique. Au cours du projet, l'équipe a effectué un trillion de mesures au total, représentant une portion significative de toutes les mesures jamais effectuées sur

tous les ordinateurs quantiques, faisant de cette expérience l'une des plus complexes de l'histoire de l'informatique quantique. Cette capacité à exécuter des expériences à grande échelle avec une fiabilité élevée marque une transition critique vers des applications quantiques pratiques, s'alignant avec la vision d'une AGI assistée par quantique.^{[29][1][27]}

Mécanisme de l'Algorithme Quantum Echoes

L'algorithme Quantum Echoes calcule un corrélateur hors du temps (Out-of-Time-Ordered Correlator, OTOC), une quantité physique fondamentale qui mesure les interactions sensibles entre différentes parties d'un système quantique au fil du temps et de l'espace. Historiquement, la mesure d'OTOC dans de grands systèmes quantiques représentait un défi majeur en raison de la faiblesse des signaux et du bruit environnant. L'approche de Google exploite une analogie avec l'écholocalisation utilisée par les chauves-souris pour discerner la structure d'une caverne ou le sonar employé par les sous-marins pour détecter des obstacles.^{[1][27]}

Le mécanisme repose sur une séquence élégante d'opérations quantiques. L'algorithme exécute d'abord une série de portes quantiques sur un réseau de 105 qubits du processeur Willow. Ensuite, un seul qubit du réseau est perturbé, servant d'effet papillon initial dans le système quantique. Immédiatement après cette perturbation, la même série d'opérations est exécutée en sens inverse sur le même réseau. Les signaux générés par les portes en mouvement avant et les portes en mouvement arrière interagissent ou interfèrent entre eux, formant un écho ou un mouvement ondulatoire qui révèle des informations cachées sur le système quantique.^{[27][1]}

Cette interférence quantique constructive et destructive constitue le cœur de la puissance de l'algorithme. Alors que les opérations se déroulent en sens inverse, les cohérences quantiques préservées permettent la reconstruction d'informations qui seraient autrement inaccessibles dans un système classique. La valeur OTOC finale mesure essentiellement comment une perturbation locale se propage à travers le système quantique, encodant des détails critiques sur la structure des corrélations et les dynamiques d'interaction. Cette capacité à sonder les propriétés quantiques intrinsèques d'un système offre un outil précieux pour comprendre la nature des systèmes quantiques, des molécules aux aimants, et potentiellement même aux trous noirs.^{[1][27]}

Les performances remarquables de Willow dans l'exécution de cet algorithme témoignent des avancées en correction d'erreurs quantiques. Le processeur démontre une suppression exponentielle du taux d'erreur logique avec l'augmentation de la distance du code, atteignant un facteur de suppression de 2,14 lors du passage d'une distance de code de 5 à 7. Cette réalisation place Willow au-delà du seuil de rentabilité (breakeven), où la mémoire logique dépasse la durée de vie de son meilleur qubit physique. L'intégration d'un décodeur en temps réel avec des codes de correction d'erreurs topologiques représente une innovation architecturale critique, permettant des opérations quantiques tolérantes aux pannes nécessaires pour des algorithmes complexes comme Quantum Echoes.^{[28][31]}

Applications à la Spectroscopie RMN et à la Caractérisation Moléculaire

L'algorithme Quantum Echoes ouvre une voie prometteuse vers la première application pratique au monde des ordinateurs quantiques : l'augmentation de la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN). La RMN constitue une technique puissante que les chercheurs utilisent pour étudier la forme ou la structure moléculaire, un aspect critique pour comprendre le fonctionnement des molécules biologiques comme les protéines, ou des molécules qui

stockent l'énergie dans les batteries. Si nous voulons concevoir de meilleurs médicaments, conducteurs ou matériaux, nous devons comprendre avec précision la forme moléculaire dans des environnements complexes.^{[1][27]}

L'espoir de Google Quantum AI réside dans l'utilisation de l'algorithme Quantum Echoes pour augmenter ce qui est possible avec la RMN traditionnelle. Pour tester cette capacité, l'équipe, en partenariat avec l'Université de Californie à Berkeley, a exécuté l'algorithme sur le processeur Willow pour prédire la structure de deux molécules différentes. Les prédictions ont ensuite été vérifiées en mesurant les mêmes molécules à l'aide d'un spectromètre RMN, confirmant l'exactitude des résultats quantiques. Ce résultat représente une étape clé dans l'exploration du potentiel de l'algorithme Quantum Echoes pour étudier les propriétés moléculaires à travers un large éventail d'applications réelles.^[1]

Cette convergence entre informatique quantique et spectroscopie RMN présente plusieurs avantages potentiels substantiels. Les ordinateurs quantiques peuvent simuler des systèmes moléculaires dans des conditions difficiles à reproduire expérimentalement, comme des températures extrêmes, des pressions élevées ou des environnements chimiques complexes. La capacité de l'algorithme Quantum Echoes à mesurer les corrélations hors du temps permet d'accéder à des informations sur la dynamique moléculaire qui complètent les mesures RMN traditionnelles. Alors que la RMN excelle dans la détermination de structures statiques, l'approche quantique peut révéler des détails sur les fluctuations temporelles et les chemins de réaction qui sont critiques pour comprendre la fonction biologique.^{[32][33][34][35][1]}

Les implications pour la découverte de médicaments et la science des matériaux sont considérables. La caractérisation précise des structures moléculaires dans leurs environnements natifs reste un défi majeur en biologie structurale. Les protéines, par exemple, adoptent souvent de multiples conformations dynamiques qui sont essentielles à leur fonction, mais difficiles à capturer avec les techniques existantes. L'augmentation quantique de la RMN pourrait permettre l'étude de ces systèmes complexes avec une résolution et une sensibilité sans précédent. Pour les matériaux énergétiques, comprendre les arrangements atomiques précis dans les électrolytes de batteries ou les catalyseurs peut guider la conception de dispositifs plus efficaces et durables.^{[33][35][36][37][32][1]}

Implications pour l'AGI et la Durabilité

La démonstration de Quantum Echoes présente des implications profondes pour le développement futur de l'AGI et ses considérations de durabilité. L'équipe Google Quantum AI exprime son optimisme quant à la possibilité de voir des applications réelles qui ne sont possibles que sur des ordinateurs quantiques dans les cinq prochaines années. Cette projection temporelle s'aligne remarquablement avec les estimations pour les premières démonstrations pratiques d'AGI, suggérant une convergence potentielle de ces technologies transformatrices.^{[1][38][39]}

L'accélération de 13 000 fois par rapport aux superordinateurs classiques démontrée par Quantum Echoes illustre le type d'avantage computationnel qui pourrait être essentiel pour l'entraînement et l'opération de systèmes AGI. Les architectures AGI nécessitent le traitement de quantités massives de données à travers de multiples modalités et domaines, une tâche qui pourrait bénéficier énormément du parallélisme quantique. La capacité de Willow à effectuer un trillion de mesures avec une haute fidélité démontre la maturité opérationnelle nécessaire pour soutenir des charges de travail AGI continues.^{[27][3][10][1]}

Du point de vue de la durabilité, l'avantage quantique vérifiable présente des opportunités et des défis. D'une part, l'accélération massive des calculs pourrait réduire considérablement l'énergie totale requise pour certaines tâches computationnelles par rapport aux approches classiques. Si un calcul qui nécessiterait des années sur un superordinateur classique peut être complété en minutes sur un processeur quantique, les économies énergétiques potentielles deviennent substantielles, même en tenant compte des exigences de refroidissement cryogénique. Les applications en optimisation énergétique, modélisation climatique et découverte de matériaux durables pourraient particulièrement bénéficier de cet avantage quantique.^{[5][6][24][37][40][41][42][43][44]}

D'autre part, la mise à l'échelle de la technologie quantique pour soutenir l'AGI nécessitera une attention rigoureuse aux considérations de cycle de vie environnemental. Le processeur Willow à 105 qubits représente une avancée significative, mais les applications AGI pratiques pourraient nécessiter des systèmes avec des milliers ou des millions de qubits logiques. Le cadre d'informatique quantique conscient du carbone devient donc essentiel pour guider le développement de manière durable. Les benchmarks établis par Quantum Echoes en termes de vérifiabilité et de performance reproductible fournissent une base solide pour évaluer les compromis entre puissance computationnelle et impact environnemental.^{[6][21][39][1][5]}

Apprentissage Automatique Quantique pour l'AGI

Algorithmes et Architectures

Les algorithmes d'apprentissage automatique quantique représentent une classe émergente de techniques qui exploitent les propriétés quantiques pour améliorer les processus d'apprentissage. Les machines à vecteurs de support quantiques (QSVM) adaptent l'algorithme SVM classique en utilisant des noyaux quantiques qui peuvent calculer des produits scalaires dans des espaces de caractéristiques exponentiellement grands. Ces noyaux quantiques exploitent la superposition pour évaluer simultanément de multiples correspondances de caractéristiques, réduisant la complexité computationnelle tout en maintenant ou améliorant la précision de classification.^{[12][18][19][20][45][46]}

Les réseaux neuronaux quantiques constituent une autre approche prometteuse, utilisant des circuits quantiques variationnels pour implémenter des transformations non-linéaires analogues aux fonctions d'activation dans les réseaux neuronaux classiques. Les QNN peuvent être configurés avec différentes architectures, incluant des couches d'estimateurs et d'échantillonneurs qui exploitent respectivement les mesures projectives et les distributions de probabilité quantiques. Les recherches expérimentales démontrent que les QNN exécutés sur des ordinateurs quantiques réels surpassent leurs homologues classiques de 5 à 7% en moyenne sur diverses tâches de classification.^{[11][19][20][12]}

L'algorithme d'optimisation approximative quantique (QAOA) s'applique particulièrement bien aux problèmes d'optimisation combinatoire qui apparaissent dans l'entraînement de modèles d'apprentissage automatique. Le QAOA encode le problème d'optimisation comme un hamiltonien quantique et utilise une approche variationnelle hybride quantique-classique pour trouver des solutions approximativement optimales. Cette technique démontre des avantages substantiels dans l'optimisation de la gestion énergétique des microréseaux, avec des améliorations mesurables en termes de réduction des coûts et d'efficacité énergétique.^{[4][24][47][48][12]}

L'analyse en composantes principales quantique (QPCA) offre des mécanismes pour la réduction de dimensionnalité qui s'avèrent essentiels pour traiter les ensembles de données de haute dimension couramment rencontrés dans les applications d'AGI. Le QPCA peut extraire les composantes principales d'une matrice de données avec une complexité logarithmique par rapport à la dimension, comparée à la complexité polynomiale des approches classiques. Cette efficacité devient critique lorsqu'on travaille avec des espaces de caractéristiques de millions ou milliards de dimensions, typiques des modèles de langage et de vision par ordinateur avancés.^{[15][21][22][12]}

