Offre de stage – 2027

Benchmarking et développement de techniques de mitigation d'erreur pour les processeurs quantiques analogiques

Mots-clés : Mitigation d'erreur, benchmarking, calcul quantique analogique, atomes de Rydberg, Pasqal, bruit quantique, estimation statistique.
Lieu du stage : LaBRI, Université de Bordeaux (équipe « Information et Calcul Quantique »).
Période du stage : 3 à 6 mois, entre février et juillet 2027.
Encadrement : Stéphane Dartois (Université de Bordeaux) et Adrian Tanasa (Université de Bordeaux).
Contact : stephane.dartois@u-bordeaux.fr.

La Maison du quantique de Nouvelle-Aquitaine, dans le cadre du programme national HQI, propose des stages de recherche sur l'étude et la conception d'algorithmes quantiques pour des cas d'usage industriels. Le présent sujet s'inscrit dans cette dynamique en étudiant la fiabilité des résultats produits par les processeurs quantiques analogiques. La liste des stages disponibles est accessible à l'adresse : `https://quantique.labri.fr/hybquant/`.

Présentation du sujet

Les processeurs quantiques analogiques (QPU), notamment les réseaux d'atomes neutres développés par Pasqal, permettent de programmer une dynamique quantique en contrôlant les interactions entre atomes et les impulsions laser qui leur sont appliquées. Leurs résultats restent toutefois affectés par les imperfections de préparation et de lecture, les fluctuations des contrôles, le mouvement des atomes et la décohérence. La *mitigation d'erreur* vise à réduire l'effet de ces imperfections sur les quantités estimées, en combinant des mesures supplémentaires et un traitement classique des données, sans recourir à un encodage complet de correction d'erreurs [1]. Le stage portera sur le benchmarking et le développement de telles techniques pour les QPU analogiques à atomes de Rydberg, principalement de type Pasqal.

Une difficulté centrale est que plusieurs méthodes usuelles de mitigation supposent de pouvoir faire varier le niveau de bruit tout en préservant l'évolution idéale recherchée. C'est notamment le cas de l'extrapolation vers le bruit nul (*zero-noise extrapolation*, ZNE). Sur un QPU analogique, cette variation contrôlée est souvent difficilement accessible : allonger une impulsion ou modifier son amplitude change généralement aussi la dynamique du système. Préserver cette dynamique par étirement temporel demanderait de redimensionner de manière cohérente l'ensemble des termes du Hamiltonien, y compris les interactions entre atomes, liées à leur géométrie [2]. De plus, les différentes sources de bruit ne varient pas nécessairement suivant un même facteur. La possibilité de modifier librement un paramètre de bruit dans un émulateur ne garantit donc pas l'existence d'un protocole équivalent sur le matériel. Le stage cherchera à préciser les conditions de validité et d'accessibilité de ces approches, puis à développer des alternatives compatibles avec les contrôles disponibles.

Le travail débutera par l'identification des principales sources d'erreur et des possibilités de contrôle, de calibration et de mesure du dispositif considéré. Un ensemble de problèmes tests sera construit à l'aide de Pulser et de ses outils de simulation bruitée [2] : dynamiques

de petits systèmes de spins, préparation d'états ou instances d'optimisation encodées dans les interactions de Rydberg. Pour les tailles accessibles au calcul classique, les résultats idéaux fourniront une référence permettant de quantifier séparément les effets du bruit et ceux de la mitigation. Les observables étudiées seront choisies parmi celles effectivement mesurables sur le QPU, par exemple les populations et les corrélations dans la base de lecture.

Une sélection de méthodes sera implémentée et comparée : mitigation des erreurs de lecture à partir de calibrations, exploitation de symétries ou de contraintes vérifiables lorsqu'elles sont justifiées, et corrections apprises sur des expériences de référence simulables classiquement. Des travaux sur les QPU Pasqal fournissent déjà des exemples de traitement des erreurs de détection et de sélection des résultats [3]. Le stage visera à adapter ces approches et à proposer une amélioration ciblée, par exemple pour tenir compte d'erreurs de lecture corrélées ou de dérives de calibration.

