

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 de 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][7][3][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][9][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.^{[10][7][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.^{[13][14][15][16][12][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][12][17]}

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.^{[18][19][11][12][20][21][22]}

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.^{[10][7][16]}

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.^{[23][12][20][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]}

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.^{[18][19][12][20][27][28]}

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.^{[19][11][12][20]}

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.^{[23][4][29][30][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.^{[12][21][17][22]}

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][31][32][33]}

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.^{[34][33][35]}

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.^[33]

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.^{[36][19][20][37]}

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.^{[20][21][25][38][37][39]}

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.^{[27][40][37][20]}

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.^{[41][20]}

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][42][43][6][44][45]}

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.^{[42][46][47]}

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.^[48]

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.^{[23][29][30][49][50]}

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.^{[29][30][23]}

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.^{[51][52][53]}

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.^{[54][53][51]}

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.^{[55][56][8][57][9][58][59][60]}

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.^{[8][57][61][62][60]}

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.^{[56][63][64][60][65]}

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.^{[9][58][55]}

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][66][67][68]}

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 .^{[47][67][38][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.^[38]

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.^{[69][70]}

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.^{[67][71][72]}

La distillation d'états magiques fournit une solution où les états quantiques d'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.^[67]

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 plane.^{[70][73][71]}

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.^[67]

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.^{[42][46][47][25][38][74]}

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.^{[46][75][74][76]}

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.^{[77][78][39][79][80]}

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.^{[81][82][80]}

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.^{[27][83][84][85][86][87][88][89]}

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.^{[86][87][88]}

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.^{[90][27]}

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.^{[91][92]}

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.^{[93][83][84][34][33]}

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.^{[34][33]}

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.^[94]

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][83][84][96]}

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.^{[51][52][53]}

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.^{[53][51]}

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.^[52]

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.^{[54][97]}

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.^{[98][99][100][101]}

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.^[98]

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.^{[99][102]}

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.^[103]

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.^[100]

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.^[104]

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.^{[105][106]}

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.^[107]

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.^{[108][98][101]}

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.^{[109][108]}

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][109]}

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.^[101]

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.^{[110][76][39]}

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.^{[77][78][79][80][111]}

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.^{[63][58][65]}

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.^{[14][81][110]}

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.^{[112][9][101]}

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.^[9]

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.^[113]

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.^{[61][62]}

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][112][109][47][6][101]}

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.^[101]

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.^{[31][55][63][57][9][58][60][33]}

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.^{[109][47][6][114][5][101]}

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][19][21][22][57][58][60]}

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.^{[115][5][109][47][6][101][25][26]}

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.^{[23][112][51][109][9][98][99][101][83][86][110]}

Le voyage vers l'intelligence artificielle générale durable via l'informatique quantique ne fait que commencer, mais les fondations établies par les recherches actuelles 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.^{[112][109][6][104][101]}

**

1. <https://ictjournal.icict.org.zm/index.php/zictjournal/article/view/265>
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://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncom.2021.665662/full>
9. <https://ijsrem.com/download/brain-inspired-artificial-intelligence-revolutionizing-computing-and-cognitive-systems/>
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/2208.03836.pdf>
15. <https://arxiv.org/pdf/0705.3360.pdf>
16. <http://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevLett.117.130501>
17. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/09540091.2024.2312121?needAccess=true>
18. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167739X2400596X>
19. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10015720/>
20. <https://joster.org/index.php/joster/article/view/5>
21. <https://arxiv.org/pdf/2303.03428.pdf>
22. <https://arxiv.org/pdf/1307.0411.pdf>
23. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/8/3662>
24. <https://arxiv.org/pdf/2303.06263.pdf>
25. https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-98685-7_1
26. <https://scipost.org/10.21468/SciPostPhysLectNotes.70>
27. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jcim.1c00166>
28. <https://www.ssrn.com/abstract=4191391>
29. <http://hdl.handle.net/2183/41038>
30. <https://arxiv.org/pdf/2311.10594.pdf>
31. <https://arxiv.org/pdf/2301.01851.pdf>
32. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11113263/>

33. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10956507/>
34. <https://arxiv.org/abs/2308.08448>
35. <https://www.semanticscholar.org/paper/600915ae891614cc2e756ed567fba8d1d0ef7645>
36. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10198241/>
37. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11014055/>
38. <https://arxiv.org/pdf/2308.07915v1.pdf>
39. <https://quantum-journal.org/papers/q-2024-11-07-1516/>
40. <https://arxiv.org/abs/2304.04932>
41. <http://arxiv.org/pdf/2410.16537.pdf>
42. <https://arxiv.org/pdf/2411.00118.pdf>
43. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3634769.3634800>
44. <https://arxiv.org/pdf/2307.05510.pdf>
45. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3634769.3634800>
46. <https://arxiv.org/pdf/2103.16726.pdf>
47. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/adc0ba>
48. <https://arxiv.org/pdf/2308.08025.pdf>
49. <https://arxiv.org/pdf/2411.11901.pdf>
50. <https://arxiv.org/pdf/2403.17495.pdf>
51. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10821197/>
52. <http://arxiv.org/pdf/2310.09162v1.pdf>
53. <http://arxiv.org/pdf/2407.16296.pdf>
54. <https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/202562301029>
55. <https://www.ijraset.com/best-journal/sustainable-perovskite-multiferroic-materials-for-memristive-memory-and-neuromorphic-computing-devices>
56. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10021921/>
57. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10310025/>
58. <https://www.mdpi.com/2079-9268/15/2/16>

59. <http://arxiv.org/pdf/2401.14885.pdf>
60. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnano.2023.1128667/pdf>
61. <http://arxiv.org/pdf/2209.10481.pdf>
62. <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0116699>
63. <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202419245>
64. <https://arxiv.org/html/2407.18625v1>
65. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/aisy.202000150>
66. https://webzine.kps.or.kr/?p=5_view&idx=17026
67. <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09543-5>
68. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5650489/>
69. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevResearch.6.043253>
70. <https://link.aps.org/doi/10.1103/cjb4-l57n>
71. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9576754/>
72. <https://arxiv.org/abs/2009.11482>
73. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/abc6f4>
74. <https://www.semanticscholar.org/paper/28ea4538e6befc8cd375d339caadccc82026d8ba>
75. <https://arxiv.org/pdf/2209.05469.pdf>
76. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10239111/>
77. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ad6eb2>
78. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.14.041017>
79. <http://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevX.13.041052>
80. <https://arxiv.org/pdf/2408.00225.pdf>
81. <http://arxiv.org/pdf/2405.13196.pdf>
82. <https://arxiv.org/html/2402.14065v2>
83. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10590379/>
84. <https://epjquantumtechnology.springeropen.com/articles/10.1140/epjqt/s40507-021-00091-1>

85. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359644623001915>
86. <https://arxiv.org/pdf/2401.03759.pdf>
87. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11266395/>
88. <https://arxiv.org/pdf/2402.08210.pdf>
89. <https://arxiv.org/pdf/2408.13479.pdf>
90. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8254374/>
91. <http://arxiv.org/pdf/2404.13113.pdf>
92. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10201520/>
93. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10527612/>
94. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/enc2.12122>
95. <https://ojs.boulibrary.com/index.php/JAIGS/article/view/201>
96. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9731680/>
97. <http://arxiv.org/pdf/2504.03866.pdf>
98. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/ijdlg-2025-0006/html>
99. <https://www.semanticscholar.org/paper/21f1a164ea57d32a8dfffcb59cf7c82389916483>
100. <https://arxiv.org/abs/2404.09932>
101. <https://www.ssrn.com/abstract=4941363>
102. <https://arxiv.org/pdf/2412.14186.pdf>
103. <https://arxiv.org/abs/2503.17688>
104. <https://www.indicst.com/archives/paper-details?paperid=192&papertitle=agentic-approach-in-the-quest-for-agi>
105. <https://arxiv.org/pdf/2503.08919.pdf>
106. <https://arxiv.org/pdf/2410.08968.pdf>
107. <http://arxiv.org/pdf/2501.16448.pdf>
108. https://mkscienceset.com/articles_file/880- article1746597747.pdf
109. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11059008/>
110. <https://pubs.aip.org/jap/article/132/16/160902/2837574/The-future-of-quantum-computing-with>

111. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9908934/>
112. <https://ijsrcseit.com/index.php/home/article/view/CSEIT25111269>
113. <https://www.wr-publishing.org/index.php/ijarbm/article/view/129>
114. <https://arxiv.org/pdf/2306.13177.pdf>
115. <https://ejournals.org/ejcsit/vol13-issue23-2025/the-looming-energy-crisis-in-artificial-intelligence-pathways-to-sustainable-computing/>
116. <https://link.springer.com/10.1007/s42354-021-0416-7>
117. <https://arxiv.org/pdf/2303.11028.pdf>
118. <https://arxiv.org/html/2411.13920v2>
119. <http://arxiv.org/pdf/2405.02493.pdf>
120. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ae0eac>
121. <https://ijst.org/index.php/j/article/view/35>
122. <https://ijsrem.com/download/green-cloud-computing-and-sustainability-innovations-for-a-greener-digital-future/>
123. <https://ejournals.org/ejcsit/vol13-issue14-2025/sustainability-initiatives-and-cloud-computing-reducing-carbon-footprint-in-data-centers/>
124. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3659997.3660033>
125. <https://arxiv.org/abs/2204.04198>
126. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10352253/>
127. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10608851/>
128. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11110797/>
129. <https://pubs.aip.org/jap/article/129/20/200901/157459/Neuromorphic-photonics-2D-or-not-2D>
130. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11074899/>
131. <https://arxiv.org/pdf/2307.07963.pdf>
132. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11127998/>
133. <https://arxiv.org/abs/2409.11415>
134. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/SASBE-10-2023-0321/full/html>
135. <https://arxiv.org/abs/2508.10108>

136. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5342311/>
137. <https://arxiv.org/html/2504.01849v1>
138. <https://arxiv.org/pdf/1805.01109.pdf>
139. <http://arxiv.org/pdf/2410.00081.pdf>
140. <https://arxiv.org/pdf/1811.03653.pdf>
141. <https://quantum-journal.org/papers/q-2025-03-26-1676/>
142. <https://www.semanticscholar.org/paper/3e97a48cdd577d770c1cf9055fee817f5cdc1c56>
143. <http://arxiv.org/pdf/2501.14380.pdf>
144. <http://arxiv.org/pdf/0709.0128.pdf>
145. <http://arxiv.org/pdf/2503.10790.pdf>
146. <https://arxiv.org/pdf/2308.05403.pdf>
147. <https://arxiv.org/pdf/2410.05369.pdf>
148. <https://www.ijfmr.com/research-paper.php?id=50738>
149. <https://www.ijraset.com/best-journal/quantum-integration-in-hpc-current-paradigms-industrial-applications-and-research-frontiers>
150. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/spe.3264>
151. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7853709/>
152. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9664563/>
153. <https://www.semanticscholar.org/paper/baf9df1cd0bc035ffc9d3906c415c84f430f78e8>
154. <https://www.semanticscholar.org/paper/255b28b67cc872d813c878f8db57a7de29eeb445>
155. <https://arxiv.org/pdf/1904.06560.pdf>
156. <https://arxiv.org/abs/2302.02966>
157. <http://arxiv.org/pdf/2405.11450.pdf>
158. <http://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevX.14.041017>