Apprentissage Hybride Quantique-Classique

Les architectures hybrides quantique-classique représentent l'approche la plus pragmatique pour exploiter les avantages quantiques avec le matériel actuel de l'ère NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum). Ces systèmes combinent des processeurs quantiques pour des tâches computationnelles spécifiques avec des unités classiques pour le prétraitement, le post-traitement et l'orchestration globale. Cette division du travail permet d'exploiter les forces de chaque paradigme computationnel tout en atténuant leurs faiblesses respectives.^{[4][49][50][51]}

Les modèles génératifs hybrides, comme les réseaux antagonistes génératifs quantiques (qGAN), démontrent des applications prometteuses dans la génération de données synthétiques et l'augmentation de données. Les qGAN utilisent des circuits quantiques pour le générateur, exploitant la capacité quantique à échantillonner des distributions de probabilité complexes, tandis que le discriminateur peut être implémenté classiquement ou quantiquement selon les ressources disponibles. Les résultats expérimentaux sur des plateformes comme IBM Torino et IonQ Aria-1 montrent que ces modèles peuvent générer des données de qualité comparable aux GAN classiques tout en utilisant des réseaux de profondeur réduite.^{[50][52][53]}

Les réseaux de mémoire à court et long terme quantiques (QLSTM) étendent les architectures LSTM classiques avec des composants quantiques pour améliorer la modélisation de séquences temporelles. Les études comparatives avec des données financières réelles révèlent que, bien que l'entraînement sur des données classiques reste plus efficace avec les LSTM traditionnels, les prédictions de test des QLSTM démontrent une supériorité légère mais consistante. Cette amélioration, combinée à la possibilité de réduction de la consommation énergétique, positionne les QLSTM comme des candidats prometteurs pour les applications de prévision à grande échelle nécessaires dans les systèmes AGI.^[50]

L'optimisation hybride quantique-classique pour l'allocation de ressources cloud démontre des avantages substantiels en termes d'utilisation de ressources (amélioration de 27%), de réduction des coûts opérationnels (34%), et d'amélioration du temps de complétion des tâches (21%). Ces gains sont obtenus en utilisant le recuit quantique et le solveur variationnel d'états propres quantiques (VQE) pour optimiser la distribution de ressources, minimisant la consommation énergétique tout en maximisant l'efficacité d'utilisation. L'approche hybride permet également une réduction de 18% des violations des accords de niveau de service, garantissant une qualité de service robuste.^[4]

Défis et Limitations

Malgré les promesses théoriques, l'apprentissage automatique quantique fait face à plusieurs défis substantiels qui limitent actuellement son applicabilité à grande échelle. Le bruit quantique constitue l'obstacle le plus significatif, avec les qubits actuels sujets à la décohérence, aux erreurs de porte et aux erreurs de mesure. Ces imperfections s'accumulent

rapidement dans les circuits profonds, dégradant la qualité des résultats et limitant la complexité des modèles quantiques réalisables.^{[19][20][54][55]}

La scalabilité des qubits représente un autre défi majeur. Bien que des systèmes de 30 à 100 qubits physiques soient maintenant disponibles, les applications pratiques d'apprentissage automatique pour l'AGI nécessiteraient potentiellement des milliers ou des millions de qubits logiques. La transition des qubits physiques aux qubits logiques protégés par correction d'erreur introduit un surcoût substantiel, avec des estimations suggérant qu'environ 1000 qubits physiques pourraient être nécessaires pour chaque qubit logique selon le code de correction d'erreur utilisé.^{[21][25][54][56][57][19]}

L'encodage des données classiques dans des états quantiques, processus essentiel pour l'apprentissage automatique quantique, reste coûteux en termes de ressources. L'accès à la mémoire quantique aléatoire (qRAM) nécessaire pour charger efficacement de grandes bases de données dans des états quantiques représente un défi technologique non résolu. Des approches alternatives comme l'échantillonnage selon la longueur au carré ont été proposées, mais leur robustesse face aux imperfections réelles nécessite encore des développements.^{[45][54][58][19]}

L'interprétabilité des modèles quantiques constitue une préoccupation particulière pour les applications d'AGI où la compréhension des processus de décision s'avère critique. Les états quantiques et leurs transformations sont intrinsèquement difficiles à visualiser et interpréter, rendant le débogage et la validation des modèles QML plus complexes que pour leurs homologues classiques. Le développement de techniques d'IA explicable quantique (QXAI) commence à aborder ces défis, utilisant des principes de mécanique quantique comme les espaces de Hilbert et la décomposition en valeurs propres pour améliorer l'interprétabilité.^{[59][19]}

Durabilité et Efficacité Énergétique

Empreinte Carbone de l'Informatique Quantique

L'évaluation de l'impact environnemental de l'informatique quantique nécessite une analyse complète du cycle de vie, englobant la fabrication du matériel, l'utilisation opérationnelle et l'élimination. Les études récentes révèlent que les simulations de circuits quantiques à grande échelle (43 qubits) peuvent générer des émissions de CO₂e jusqu'à 48 fois supérieures à celles de l'entraînement d'un modèle de transformateur d'apprentissage automatique. Cette constatation souligne l'importance d'évaluer les charges computationnelles quantiques non seulement en termes de performance mais aussi de durabilité environnementale.^{[5][6][41][60][61][62]}

Les ordinateurs quantiques supraconducteurs nécessitent des systèmes de refroidissement cryogéniques fonctionnant à des températures proches du zéro absolu, entraînant une consommation énergétique substantielle. L'analyse du cycle de vie montre que le matériel de correction d'erreur quantique a un impact environnemental considérable en raison des nombreux composants électroniques nécessaires pour atteindre 100 qubits logiques. Cependant, des études comparatives avec des supercalculateurs classiques fonctionnellement équivalents suggèrent que, sous des conditions de mise à l'échelle spécifiques et avec des codes de correction d'erreur appropriés, les ordinateurs quantiques pourraient offrir un avantage environnemental.^{[41][42][63]}

Le cadre d'informatique quantique conscient du carbone (CQC) propose une méthodologie fondamentale pour calculer l'empreinte carbone totale du cycle de vie d'une plateforme d'informatique quantique. Ce cadre considère trois phases principales : la production (extraction de matériaux, fabrication de composants), l'utilisation (consommation d'énergie opérationnelle, refroidissement), et l'élimination (recyclage, déchets électroniques). L'établissement de benchmarks de durabilité pour l'informatique quantique permettra aux chercheurs de prendre des décisions architecturales de conception éclairées et de célébrer l'avantage environnemental quantique potentiel.^[6]

L'avantage énergétique potentiel de l'économie quantique a été démontré à travers des modèles de compétition de Cournot contraints par l'utilisation d'énergie. Ces modèles montrent que les entreprises d'informatique quantique peuvent surpasser leurs homologues classiques en termes de rentabilité et d'efficacité énergétique à l'équilibre de Nash. Cependant, les bénéfices énergétiques de l'informatique quantique dépendent de calculs à grande échelle, suggérant que l'avantage d'efficacité énergétique ne se matérialisera qu'avec des opérations quantiques substantielles.^[40]

Optimisation Énergétique par l'AGI Quantique

L'intégration de l'AGI avec l'informatique quantique offre des opportunités significatives pour l'optimisation des systèmes énergétiques et la promotion de la durabilité. Les algorithmes quantiques appliqués à la gestion de microréseaux démontrent des capacités supérieures pour optimiser les opérations en intégrant des sources d'énergie renouvelable, des systèmes de stockage et des charges variables. L'algorithme d'optimisation approximative quantique (QAOA) formulé comme un problème d'optimisation binaire quadratique sans contraintes (QUBO) s'adapte dynamiquement à la variabilité inhérente aux sources d'énergie renouvelable.^{[24][47][48][64][65]}

Les simulations utilisant des données réelles de microréseaux équipés de systèmes photovoltaïques, d'éoliennes et d'unités de stockage d'énergie montrent que le QAOA surpasse les techniques d'optimisation conventionnelles en termes de réduction des coûts, d'efficacité énergétique et de fiabilité du système. Cette performance améliorée résulte de la capacité du QAOA à explorer en parallèle de multiples solutions potentielles, augmentant la probabilité d'atteindre une solution optimale dans un délai raisonnable. L'application de ces techniques à la planification de charges dans les communautés énergétiques promet d'augmenter l'efficacité et la durabilité en optimisant la programmation des charges en fonction des besoins des utilisateurs, des prix de l'électricité et de la disponibilité de l'énergie renouvelable locale.^{[47][48][24]}

L'informatique quantique pour la résilience climatique et les défis de durabilité explore l'application de techniques d'apprentissage automatique quantique et d'optimisation pour la prédiction du changement climatique et l'amélioration du développement durable. Les méthodes computationnelles traditionnelles tombent souvent en deçà de la capacité de gérer l'échelle et la complexité des modèles climatiques et de la gestion des ressources naturelles. Les avancées quantiques offrent des améliorations significatives en efficacité computationnelle et en capacités de résolution de problèmes, permettant l'optimisation de systèmes multi-infrastructures vers la neutralité climatique.^{[37][43][44]}

Les applications pratiques incluent la gestion des déchets-énergie dans la digestion anaérobie, la prévention des catastrophes dans la prédiction des inondations et le développement de nouveaux matériaux pour la capture du carbone. L'optimisation quantique pour le contrôle environnemental aborde la dynamique de pollution, considérant la

décomposition naturelle, la diffusion et les traitements de remédiation contrôlés. Le contrôle optimal est conçu pour minimiser l'impact environnemental tout en minimisant également les coûts de nettoyage, démontrant la faisabilité de l'optimisation quantique dans les questions de durabilité.^{[44][66][37]}

Informatique Neuromorphique et Efficacité Énergétique

L'informatique neuromorphique, inspirée de l'architecture et du fonctionnement du cerveau humain, offre une alternative prometteuse pour réaliser des systèmes d'AGI avec une efficacité énergétique supérieure. Les dispositifs neuromorphiques exploitent des principes de traitement basés sur des événements et l'intégration mémoire-calcul pour réduire drastiquement la consommation d'énergie par rapport aux architectures von Neumann conventionnelles. Les systèmes neuromorphiques avancés démontrent des efficacités énergétiques remarquables de 0,14 fJ à 1,26 fJ par opération de classification, représentant des améliorations de plusieurs ordres de grandeur par rapport aux processeurs traditionnels.^{[8][9][67][68][69][70][71][72]}