Le benchmarking comparera les résultats bruts et les résultats mitigés **à budget total de mesures fixé**, en incluant les expériences de calibration, les données d'apprentissage et les mesures éventuellement rejetées. Les critères comprendront le biais, la variance et l'erreur quadratique moyenne des estimations, ainsi que le coût du traitement classique. La robustesse sera testée face aux erreurs de modélisation du bruit, aux dérives temporelles et à l'augmentation de la taille des systèmes. Les méthodes apprises seront évaluées sur des instances distinctes de celles utilisées pour leur ajustement. Une extrapolation obtenue en faisant varier artificiellement le bruit dans un simulateur pourra servir de point de comparaison, mais sera distinguée des protocoles réalisables sur le QPU.

Les expériences reposeront d'abord sur des simulations numériques et pourront être complétées, selon les accès disponibles, par des exécutions sur matériel Pasqal. L'objectif sera de fournir un ensemble de tests reproductibles, une ou plusieurs techniques de mitigation adaptées aux contraintes analogiques et une analyse des régimes dans lesquels leur gain de précision justifie leur coût.

Prérequis

Ce stage s'adresse à des personnes intéressées par l'informatique quantique, la simulation numérique et l'analyse statistique de données. Une formation en physique, informatique ou mathématiques est recommandée, avec des bases en mécanique quantique, en algèbre linéaire et en probabilités. Une aisance en programmation, notamment en Python, sera utile. Des connaissances sur les systèmes quantiques ouverts, l'estimation statistique ou le contrôle quantique constitueront un atout ; une connaissance préalable de Pulser n'est pas indispensable.

Le stage est ouvert aux étudiants de niveaux L3 à M2 ; le périmètre sera adapté au niveau et à la durée du stage. Un premier objectif pourra être l'implémentation et la comparaison de méthodes existantes, tandis qu'un stage de M2 pourra approfondir le développement d'une nouvelle variante et l'analyse de ses propriétés statistiques. La poursuite en thèse n'est pas prévue a priori à l'issue du stage, mais pourra être discutée en fonction de son déroulement.

Modalités du stage

Le stage se déroulera principalement au LaBRI (Université de Bordeaux). Il pourra impliquer des échanges avec des collaborateurs à Pasqal.

Un rapport devra être remis et un mini-cours présentant les sources de bruit étudiées, les méthodes et les résultats devra être assuré à l'issue du stage, même si l'école ou l'université d'origine ne l'exige pas. Les développements comprendront des scripts documentés permettant de reproduire les expériences numériques. Le stage s'accompagne d'une gratification d'environ 660 € par mois, montant à confirmer pour 2027 suivant les modalités administratives.

Candidature

Les candidatures sont à adresser à Stéphane Dartois (stephane.dartois@u-bordeaux.fr), en précisant la période de stage envisagée, et en joignant un CV, un relevé de notes ainsi que les noms et adresses électroniques d'une ou deux personnes de référence. Les candidatures sont examinées au fil de l'eau. Un délai d'au moins deux mois est à prévoir pour les démarches administratives préalables au début du stage.

Références

[1] Z. Cai, R. Babbush, S. C. Benjamin, S. Endo, W. J. Huggins, Y. Li, J. R. McClean et T. E. O'Brien. *Quantum error mitigation*. Reviews of Modern Physics, vol. 95, 045005, 2023. `https://arxiv.org/abs/2210.00921`.

[2] Pasqal. *Documentation de Pulser : interactions de Rydberg et modèles de bruit*. `https://docs.pasqal.com/pulser/register/` ; `https://docs.pasqal.com/pulser/noise_model/`.

[3] S. Tibaldi, L. Leclerc, D. Vodola, E. Tignone et E. Ercolessi. *Analog QAOA with Bayesian Optimisation on a neutral atom QPU*, 2025. `https://arxiv.org/abs/2501.16229`.