Les réseaux neuronaux à impulsions (SNN), paradigme central de l'informatique neuromorphique, communiquent via des impulsions binaires asynchrones similaires aux potentiels d'action neuronaux biologiques. Cette approche basée sur des événements permet aux SNN de traiter l'information uniquement lorsque nécessaire, éliminant la puissance gaspillée dans les calculs redondants. Les recherches sur les SNN robustes et économes en énergie dans le cadre du goulot d'étranglement de l'information (SIBoLS) démontrent des améliorations en robustesse et efficacité énergétique pour les applications d'apprentissage automatique basées sur des impulsions, induisant des taux d'impulsion inférieurs et une consommation d'énergie réduite.^{[9][71][72][73][74]}

Les memristors, dispositifs à deux terminaux présentant une résistance variable dépendant de l'histoire, constituent des composants essentiels pour l'informatique neuromorphique efficace. Les memristors peuvent émuler le comportement synaptique avec une empreinte de zone réduite et une efficacité énergétique élevée, avec des consommations d'énergie inférieures au picojoule par événement synaptique. Les transistors neuromorphiques à hétérojonction verticale en vrac (VHNT) capables d'émuler à la fois les fonctions computationnelles de réseaux neuronaux artificiels et de réseaux neuronaux à impulsions présentent une efficacité remarquable, consommant seulement 0,84 nJ pour une opération de multiplication-accumulation unique.^{[69][72][75][76][77]}

L'intégration de l'informatique neuromorphique avec des approches quantiques représente une direction prometteuse pour développer des systèmes AGI à la fois puissants et durables. Les matériaux multiferroïques à pérovskite durables pour la mémoire memristive et les dispositifs d'informatique neuromorphique explorent des alternatives sans plomb comme BiFeO₃, démontrant des propriétés ferroélectriques et magnétoélectriques robustes. Ces matériaux permettent un comportement memristif avec des méthodes de synthèse durables et des architectures de dispositifs innovantes, présentant un chemin transformateur vers des technologies écologiques, efficaces et multifonctionnelles pour l'avenir de l'électronique.^{[67][68][8]}

Correction d'Erreurs et Tolérance aux Pannes

Codes de Correction d'Erreurs Quantiques

La correction d'erreurs quantiques (QEC) constitue un élément essentiel pour réaliser des systèmes d'informatique quantique à grande échelle capables de soutenir les applications AGI. Les qubits physiques sont intrinsèquement bruyants, sujets à la décohérence et aux erreurs opérationnelles qui s'accumulent rapidement dans les calculs complexes. La QEC aborde ce défi en encodant redondamment des qubits logiques dans de nombreux qubits physiques, utilisant des mesures de syndrome pour détecter et corriger les erreurs.^{[25][26][78][79][80]}

Les codes de correction d'erreurs topologiques, en particulier le code de surface, sont devenus les principaux candidats pour l'informatique quantique à grande échelle en raison de leurs seuils d'erreur élevés et de leur compatibilité avec les architectures planaires. Le code de surface peut tolérer des taux d'erreur physiques d'environ 1%, un seuil que les dispositifs supraconducteurs et à ions piégés de pointe approchent. Cependant, le surcoût en ressources reste substantiel, nécessitant environ $d^2/2$ qubits physiques pour encoder un qubit logique de distance d .^{[42][57][79][25]}

Les codes de densité faible parité-vérification (LDPC) offrent des alternatives prometteuses avec des taux d'encodage plus élevés et un surcoût potentiellement réduit. Les protocoles de correction d'erreurs de bout en bout basés sur des familles de codes LDPC atteignent des seuils d'erreur de 0,8% pour le modèle de bruit standard basé sur des circuits, équivalent au code de surface. Cette performance impressionnante, combinée à des taux d'encodage plus élevés, pourrait réduire significativement les exigences en qubits physiques pour l'informatique quantique tolérante aux pannes.^[57]

Les approches de correction d'erreurs sans mesure présentent une alternative intéressante pour les plateformes supportant des réinitialisations de qubits inconditionnelles ou un approvisionnement constant en qubits frais. Ces schémas réalisent la correction d'erreurs via un feedback quantique cohérent conçu, évitant les défis associés aux mesures fiables et aux opérations de feed-forward conditionnel. Les implémentations pour les codes QEC de petite taille et tolérants aux pannes montrent un surcoût modéré par rapport aux homologues conventionnels basés sur des mesures et feed-forward, ouvrant la voie vers des QEC efficaces en ressources et sans mesure sur les réseaux d'atomes neutres.^{[81][82]}

Opérations Tolérantes aux Pannes

La tolérance aux pannes en informatique quantique nécessite non seulement des codes de correction d'erreurs, mais également des opérations logiques qui ne propagent pas les erreurs de manière catastrophique à travers les qubits encodés. Les opérations transversales, qui appliquent la même porte physique indépendamment à chaque qubit physique dans les blocs de code, fournissent une tolérance aux pannes intrinsèque car les erreurs ne se propagent pas entre les blocs. Cependant, le théorème d'Eastin-Knill stipule qu'aucun code de correction d'erreurs quantiques ne peut implémenter transversalement un ensemble universel de portes, nécessitant des techniques alternatives pour la computation universelle tolérante aux pannes.^{[79][83][84]}

La distillation d'états magiques fournit une solution où les états quantiques de haute-fidélité nécessaires pour les portes non-Clifford sont préparés via des procédures de distillation et injectés dans les calculs. Cette approche permet la computation universelle tolérante aux pannes mais introduit un surcoût significatif en temps et en qubits. Les

développements récents en tolérance aux pannes transversale algorithmique démontrent que les opérations logiques peuvent être effectuées de manière tolérante aux pannes avec seulement un nombre constant de cycles d'extraction pour une large classe de codes de correction d'erreurs, y compris le code de surface avec des entrées d'états magiques et feed-forward.^[79]

La correction d'erreurs à coup unique représente une avancée majeure où les codes peuvent corriger les erreurs de manière fiable même lorsque les mesures de syndrome elles-mêmes sont bruyantes, sans nécessiter de répétitions multiples. Les codes topologiques de dimension supérieure montrent naturellement des propriétés de correction d'erreurs à coup unique, permettant une correction d'erreurs plus rapide et plus efficace. Les extensions aux codes couleur de sept qubits de Steane avec extraction de syndrome marquée permettent la mesure simultanée de plusieurs syndromes sans nécessiter de qubits supplémentaires, conformant aux contraintes de géométrie planaire.^{[82][83][85]}

Les stratégies de décodage corrélé améliorent considérablement la tolérance aux pannes en exploitant les informations de syndrome partielles disponibles après un nombre constant de cycles d'extraction. Bien que n'ayant accès qu'à des informations de syndrome partielles, ces stratégies peuvent rendre la déviation par rapport à la distribution de mesure logique idéale exponentiellement petite en distance, même si l'état quantique instantané ne peut pas être rendu proche d'un mot de code logique en raison des erreurs de mesure. Cette approche jette une nouvelle lumière sur la théorie de la tolérance aux pannes quantiques et ouvre des possibilités pour une informatique quantique universelle plus efficace.^[79]

Défis de Mise à l'Échelle

La mise à l'échelle de l'informatique quantique vers les millions de qubits nécessaires pour les applications AGI pratiques fait face à de multiples défis interconnectés. Les exigences en correction d'erreurs augmentent le nombre de qubits physiques nécessaires d'un facteur de 100 à 10 000 selon le code et le taux d'erreur cible. Cette expansion se traduit directement par une augmentation de la consommation énergétique, de la complexité du système de contrôle et de l'empreinte physique des dispositifs quantiques.^{[25][41][42][57][63][86]}

Les systèmes cryogéniques requis pour les qubits supraconducteurs présentent des défis d'ingénierie substantiels à mesure que le nombre de qubits augmente. Les budgets thermiques deviennent critiques, avec chaque qubit contribuant à la charge thermique que le système de refroidissement doit dissiper. Les modèles énergétiques de première main révèlent que l'utilisation de puissance et le volume quantique peuvent être analytiquement corrélés, permettant l'optimisation de la conception pour minimiser la consommation énergétique totale.^{[63][86][87][88]}

Les architectures modulaires comme les dispositifs quantiques à couplage de charge (QCCD) pour les ions piégés offrent des solutions prometteuses pour la mise à l'échelle. Les QCCD interconnectent plusieurs pièges et emploient des mécanismes de navette d'ions pour transférer des ions entre les pièges, permettant un nombre plus grand de qubits tout en maintenant des qualités opérationnelles élevées. Les systèmes récents à 30 qubits démontrent des opérations avec fidélité élevée à travers toutes les 435 paires de portes possibles, validant l'approche QCCD pour la mise à l'échelle.^{[56][89][90][91][92]}

Le routage et la compilation de circuits pour les systèmes quantiques à grande échelle deviennent également de plus en plus complexes. Les algorithmes d'apprentissage par renforcement pour la synthèse de circuits quantiques et la

transpilation démontrent une efficacité pratique, réduisant les surcoûts de routage jusqu'à 133 qubits par rapport à d'autres heuristiques de routage. Ces avancées pilotées par l'IA dans les flux de travail d'informatique quantique préparent le terrain pour des améliorations supplémentaires des processus de computation quantique.^{[92][93][94]}

Applications et Cas d'Usage

Découverte de Médicaments et Santé

L'informatique quantique révolutionne la découverte de médicaments en permettant la simulation moléculaire et la prédiction d'interactions médicament-cible avec une précision sans précédent. Les ordinateurs quantiques peuvent modéliser les interactions moléculaires au niveau atomique, capturant les effets de mécanique quantique critiques pour comprendre les liaisons chimiques, la dynamique des protéines et les énergies de liaison. Cette capacité promet de réduire significativement le temps et les coûts associés au développement de nouveaux médicaments, accélérant potentiellement le processus de plusieurs années.^{[32][33][34][35][45][95][96][97]}

Les pipelines hybrides d'informatique quantique pour la découverte de médicaments du monde réel divergent des études de preuve de concept conventionnelles en abordant de véritables défis de conception de médicaments. Ces pipelines intègrent l'informatique quantique avec des bases de données chimiques existantes, des techniques de criblage virtuel et des validations expérimentales. Les algorithmes génératifs quantiques dévoilent de nouveaux inhibiteurs pour KRAS, une cible thérapeutique difficile, avec des résultats expérimentalement confirmés démontrant le potentiel pratique de la découverte de médicaments assistée par quantique.^{[33][34][97]}

L'apprentissage automatique quantique pour la découverte de médicaments applique des algorithmes comme les machines à vecteurs de support quantiques (QSVM) et les classificateurs de rechargement de données aux ensembles de données de chimio-informatique. Les études utilisant des données allant de centaines de molécules (SARS-CoV-2) à des centaines de milliers de molécules (ensembles de données de criblage cellulaire entier pour la peste et M. tuberculosis) démontrent comment atteindre la compression avec des ensembles de données sur des ordinateurs quantiques comparés aux approches classiques et hybrides. Ce travail illustre les étapes nécessaires pour être "prêt pour l'ordinateur quantique" afin d'appliquer l'informatique quantique à la découverte de médicaments.^{[36][45]}

L'apprentissage automatique quantique hybride pour la chimie générative et la conception de médicaments présente des approches pour générer de nouvelles structures chimiques avec des propriétés de chimie médicinale et d'accessibilité synthétique souhaitables. Les résultats démontrent la faisabilité d'utiliser des dispositifs d'informatique quantique déjà existants ou bientôt disponibles comme bancs d'essai pour de futures applications de découverte de médicaments. L'optimisation des essais cliniques par l'informatique quantique améliore l'identification de cohortes et l'allocation de ressources, augmentant potentiellement les taux de succès des essais tout en réduisant les coûts.^{[98][99]}

Finance et Optimisation

L'informatique quantique trouve des applications substantielles dans la finance, offrant des avancées dans l'optimisation de portefeuille, la gestion des risques et le trading algorithmique. Les algorithmes d'apprentissage automatique quantique pour l'optimisation de la gestion de portefeuille financier démontrent des capacités à générer des rendements substantiels

au fil du temps, positionnant ces approches comme des outils révolutionnaires pour l'optimisation de portefeuille dans le paysage dynamique des marchés financiers. L'implémentation en Python assure l'accessibilité et l'applicabilité, facilitant l'intégration de ces algorithmes quantiques avancés dans les cadres financiers existants.^{[50][52][95][96][100]}

Les réseaux antagonistes génératifs quantiques (qGAN) pour la modélisation financière et la prédiction utilisent des circuits quantiques pour les générateurs, tirant parti de la capacité quantique à échantillonner des distributions de probabilité complexes. Les expériences avec des ensembles de données de cryptomonnaie du monde réel et des données de prix d'actions NVIDIA montrent que ces modèles hybrides promettent un avantage quantique futur en finance, possiblement en combinaison avec QLSTM et QCBM. Bien que l'entraînement de données classiques soit plus efficace sur les LSTM traditionnels, les prédictions de test du QLSTM sont légèrement supérieures à son homologue classique, en faisant un candidat prometteur pour la prévision financière et l'analyse de séries temporelles.^{[52][50]}

L'estimation du risque du marché carbone utilisant le réseau antagoniste génératif conditionnel quantique et l'estimation d'amplitude aborde le problème de l'estimation précise et efficace du risque du marché carbone, essentiel pour assurer la stabilité financière et promouvoir la durabilité environnementale. Le cadre proposé QCGAN-QAE améliore notablement l'efficacité et la précision de la valeur à risque (VaR) et de la valeur à risque conditionnelle (CVaR) par rapport aux méthodes originales. Les résultats de simulation basés sur le système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne révèlent les avantages substantiels de cette approche quantique.^[101]

Les problèmes d'optimisation combinatoire omniprésents dans les applications financières comme l'optimisation de portefeuille, l'optimisation de chaîne d'approvisionnement et la logistique trouvent des solutions efficaces via les machines Ising et les ordinateurs quantiques. Les machines Ising basées sur la technologie CMOS, comme FlexSpin avec 256 éléments de traitement de spin flexibles, démontrent des capacités à résoudre des COPs complexes du monde réel avec une efficacité supérieure par rapport aux matériels de calcul traditionnels. Ces avancées positionnent l'informatique quantique comme un catalyseur potentiel pour la reprise économique dans les petites entreprises à travers l'intégration de technologies de pointe et la gestion stratégique.^{[95][96][102][103]}

Modélisation Climatique et Durabilité Environnementale

L'informatique quantique pour la résilience climatique et les défis de durabilité explore l'application de techniques d'apprentissage automatique quantique et d'optimisation pour la prédiction du changement climatique et l'amélioration du développement durable. Les impacts croissants du changement climatique et la demande croissante pour la durabilité nécessitent des solutions technologiques innovantes que l'informatique quantique peut potentiellement fournir. Cette revue explore comment l'informatique quantique et l'apprentissage automatique quantique peuvent optimiser des systèmes multi-infrastructures vers la neutralité climatique.^{[37][43][44]}

Les applications pratiques incluent les déchets vers l'énergie dans la digestion anaérobie, la prévention des catastrophes dans la prédiction des inondations et le développement de nouveaux matériaux pour la capture du carbone. Les modèles computationnels traditionnels tombent souvent en deçà de la capacité de gérer l'échelle et la complexité des modèles climatiques, mais les avancées quantiques offrent des améliorations significatives en efficacité computationnelle et en capacités de résolution de problèmes. L'évaluation de la performance des algorithmes quantiques actuels et du matériel

dans les applications pratiques présente des cas réalistes démontrant le potentiel transformateur de l'informatique quantique.^{[44][37]}

L'apprentissage automatique quantique dans le changement climatique et la durabilité passe en revue les méthodologies QML prometteuses qui ont le potentiel d'accélérer la décarbonisation, y compris les systèmes énergétiques et la prévision des données climatiques. Les résultats suggèrent que l'apprentissage automatique quantique peut aider à relever les défis critiques du changement climatique et de la durabilité en exploitant la puissance de l'informatique quantique pour traiter des données complexes et de haute dimension qui dépassent les capacités des approches classiques.^[43]

L'abordage des défis écologiques depuis une perspective d'informatique quantique introduit les concepts de base nécessaires pour comprendre les ordinateurs quantiques et donne un aperçu de leurs applications pour étudier les problèmes écologiques à plus grande échelle. Les ordinateurs quantiques pourraient être utilisés pour étudier des problèmes écologiques en créant de nouveaux ponts entre des domaines qui à première vue semblent très différents. Le contrôle optimal en écologie et protection de l'environnement basé sur l'informatique quantique aborde la dynamique de pollution avec décomposition naturelle, diffusion et traitements de remédiation contrôlés, démontrant la faisabilité de l'optimisation quantique dans les questions de durabilité.^{[66][104]}

Sécurité, Alignement et Considérations Éthiques

Défis d'Alignement de l'AGI

L'alignement de l'AGI représente l'un des défis les plus critiques et complexes dans le développement de l'intelligence artificielle avancée. L'alignement fait référence à l'exigence que les systèmes d'IA opèrent conformément aux valeurs et intérêts humains, assurant que leurs objectifs, décisions et actions restent bénéfiques pour l'humanité. Le désalignement est un moteur clé du biais algorithmique, qui non seulement perpétue les atteintes aux droits mais sape également la sécurité de l'IA, posant des risques à son intégration sociétale.^{[39][105][106][107]}

L'impératif d'alignement est enraciné dans le principe durable de la dignité humaine, un concept juridique qui a évolué depuis ses origines dans la jurisprudence romaine jusqu'à son établissement comme pierre angulaire des démocraties constitutionnelles modernes. À travers l'analyse juridique comparative, la dignité humaine informe la gouvernance algorithmique à travers les principales juridictions, fournissant une base universelle pour la gouvernance de l'IA à travers les contextes culturels. Bien que l'Union européenne priorise la dignité humaine dans la régulation du biais algorithmique, ce principe s'étend au-delà de la loi européenne, offrant un ancrage normatif pour la gouvernance mondiale de l'IA.^[105]

La loi AI-45° comme principe directeur pour une feuille de route équilibrée vers une AGI digne de confiance introduit l'échelle causale de l'AGI digne de confiance comme cadre pratique. Ce cadre fournit une taxonomie systématique et une structure hiérarchique pour la recherche actuelle sur les capacités et la sécurité de l'IA, inspirée de l'"échelle de causalité" de Judea Pearl. L'échelle causale comprend trois couches centrales : la couche d'alignement approximatif, la couche interventionnelle et la couche réfléchissante, abordant les défis clés de la sécurité et de la fiabilité dans l'AGI et les systèmes d'IA contemporains.^{[106][108]}

Le séquençage de l'intelligence et la dépendance au chemin de l'évolution de l'intelligence suggèrent que l'ordre dans lequel l'AGI et l'intelligence collective décentralisée (DCI) émergent détermine le bassin d'attraction à long terme de l'intelligence. Une fois que le développement entre dans un régime centralisé (AGI-first) ou décentralisé (DCI-first), les transitions deviennent structurellement infaisables en raison des boucles de rétroaction et du verrouillage des ressources. Cette perspective a des implications majeures pour la sécurité de l'IA : l'alignement traditionnel suppose que l'AGI émergera et doit être contrôlée après coup, mais cet article soutient que le séquençage de l'intelligence est plus fondamental.^[109]

Sécurité et Robustesse

Les défis fondamentaux pour assurer l'alignement et la sécurité des grands modèles de langage identifient 18 défis fondamentaux organisés en trois catégories : compréhension scientifique des LLM, méthodes de développement et de déploiement, et défis sociotechniques. Basé sur les défis identifiés, plus de 200 questions de recherche concrètes sont posées, fournissant une feuille de route complète pour la communauté de recherche. Ces défis englobent des questions techniques comme la robustesse aux attaques adversariales, l'interprétabilité et l'estimation de l'incertitude, ainsi que des considérations plus larges concernant l'équité, la responsabilité et la gouvernance.^[107]

L'approche agentique dans la quête de l'AGI investigue un cadre collaboratif utilisant des agents IA construits sur de grands modèles de langage pour atteindre l'AGI. En exploitant les forces des LLM dans le traitement du langage, le raisonnement et la synthèse de connaissances, un système multi-agents est proposé où des agents spécialisés travaillent ensemble pour exhiber une intelligence générale émergente. Les résultats suggèrent que les systèmes d'agents collaboratifs basés sur LLM sont le chemin le plus prometteur vers l'AGI, malgré les défis dans la cognition incarnée, l'alignement de sécurité et la compréhension véritable versus la correspondance de motifs.^[38]

L'alignement de sécurité contrôlable propose un cadre conçu pour adapter les modèles à des exigences de sécurité diverses sans réentraînement. Au lieu d'aligner un modèle fixe, cette approche permet une adaptation au moment de l'inférence à des normes de sécurité variées, reconnaissant que les utilisateurs peuvent avoir des besoins de sécurité divers, rendant un modèle avec des normes de sécurité statiques trop restrictif pour être utile, ainsi que trop coûteux pour être réaligné. Le retour en arrière pour la sécurité aborde les vulnérabilités des méthodes d'alignement de sécurité actuelles aux attaques adversariales et l'alignement de sécurité superficiel qui se concentre principalement sur la prévention du contenu nuisible dans les tokens initiaux générés.^{[110][111]}

L'impossibilité de la spécification complète des dommages dans l'alignement de l'IA introduit deux nouvelles métriques : l'entropie sémantique $H(S)$ et le ratio sécurité-capacité $I(O;I)/H(O)$, pour quantifier ces limitations. À travers des preuves formelles, on montre pourquoi chaque approche doit échouer et pourquoi les écarts résultants ne sont pas de simples défis d'ingénierie mais des contraintes fondamentales apparentées au problème de l'arrêt. Ces résultats suggèrent un changement de paradigme : plutôt que de poursuivre des spécifications complètes, la recherche sur l'alignement de l'IA devrait se concentrer sur le développement de systèmes capables d'opérer en toute sécurité malgré la spécification irréductiblement incomplète.^[112]

Implications Éthiques et Sociétales

Le développement de l'AGI intégré avec l'informatique quantique soulève des questions éthiques et sociétales profondes qui nécessitent une attention proactive. L'intégration de la nanotechnologie pilotée par l'AGI, de l'informatique quantique et de l'esthétique médicale explore l'impact transformateur des plans de traitement personnalisés pilotés par l'AGI, des interventions à l'échelle nanométrique et des capacités computationnelles alimentées par quantique. Bien que promettant une précision et une efficacité remarquables, l'intégration de ces technologies soulève d'importantes questions éthiques et réglementaires.^{[39][105][113]}

Trouver un équilibre entre l'innovation et le déploiement responsable sera crucial alors que nous nous embarquons dans un voyage pour redéfinir la beauté et les soins de santé à travers la convergence de technologies de pointe. L'informatique quantique pour le développement durable présente un cadre conceptuel qui aligne les innovations de l'informatique quantique avec les objectifs de développement durable des Nations Unies (ODD). Il explore des domaines clés comme l'optimisation de l'énergie renouvelable, l'infrastructure de ville intelligente et l'atténuation du changement climatique, tout en soulignant les défis de durabilité, incluant les impacts environnementaux, les préoccupations éthiques et les considérations socio-économiques comme les transitions de la main-d'œuvre et l'équité numérique.^{[113][114]}

Un modèle d'informatique quantique conscient du carbone est introduit pour minimiser l'empreinte environnementale des systèmes quantiques. La recherche propose une feuille de route pour l'adoption éthique et évolutive des technologies quantiques, assurant une croissance sociétale inclusive et résiliente. L'appel à l'action à la communauté de recherche est l'établissement d'une nouvelle direction de recherche connue sous le nom d'informatique quantique durable qui promeut à la fois l'informatique quantique pour les applications orientées vers la durabilité et la durabilité de l'informatique quantique elle-même.^{[6][114]}

L'approche systématique vers l'AGI hétérogène affronte le trio de grands défis de l'IA : le mur énergétique, le problème d'alignement et le bond de l'IA étroite vers l'AGI. Les solutions d'IA contemporaines consomment des quantités d'énergie non durables pendant l'entraînement du modèle et les opérations quotidiennes, aggravées par le doublement de la computation requise pour entraîner chaque nouveau modèle d'IA tous les 2 mois depuis 2020. Cet article affirme que l'intelligence artificielle peut être réalisée à travers une multiplicité de voies spécifiques à la conception, plutôt qu'une architecture AGI singulière et englobante, suggérant que la conception système est la pièce manquante pour surmonter les grands défis.^[39]

Directions Futures et Perspectives

Avancées Technologiques Anticipées

Les prochaines années verront des avancées substantielles dans les technologies matérielles quantiques, avec des systèmes de plus de 1000 qubits physiques devenant de plus en plus courants. Les ordinateurs quantiques supraconducteurs continuent d'améliorer la fidélité des portes et les temps de cohérence, approchant les seuils nécessaires pour la correction d'erreurs utile. Les architectures modulaires avec circuit knitting permettront de combiner plusieurs QPU pour étendre les capacités computationnelles sans attendre les avancées en correction d'erreurs.^{[56][87][115]}

Les qubits à ions piégés démontrent des fidélités exceptionnelles et évoluent vers des systèmes modulaires avec des connexions quantiques entre modules individuels. Les architectures QCCD avec navette d'ions offrent un chemin vers la mise à l'échelle tout en maintenant les hautes qualités opérationnelles caractéristiques des systèmes à ions piégés. Les potentiels optiques dynamiques pour segmenter instantanément les cristaux d'ions en cellules de taille gérable permettent des portes d'intrication parallèles sur toutes les cellules, garantissant la connectivité à travers le cristal d'ion complet.^{[89][90][91][92][116]}

Les dispositifs neuromorphiques continuent d'évoluer vers des efficacités énergétiques ultra-basses et des densités d'intégration plus élevées. Les transistors neuromorphiques à hétérojonction verticale capables de basculer entre les fonctions computationnelles ANN et SNN en changeant simplement la programmation sans circuits auxiliaires représentent une stratégie de dispositif prometteuse pour développer une AGI haute performance, basse puissance et adaptative à l'environnement. Les matériaux 2D spintroniques pour l'informatique neuromorphique avec consommation d'énergie ultra-basse (0,14 fJ/opération), vitesses de commutation élevées (sub-nanoseconde) et évolutivité à des empreintes sub-20 nm offrent une base pour faire avancer les architectures de computation évolutives de prochaine génération.^{[68][76][77]}

L'intégration de l'informatique quantique avec l'informatique classique haute performance continuera de s'approfondir, créant des superordinateurs centrés sur le quantique où les QPU et les CPU travaillent de manière transparente ensemble. Les logiciels évolueront pour rendre les subtilités de la technologie invisibles aux utilisateurs et réaliser l'objectif d'une informatique quantique omniprésente et sans friction. L'apprentissage automatique pour l'informatique quantique deviendra de plus en plus important, avec des techniques d'IA utilisées pour optimiser les opérations quantiques, atténuer les effets des erreurs et découvrir de nouvelles configurations expérimentales quantiques.^{[16][93][115]}

Synergies Interdisciplinaires

L'interaction entre l'AGI et l'informatique quantique bénéficiera de plus en plus de synergies avec d'autres domaines technologiques émergents. L'informatique verte transformant la technologie à travers l'innovation durable explore l'approche multifacette de la durabilité environnementale dans l'informatique, englobant les innovations matérielles, l'optimisation logicielle et les technologies émergentes. Elle intègre l'intelligence artificielle, l'informatique quantique et les technologies IoT dans l'avancement des pratiques de computation durables.^{[8][39][117]}

Les architectures cognitives inspirées du cerveau pour l'intelligence artificielle révolutionnent l'informatique et les systèmes cognitifs en modélisant les systèmes computationnels d'après la structure, les processus et le fonctionnement du cerveau humain. En s'inspirant des neurosciences et des sciences cognitives, l'IA inspirée du cerveau vise à améliorer l'efficacité, l'évolutivité et l'adaptabilité des algorithmes d'apprentissage automatique. L'intégration de ces technologies promet un changement de paradigme dans la recherche en IA, nous rapprochant de l'intelligence artificielle générale tout en créant des systèmes plus économes en énergie et résilients.^[8]

La théorie du leadership futur synthétisant un modèle de changement avant-gardiste dynamique à l'ère de l'intelligence artificielle générale postule de nouvelles méthodes de formation des leaders à penser métacognitivement, délivrant une route plus intelligente vers l'avant à cette ère de l'intelligence artificielle. Alors que l'informatique quantique alimente le

voyage vers l'intelligence artificielle générale, il y a des preuves sans ambiguïté que nous devons investiguer, revoir, analyser et ajuster les constructions précédentes de leadership et de gestion du changement. Cette approche interdisciplinaire reconnaît que les avancées technologiques nécessitent des transformations correspondantes dans les structures organisationnelles et les paradigmes de leadership.^[118]

Les améliorations quantiques de l'apprentissage automatique pour les problèmes scientifiques démontrent des opportunités pour appliquer l'informatique quantique à la physique de la matière condensée, à la physique des particules et à d'autres domaines scientifiques. Les benchmarks d'efficacité énergétique pour l'informatique neuromorphique dans la physique montrent que les paradigmes neuromorphiques, en particulier les plateformes de computation analogique en mémoire (AIMC), peuvent offrir des efficacités énergétiques supérieures pour les tâches d'inférence par rapport aux matériels conventionnels. Ces synergies entre l'informatique quantique, neuromorphique et classique créeront de nouvelles possibilités pour résoudre des problèmes complexes à travers de multiples domaines scientifiques.^{[73][74]}

Vers une AGI Durable

La réalisation d'une intelligence artificielle générale véritablement durable nécessite une approche holistique qui considère simultanément les dimensions technologiques, environnementales, éthiques et sociétales. L'informatique quantique durable établit une nouvelle direction de recherche qui promeut à la fois l'informatique quantique pour les applications orientées vers la durabilité et la durabilité de l'informatique quantique elle-même. Ce double focus reconnaît que les avancées technologiques doivent être évaluées non seulement en termes de capacités computationnelles mais aussi en termes d'impact environnemental tout au long du cycle de vie.^{[5][6][39][42][114][117]}

Le développement de l'AGI doit incorporer des principes de conception durable dès le départ plutôt que comme considérations après coup. L'approche systématique vers l'AGI hétérogène suggère que l'intelligence artificielle peut être réalisée à travers une multiplicité de voies spécifiques à la conception, permettant l'optimisation pour différentes contraintes incluant l'efficacité énergétique, l'empreinte carbone et l'utilisation responsable des ressources. Cette diversité d'approches permet également une plus grande résilience et adaptabilité face aux défis évolutifs.^[39]

L'intégration de l'informatique neuromorphique avec les approches quantiques et classiques offre un chemin prometteur vers l'AGI qui équilibre puissance computationnelle et durabilité environnementale. Les dispositifs neuromorphiques avec des efficacités énergétiques sub-femtojoule par opération démontrent qu'une computation sophistiquée ne nécessite pas nécessairement une consommation énergétique excessive. Les architectures hybrides qui combinent intelligemment les forces quantiques, neuromorphiques et classiques peuvent atteindre les capacités généralisées requises pour l'AGI tout en maintenant des empreintes énergétiques acceptables.^{[8][49][50][67][68][71][72][77]}

L'établissement de benchmarks de durabilité et de cadres d'évaluation du cycle de vie pour les technologies d'AGI permettra aux chercheurs et développeurs de prendre des décisions éclairées qui équilibrent performance et responsabilité environnementale. Ces outils doivent considérer non seulement la consommation énergétique opérationnelle mais aussi les impacts de fabrication, les exigences de refroidissement, la génération de déchets électroniques et la durée de vie du système. À mesure que l'AGI devient une réalité, assurer son développement le long de

trajectoires durables représente l'un des défis les plus critiques pour garantir un avenir technologique bénéfique pour l'humanité et la planète.^{[6][42][114][119][5][39]}

Conclusion

L'interaction entre l'intelligence artificielle générale et l'informatique quantique représente une frontière technologique d'une importance immense, avec le potentiel de transformer fondamentalement la computation, la résolution de problèmes et notre approche des défis mondiaux. Les recherches examinées dans cette revue démontrent que l'informatique quantique offre des avantages substantiels pour les tâches d'apprentissage automatique pertinentes pour l'AGI, avec des améliorations de précision de 3 à 7% et des réductions de complexité computationnelle potentiellement exponentielles pour certains problèmes. Simultanément, les approches neuromorphiques fournissent des voies complémentaires vers une computation inspirée du cerveau avec des efficacités énergétiques remarquables atteignant 0,14 à 1,26 fJ par opération.^{[1][2][3][20][21][22][68][71][72]}

La percée historique de Google Quantum AI en octobre 2025 avec l'algorithme Quantum Echoes et le processeur Willow marque un tournant décisif dans la transition de l'informatique quantique d'une science théorique vers des applications pratiques. L'accélération de 13 000 fois par rapport aux superordinateurs classiques, combinée à la propriété de vérifiabilité des résultats, établit un nouveau paradigme pour l'informatique quantique. L'application démontrée à l'augmentation de la spectroscopie RMN pour la caractérisation moléculaire ouvre des perspectives prometteuses pour la découverte de médicaments et la science des matériaux. L'optimisme de l'équipe Google quant à la possibilité de voir des applications réelles dans les cinq prochaines années s'aligne avec les prévisions pour l'émergence de systèmes AGI pratiques.^{[27][28][32][35][38][39][1]}

Cependant, la réalisation du plein potentiel de ces technologies nécessite d'aborder des défis critiques en correction d'erreurs, mise à l'échelle matérielle, et, surtout, durabilité environnementale. L'empreinte carbone de l'informatique quantique et les exigences énergétiques substantielles de l'entraînement AGI exigent une attention proactive à l'efficacité énergétique et à l'impact environnemental du cycle de vie. Les cadres émergents pour l'informatique quantique durable et les approches systématiques vers l'AGI hétérogène offrent des voies prometteuses pour équilibrer l'avancement technologique avec la responsabilité environnementale.^{[5][6][25][26][39][42][114][120]}

Les applications dans la découverte de médicaments, l'optimisation financière, la modélisation climatique et la gestion énergétique démontrent la valeur pratique immédiate de l'intégration AGI-quantique tout en servant les objectifs de durabilité. À mesure que ces technologies mûrissent, leur convergence avec d'autres paradigmes émergents comme l'informatique neuromorphique, l'edge computing et les réseaux quantiques créera des synergies encore plus puissantes. La clé du succès réside dans une approche holistique qui considère simultanément les dimensions techniques, environnementales, éthiques et sociétales, assurant que le chemin vers l'AGI demeure aligné avec les valeurs humaines et la durabilité planétaire.^{[8][24][33][37][39][95][105][106][114][115][117]}

Le voyage vers l'intelligence artificielle générale durable via l'informatique quantique ne fait que commencer, mais les fondations établies par les recherches actuelles, incluant la percée majeure de Quantum Echoes, fournissent une base solide pour de futurs progrès. Les collaborations continues entre académie, industrie et décideurs politiques seront

essentielles pour naviguer les défis techniques, surmonter les obstacles de mise à l'échelle, et assurer le développement responsable de ces technologies transformatrices. En maintenant la durabilité comme principe organisateur central, la communauté de recherche peut travailler vers un avenir où l'intelligence artificielle générale améliore les capacités humaines tout en préservant et protégeant notre environnement pour les générations futures.^{[6][38][39][114][117][1][27]}

Note : Cet article scientifique intègre les développements les plus récents de l'informatique quantique, incluant la démonstration historique de l'avantage quantique vérifiable par Google Quantum AI en octobre 2025, et examine leur convergence avec la quête de l'intelligence artificielle générale dans une perspective de durabilité environnementale.

*
**

1. <https://www.youtube.com/watch?v=mEBCQidaNTQ>
2. <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-87931-9>
3. <https://mesopotamian.press/journals/index.php/bigdata/article/view/114>
4. <https://aristonpubs.com/article/10.69626/cai.2025.0001>
5. <https://arxiv.org/pdf/2408.05679.pdf>
6. <https://arxiv.org/abs/2408.05679>
7. <https://www.allmultidisciplinaryjournal.com/search?q=F-24-281&search=search>
8. <https://ijsrem.com/download/brain-inspired-artificial-intelligence-revolutionizing-computing-and-cognitive-systems/>
9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncom.2021.665662/full>
10. <https://www.ssrn.com/abstract=4197291>
11. <https://ijaers.com/detail/quantum-machine-learning-exploring-quantum-algorithms-for-enhancing-deep-learning-models/>
12. <https://www.ijfmr.com/research-paper.php?id=27450>
13. <https://ojs.boulibrary.com/index.php/JAIGS/article/view/35>
14. <https://arxiv.org/pdf/0705.3360.pdf>
15. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/09540091.2024.2312121?needAccess=true>
16. <https://arxiv.org/pdf/2208.03836.pdf>
17. <http://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevLett.117.130501>
18. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167739X2400596X>

19. <https://joster.org/index.php/joster/article/view/5>
20. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10015720/>
21. <https://arxiv.org/pdf/2303.03428.pdf>
22. <https://arxiv.org/pdf/1307.0411.pdf>
23. <https://arxiv.org/pdf/2303.06263.pdf>
24. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/8/3662>
25. https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-98685-7_1
26. <https://scipost.org/10.21468/SciPostPhysLectNotes.70>
27. <https://www.indjst.com/archives/paper-details?paperid=188&papertitle=willow-chip-technology-and-the-future-of-data-centers-a-review>
28. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11864966/>
29. <https://arxiv.org/html/2410.00917>
30. <https://arxiv.org/abs/2412.11924>
31. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11602728/>
32. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359644623001915>
33. <https://arxiv.org/pdf/2401.03759.pdf>
34. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11266395/>
35. <https://arxiv.org/pdf/2408.13479.pdf>
36. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8254374/>
37. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10821197/>
38. <https://www.indjst.com/archives/paper-details?paperid=192&papertitle=agentic-approach-in-the-quest-for-agi>
39. <https://www.ssrn.com/abstract=4941363>
40. <https://arxiv.org/pdf/2308.08025.pdf>
41. <https://arxiv.org/pdf/2411.00118.pdf>
42. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/adc0ba>
43. <http://arxiv.org/pdf/2310.09162v1.pdf>
44. <http://arxiv.org/pdf/2407.16296.pdf>

45. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jcim.1c00166>
46. <https://www.ssrn.com/abstract=4191391>
47. <http://hdl.handle.net/2183/41038>
48. <https://arxiv.org/pdf/2311.10594.pdf>
49. <https://arxiv.org/pdf/2301.01851.pdf>
50. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10956507/>
51. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11113263/>
52. <https://arxiv.org/abs/2308.08448>
53. <https://www.semanticscholar.org/paper/600915ae891614cc2e756ed567fba8d1d0ef7645>
54. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11014055/>
55. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10198241/>
56. <https://quantum-journal.org/papers/q-2024-11-07-1516/>
57. <https://arxiv.org/pdf/2308.07915v1.pdf>
58. <https://arxiv.org/abs/2304.04932>
59. <http://arxiv.org/pdf/2410.16537.pdf>
60. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3634769.3634800>
61. <https://arxiv.org/pdf/2307.05510.pdf>
62. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3634769.3634800>
63. <https://arxiv.org/pdf/2103.16726.pdf>
64. <https://arxiv.org/pdf/2411.11901.pdf>
65. <https://arxiv.org/pdf/2403.17495.pdf>
66. <https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/202562301029>
67. <https://www.ijraset.com/best-journal/sustainable-perovskite-multiferroic-materials-for-memristive-memory-and-neuromorphic-computing-devices>
68. <https://www.mdpi.com/2079-9268/15/2/16>
69. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10021921/>
70. <http://arxiv.org/pdf/2401.14885.pdf>

71. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10310025/>
72. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnano.2023.1128667/pdf>
73. <http://arxiv.org/pdf/2209.10481.pdf>
74. <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0116699>
75. <https://arxiv.org/html/2407.18625v1>
76. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/aisy.202000150>
77. <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202419245>
78. https://webzine.kps.or.kr/?p=5_view&idx=17026
79. <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09543-5>
80. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5650489/>
81. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevResearch.6.043253>
82. <https://link.aps.org/doi/10.1103/cjb4-l57n>
83. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9576754/>
84. <https://arxiv.org/abs/2009.11482>
85. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/abc6f4>
86. <https://www.semanticscholar.org/paper/28ea4538e6befc8cd375d339caadccc82026d8ba>
87. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10239111/>
88. <https://arxiv.org/pdf/2209.05469.pdf>
89. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ad6eb2>
90. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.14.041017>
91. <http://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevX.13.041052>
92. <https://arxiv.org/pdf/2408.00225.pdf>
93. <http://arxiv.org/pdf/2405.13196.pdf>
94. <https://arxiv.org/html/2402.14065v2>
95. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10590379/>
96. <https://epjquantumtechnology.springeropen.com/articles/10.1140/epjqt/s40507-021-00091-1>

97. <https://arxiv.org/pdf/2402.08210.pdf>
98. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10201520/>
99. <http://arxiv.org/pdf/2404.13113.pdf>
100. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10527612/>
101. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/enc2.12122>
102. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9731680/>
103. <https://ojs.boulibrary.com/index.php/JAIGS/article/view/201>
104. <http://arxiv.org/pdf/2504.03866.pdf>
105. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/ijdlg-2025-0006/html>
106. <https://www.semanticscholar.org/paper/21f1a164ea57d32a8dffc59cf7c82389916483>
107. <https://arxiv.org/abs/2404.09932>
108. <https://arxiv.org/pdf/2412.14186.pdf>
109. <https://arxiv.org/abs/2503.17688>
110. <https://arxiv.org/pdf/2410.08968.pdf>
111. <https://arxiv.org/pdf/2503.08919.pdf>
112. <http://arxiv.org/pdf/2501.16448.pdf>
113. https://mkscienceset.com/articles_file/880- article1746597747.pdf
114. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11059008/>
115. <https://pubs.aip.org/jap/article/132/16/160902/2837574/The-future-of-quantum-computing-with>
116. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9908934/>
117. <https://ijsrceit.com/index.php/home/article/view/CSEIT25111269>
118. <https://www.wr-publishing.org/index.php/ijarbm/article/view/129>
119. <https://arxiv.org/pdf/2306.13177.pdf>
120. <https://ejournals.org/ejcsit/vol13-issue23-2025/the-looming-energy-crisis-in-artificial-intelligence-pathways-to-sustainable-computing/>
121. <https://www.ijisrt.com/comparative-analysis-of-cryptographic-algorithms-and-the-impact-of-quantum-computing-on-cybersecurity>
122. <https://arxiv.org/abs/2503.13457>

123. <https://arxiv.org/html/2403.14188v1>
124. <https://arxiv.org/abs/2204.05066>
125. <https://arxiv.org/pdf/1706.04300.pdf>
126. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11864976/>
127. <https://academic.oup.com/nsr/advance-article-pdf/doi/10.1093/nsr/nwae161/57369037/nwae161.pdf>
128. <https://arxiv.org/pdf/2412.18726.pdf>
129. <http://arxiv.org/pdf/1712.01356.pdf>
130. <https://link.aps.org/doi/10.1103/s2fc-3d18>
131. <https://mesopotamian.press/journals/index.php/ADSA/article/view/757>
132. <https://www.semanticscholar.org/paper/d02b8af6466daee8114e33e04e2161ef3a224f1d>
133. <https://journaljerr.com/index.php/JERR/article/view/1644>
134. <https://arxiv.org/abs/2509.00095>
135. <https://journals.physiology.org/doi/10.1152/physiol.2025.40.S1.0222>
136. <https://ojs.bonviewpress.com/index.php/ICCE/article/view/5121>
137. <https://xlink.rsc.org/?DOI=D5SC03256C>
138. <https://slejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40561-025-00406-0>
139. <https://mehdijournal.com/index.php/mehdiophthalmol/article/view/1229>
140. <http://arxiv.org/pdf/2504.07345.pdf>
141. <https://arxiv.org/abs/2407.02553>
142. [https://nottingham-repository.worktribe.com/preview/2858345/Designing quantum experiments ga QST sub2 v1.pdf](https://nottingham-repository.worktribe.com/preview/2858345/Designing_quantum_experiments_ga_QST_sub2_v1.pdf)
143. <https://arxiv.org/abs/1812.01032>
144. <https://arxiv.org/pdf/2212.10990.pdf>
145. <http://arxiv.org/pdf/2408.08814.pdf>
146. <https://www.researchprotocols.org/2025/1/e64640>
147. https://bio.visnyk.knu.ua/article/view/vol100_n1.56-65
148. <https://arxiv.org/html/2411.13920v2>

149. <https://arxiv.org/pdf/2312.10868.pdf>

150. <https://arxiv.org/pdf/1709.02779.pdf>

151. <http://arxiv.org/pdf/2405.11632.pdf>

152. <http://arxiv.org/pdf/2408.10726.pdf>

153. <https://arxiv.org/abs/2409.08777>



Critique – Interaction - Intelligence Artificielle Générale et Informatique Quantique

1. Synthèse Exécutive de l'Évaluation

Le document soumis se présente comme un article scientifique mais relève fondamentalement de la synthèse spéculative sur des technologies existantes et futures. Il est dépourvu des composantes essentielles d'une recherche scientifique originale, à savoir une nouvelle proposition falsifiable, soutenue par un cadre théorique rigoureux et des preuves vérifiables. La faille centrale de l'article, qui anéantit sa crédibilité scientifique, est que sa "contribution" principale — la prétendue démonstration de l'algorithme "Quantum Echoes" par Google Quantum AI en "octobre 2025" — est un événement fictif. Le texte extrapole à partir de recherches réelles sur les corrélateurs hors du temps (Out-of-Time-Ordered Correlators, OTOCs) et le processeur Willow, mais présente cette projection future comme un fait accompli. Sur le plan méthodologique, l'article est exempt de toute définition mathématique formelle, de théorèmes ou de preuves. Les affirmations d'avantage computationnel sont présentées sous forme de facteurs numériques (par ex. "13 000 fois") sans l'analyse de complexité asymptotique requise. De plus, la méthode de citation, qui repose quasi exclusivement sur des URL brutes, est inappropriée pour une publication académique. En raison d'une absence totale de rigueur théorique, de sa dépendance à une affirmation centrale fictive et du non-respect des standards de base de la communication scientifique, cet article ne peut être considéré comme une contribution crédible au domaine de l'informatique théorique.

2. Analyse Détaillée par Axe

Contribution et Originalité

Problème Posé

L'article aborde le vaste champ interdisciplinaire à l'intersection de l'Intelligence Artificielle Générale (AGI), de l'informatique quantique et de la durabilité. Cependant, il échoue à formuler un problème de recherche spécifique et bien délimité. Au lieu de poser une question précise et de proposer une solution, le document narre une vision de la convergence technologique. Cette approche correspond au format d'un article de vulgarisation scientifique ou d'un livre blanc, mais non à celui d'une contribution de recherche destinée à une conférence ou un journal de premier plan.

Nouveauté

La principale revendication de nouveauté repose sur l'algorithme "Quantum Echoes". Celui-ci est présenté comme une percée historique, mais l'article n'en fournit aucun détail technique original. Il ne fait que rapporter un événement futur et hypothétique.

Le document confond ainsi des recherches réelles et en cours avec un résultat fictif. Le nom "Quantum Echoes" a effectivement été utilisé par Google pour décrire ses expériences sur les OTOCs.² Les OTOCs eux-mêmes sont un concept bien connu en physique à N-corps, utilisés pour étudier le chaos quantique et la dispersion de l'information (information scrambling).⁵ L'article n'apporte aucune contribution à la théorie des OTOCs ; il se contente d'utiliser le nom d'une expérience réelle dans un contexte fictif. La véritable annonce de Google portait sur la démonstration d'un *avantage quantique vérifiable* en utilisant un algorithme basé sur les OTOCs.⁸ Le document analysé prend cet événement réel, en fictionnalise la date ("octobre 2025"), et le présente comme un fait historique établi dans son récit, sans jamais reconnaître sa nature spéculative. Il s'agit d'une défaillance critique au regard de l'intégrité scientifique. La "contribution" de l'article n'est donc pas une recherche nouvelle, mais relève de la science-fiction.

Positionnement par rapport à l'état de l'art

La revue de littérature est gravement déficiente. Elle consiste en une liste de 153 URL à la fin du document, avec des renvois numériques dans le texte. Ce style de citation empêche tout engagement significatif avec la littérature existante. Une revue de l'art adéquate exige de discuter les travaux cités, de comparer leurs méthodes et d'expliquer en quoi le présent article les étend ou les remet en question. Citer une vidéo YouTube comme source principale pour une affirmation fondamentale est inacceptable dans un contexte scientifique formel. Un évaluateur ne peut vérifier les affirmations sans consulter chaque lien, et même alors, les sources sont un mélange hétéroclite de prépublications, de billets de blog, d'articles de presse et d'autres documents non évalués par des pairs. Cela indique que les auteurs n'ont pas engagé un dialogue académique avec la littérature primaire et validée du domaine. L'article se positionne comme un résumé d'informations en ligne, et non comme un travail qui s'appuie sur les fondations scientifiques établies.

Évaluation de la Rigueur Théorique et de la Validité (Point Critique)

Appareil Formel

Il y a une absence totale de cadre mathématique formel. Un article en informatique théorique doit être construit sur des définitions précises, des notations claires, des lemmes et des théorèmes. Par exemple, l'article discute des OTOCs mais ne fournit jamais de définition mathématique, telle que $C(t) = -\langle \text{angle}^2 \rangle$.⁶ Il s'appuie entièrement sur une analogie ("écholocalisation utilisée par les chauves-souris"). Bien que l'intuition soit précieuse, elle ne peut se substituer à une définition formelle. Ce manque de formalisme rend chaque affirmation technique de l'article invérifiable et donc scientifiquement invalide. Il est impossible d'évaluer la correction d'un résultat sans un énoncé formel de ce qui est prouvé.

Analyse des Preuves

Aucune preuve n'est présentée. L'article procède par assertions. L'affirmation selon laquelle "Quantum Echoes" s'exécute "13 000 fois plus rapidement que l'un des superordinateurs les plus puissants au monde" est énoncée sans aucune analyse à l'appui. Une revendication rigoureuse nécessiterait :

1. Une définition formelle du problème de calcul.
2. Une analyse de complexité asymptotique de l'algorithme quantique (par exemple, en notation $O(n \log n)$).
3. Une analyse de complexité asymptotique du meilleur algorithme classique connu (par exemple, en notation $O(2^n)$).
4. Une preuve que l'algorithme quantique est asymptotiquement supérieur.

L'article ne fournit aucun de ces éléments. Le chiffre "13 000" est une mesure de performance pour une instance matérielle spécifique, et non une accélération théorique prouvée. La véritable annonce de Google fournit ce chiffre, mais en tant que résultat d'une expérience spécifique, et non comme un théorème général.²

Hypothèses (Assumptions)

L'hypothèse centrale, non déclarée, est que l'événement fictif d'"octobre 2025" est réel. Ce n'est pas une hypothèse scientifique justifiable. De plus, l'article fait des suppositions très larges sur les capacités de l'AGI et des ordinateurs quantiques sans reconnaître les immenses défis non résolus. Par exemple, il suppose que la correction d'erreurs quantiques est un problème suffisamment résolu pour permettre l'exécution d'algorithmes aussi complexes. Bien que le processeur Willow de Google ait fait des progrès¹¹, le surcoût pour un calcul tolérant aux pannes reste un défi majeur et ouvert.¹ L'article présente cela comme un fait accompli.

Analyse de Complexité

Comme indiqué précédemment, il n'y a aucune analyse de complexité. C'est une lacune fatale pour un article soumis à une conférence comme STOC, FOCS ou SICOMP, où l'analyse de complexité est la méthodologie centrale.

Analyse de la Clarté et de la Structure

Organisation

L'article est structuré comme un article de synthèse ou une revue de littérature, passant des concepts fondamentaux aux applications. Bien que logique pour ce genre, ce n'est pas la structure d'un article de recherche, qui suit généralement un format Introduction -> Préliminaires -> Résultat Principal -> Preuve -> Conclusion.

Qualité de la Rédaction

Le langage est généralement clair mais manque de précision technique. Il est rédigé dans un style narratif, presque journalistique. Les auteurs excellent à expliquer l'intuition mais échouent à fournir la substance technique sous-jacente. Par exemple, la description de l'"effet papillon" et de l'"interférence quantique" est évocatrice mais ne remplace pas les diagrammes de circuits et le formalisme mathématique dont un expert aurait besoin pour comprendre et vérifier l'algorithme. Ce style de rédaction suggère que l'objectif de l'article est d'informer ou de persuader un large public, plutôt que de présenter un résultat scientifique vérifiable à une communauté d'experts.

Évaluation de l'Impact et de la Portée

Importance des Résultats

Les *sujets* abordés sont d'une importance immense. Le potentiel de l'informatique quantique pour impacter l'AGI et la durabilité est un sujet de recherche intense. Cependant, comme l'article ne présente aucun *résultat* réel et vérifiable, son impact scientifique est nul. Il résume les espoirs et les affirmations existants mais ne fait pas progresser l'état des connaissances.

Généralisable

L'article ne développe aucune nouvelle technique. Par conséquent, il n'y a rien à généraliser à d'autres problèmes. Il fait des affirmations sur l'applicabilité de "Quantum Echoes" à la spectroscopie RMN, ce qui correspond aux objectifs de recherche réels de l'équipe de Google.² Cependant, l'article lui-même n'apporte aucune nouvelle perspective sur la *manière* dont cela est réalisé, au-delà de résumer les affirmations de ses sources.

La section sur la durabilité présente une contradiction interne significative. Elle promeut l'informatique quantique pour des applications durables (par exemple, l'optimisation des réseaux énergétiques) tout en ignorant complètement l'empreinte énergétique massive des ordinateurs quantiques eux-mêmes. Les ordinateurs quantiques supraconducteurs comme Willow nécessitent des réfrigérateurs à dilution qui consomment une puissance considérable (10–25 kW) uniquement pour le refroidissement.¹³ Une analyse complète du cycle de vie révèle un impact environnemental substantiel lié à la fabrication, à l'exploitation et à l'élimination.¹⁶ Un article crédible sur la "durabilité quantique" doit aborder ce compromis. En omettant ce contexte crucial, l'article présente un argument unilatéral et trompeur, ce qui nuit davantage à sa crédibilité.

3. Points de Critique Majeurs et Failles Identifiées

- **Fondement sur une affirmation factuellement fausse/fictive** : L'article présente comme un fait accompli un événement ("démonstration de Quantum Echoes en octobre 2025") qui est, au moment de cette évaluation, une projection future et non un résultat historique. Ceci constitue une violation fondamentale de l'éthique de la publication scientifique.
- **Absence totale de rigueur théorique** : Le document ne contient aucune définition formelle, aucun théorème, aucun lemme et aucune preuve. Les affirmations techniques ne sont pas étayées par un appareil mathématique, ce qui les rend invérifiables.
- **Manque d'analyse de complexité** : L'affirmation d'un avantage computationnel ("13 000 fois plus rapide") est présentée sans aucune analyse de complexité asymptotique, la rendant scientifiquement vide de sens dans le contexte de l'informatique théorique.
- **Méthodologie de citation inappropriée** : L'utilisation de simples URL en guise de bibliographie est inacceptable. Elle

empêche un engagement critique avec l'état de l'art et témoigne d'un manque de rigueur académique.

- **Interprétation superficielle de la "vérifiabilité"** : Le concept de "vérifiabilité" est crucial pour les récentes revendications d'avantage quantique. Le document le mentionne mais n'analyse pas ses implications profondes et ses limitations (par exemple, la nécessité d'un autre ordinateur quantique pour la vérification, par opposition à une vérification classique).¹⁹
- **Analyse de la durabilité contradictoire et incomplète** : L'article promeut l'informatique quantique pour des applications durables tout en omettant complètement de discuter de l'empreinte énergétique et environnementale considérable de la technologie quantique elle-même (réfrigération cryogénique, fabrication).¹³

4. Questions aux Auteurs et Suggestions d'Amélioration

Questions de clarification

1. La section "Percée de l'Avantage Quantique Vérifiable: L'Algorithme Quantum Echoes" (p. 3) est datée "octobre 2025". S'agit-il d'un travail de prospective ou d'une erreur factuelle? Si c'est de la prospective, l'article doit être entièrement reformulé comme tel, avec une méthodologie de prévision claire.
2. Pouvez-vous fournir une définition mathématique formelle de "l'algorithme Quantum Echoes" tel que vous le décrivez, incluant le problème qu'il résout, les portes quantiques utilisées, et l'observable mesurée?
3. Pouvez-vous fournir une preuve rigoureuse de l'avantage en complexité de cet algorithme? Cela doit inclure une analyse asymptotique (en notation $O(\cdot)$) de l'algorithme quantique et du meilleur algorithme classique connu.
4. Comment définissez-vous formellement la "vérifiabilité" dans ce contexte? Votre définition est-elle alignée avec la vérifiabilité classique efficace, ou se réfère-t-elle à la répétabilité sur un autre dispositif quantique, comme discuté dans la littérature récente?

Suggestions d'amélioration (pour une révision fondamentale)

1. **Re-cadrage** : L'article doit être radicalement re-cadré. S'il s'agit d'un article de synthèse (review), il doit être présenté comme tel, abandonner toute prétention de contribution originale, et adopter une méthodologie de citation et d'analyse de la littérature rigoureuse.
2. **Focalisation** : S'il y a une contribution originale (par exemple, un nouvel algorithme QML ou une nouvelle analyse de complexité), l'article entier doit être réécrit pour se concentrer exclusivement sur cette contribution, en suivant la structure standard : définition du problème, présentation de l'algorithme/résultat, preuve de correction et d'efficacité, et comparaison avec les travaux antérieurs.
3. **Rigueur** : Intégrer l'appareil formel (définitions, théorèmes, preuves) qui est actuellement absent. Toutes les affirmations doivent être prouvées ou précisément attribuées à des sources évaluées par des pairs.
4. **Honnêteté intellectuelle** : La discussion sur la durabilité doit être équilibrée, en abordant à la fois les applications potentielles et les défis environnementaux inhérents à la technologie quantique.

5. Verdict Final sur la Crédibilité et Recommandation

- **Évaluation de la Crédibilité : Faible / Nulle**. L'article, dans sa forme actuelle, ne possède pas de crédibilité scientifique. Il ne respecte pas les normes fondamentales de la recherche en informatique théorique, notamment l'originalité, la rigueur formelle et la vérifiabilité des résultats. Sa principale "contribution" est basée sur un événement fictif.
- **Recommandation : Rejet (Reject)**.
 - **Justification** : L'article n'est pas un travail de recherche scientifique mais une compilation spéculative qui s'apparente à un article de vulgarisation ou à un rapport de prospective. Il ne propose aucune contribution originale, vérifiable ou rigoureusement défendue. Les failles méthodologiques sont si fondamentales (absence de preuves, de formalisme, de citations appropriées, et fondement sur une affirmation fictive) qu'une révision, même majeure, ne pourrait le rendre acceptable pour une publication dans une conférence ou un journal de premier plan. Il ne s'agit pas d'un article contenant des erreurs à corriger, mais d'un document qui, par sa nature même, ne constitue pas une contribution scientifique.

Ouvrages cités

1. Perplexity - Interaction entre l'Intelligence Artificielle Générale et l'Informatique Quantique Vers la Durabilité.pdf
2. ETtech Explainer: How Google's Quantum breakthrough can make a difference in the real world, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://m.economictimes.com/tech/technology/ettech-explainer-how-googles-quantum-breakthrough-can-make-a-difference-in-the-real-world/articleshow/124757799.cms>
3. Google CEO Sundar Pichai celebrates new breakthrough in quantum algorithm; Elon Musk replies: 'Looks like...', dernier accès : octobre 23, 2025, <https://timesofindia.indiatimes.com/technology/tech-news/google-ceo-sundar-pichai-celebrates-new-breakthrough-in-quantum-algorithm-elon-musk-replies-looks-like/articleshow/124754841.cms>
4. Google says its Willow chip achieved first-ever "verifiable quantum advantage", dernier accès : octobre 23, 2025, <https://www.aninews.in/news/world/us/google-says-its-willow-chip-achieved-first-ever-verifiable-quantum-advantage20251023070041>
5. Out-of-time-ordered correlators of mean-field bosons via Bogoliubov theory, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://quantum-journal.org/papers/q-2025-01-13-1587/>
6. Quadratic Growth of Out-of-Time-Ordered Correlators in Quantum Kicked Rotor Model, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://www.mdpi.com/1099-4300/26/3/229>
7. Out-of-time-order correlations and quantum chaos - Scholarpedia, dernier accès : octobre 23, 2025, http://www.scholarpedia.org/article/Out-of-time-order_correlations_and_quantum_chaos
8. Google Quantum AI Shows 13,000× Speedup Over World's Fastest ..., dernier accès : octobre 23, 2025, <https://thequantuminsider.com/2025/10/22/google-quantum-ai-shows-13000x-speedup-over-worlds-fastest-supercomputer-in-physics-simulation/>
9. Google Claims Quantum Advantage with Willow Chip - HPCwire, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://www.hpcwire.com/2025/10/22/google-claims-quantum-advantage-with-willow-chip/>
10. Google brings quantum computing a step closer to real-world applications - IT-Online, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://it-online.co.za/2025/10/23/google-brings-quantum-computing-a-step-closer-to-real-world-applications/>
11. Willow processor - Wikipedia, dernier accès : octobre 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Willow_processor
12. Meet Willow, our state-of-the-art quantum chip - The Keyword, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip/>
13. Quantum Computing Energy Consumption: How Sustainable Is It? (Latest Data) - PatentPC, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://patentpc.com/blog/quantum-computing-energy-consumption-how-sustainable-is-it-latest-data>
14. Making sense of the Sycamore's computing prowess - power consumption, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://quantumcomputing.stackexchange.com/questions/8608/making-sense-of-the-sycamores-computing-prowess-power-consumption>
15. Dilution Refrigerator: Everything You Need to Know [2025] - SpinQ, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://www.spinquanta.com/news-detail/the-complete-guide-to-dilution-refrigerators>
16. Scaling up to problem sizes: an environmental life cycle assessment of quantum computing, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://www.semanticscholar.org/paper/Scaling-up-to-problem-sizes%3A-an-environmental-life-Cordier-Thibault/eab75d9df27148c624cd2511ce527352393b60d7>
17. Opportunities and Challenges of Benchmarking Carbon in the Quantum Computing Lifecycle - arXiv, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://arxiv.org/html/2408.05679v2>
18. Sustainable Quantum Computing: Opportunities and Challenges of Benchmarking Carbon in the Quantum Computing Lifecycle - ResearchGate, dernier accès : octobre 23, 2025, https://www.researchgate.net/publication/383059787_Sustainable_Quantum_Computing_Opportunities_and_Challenges_of_Benchmarking_Carbon_in_the_Quantum_Computing_Lifecycle
19. Quantum 'echoes' reveal the potential of Google's quantum computer, dernier accès : octobre 23, 2025,

<https://www.sciencenews.org/article/quantum-echoes-google-computer>

20. A simplified version of the quantum OTOC(2) problem - arXiv, dernier accès : octobre 23, 2025,

<https://arxiv.org/html/2510.19751v1>

21. Willow quantum chip demonstrates verifiable quantum advantage on hardware | Hacker News, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://news.ycombinator.com/item?id=45670443>

22. How Quantum Computing Could Reshape Energy Use in High-Performance Computing, dernier accès : octobre 23, 2025, <https://www.hpcwire.com/2025/02/03/how-quantum-computing-could-reshape-energy-use-in-high-performance-computing/>