

Avis de Soutenance

Madame Emily BEATTY

Informatique

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Distance quantiques de Wasserstein et tomographie structurelle des canaux de Pauli et des états de Gibbs

dirigés par Monsieur Guillaume AUBRUN

Soutenance prévue le **jeudi 12 février 2026** à 14h00

Lieu : ENS de Lyon Site Monod, salle des thèses au 46 allée d'Italie à Lyon 7ème

Composition du jury proposé

M. Guillaume AUBRUN	Professeur des universités	Université Lyon 1	Directeur de thèse
M. Giacomo DE PALMA	Professeur	Université de Bologne (Italie)	Rapporteur
M. Daniel STILCK FRANÇA	Professeur associé	Université de Copenhague (Danemark)	Co-encadrant de thèse
M. Ivan GENTIL	Professeur des universités	Université Lyon 1	Examineur
M. Dario TREVISAN	Professeur	Université de Pise (Italie)	Rapporteur
Mme Simone RADEMACHER	Chercheure	Université de Munich (Allemagne)	Examinatrice
Mme Yihui QUEK	Professeure assistante	École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)	Examinatrice
Mme Cécilia LANCIEN	Chargée de recherche	CNRS Grenoble	Examinatrice

Mots-clés : Transport Optimal, Information Quantique, Informatique Quantique, Tomographie quantique, Distances de Wasserstein, Apprentissage structurelle

Résumé :

Une compréhension approfondie du comportement et de l'évolution des états quantiques est essentielle pour la conception et l'utilisation des ordinateurs quantiques. Les principaux domaines à prendre en considération sont la complexité computationnelle, le bruit, ainsi que le stockage, la transmission et la perte de données. Ces deux derniers sont particulièrement importants dans le contexte des ordinateurs quantiques bruyants de l'avenir proche. La théorie classique des probabilités donne un aperçu général de ce comportement grâce à la correspondance naturelle entre les états quantiques et les distributions de probabilité. Cela motive la transposition des outils de la probabilité à la mécanique quantique afin d'approfondir notre compréhension des états quantiques.

L'intrication, la non-commutativité et le non-déterminisme s'avèrent être des obstacles redoutables dans cette tâche. Dans cette thèse, nous quantisons deux outils provenant de la probabilité classique, les deux ayant un goût géométrique, et les deux intéressants dans l'étude du bruit dans les circuits, les ordinateurs, et les canaux quantiques. Le premier de ces outils est la distance p -Wasserstein, qui quantifie le coût du transport d'une mesure de probabilité vers une autre. Si des tentatives récentes ont cherché à étendre cette mesure aux états quantiques, les définitions existantes présentent souvent des limites, telles que le manque de fidélité. Nous présentons une définition des distances p -Wasserstein quantiques, en tirant parti d'une propriété de la version classique : sa détermination de la métrique sous-jacente par la distance entre des masses ponctuelles. Cela intègre des métriques familières à l'information quantique et étend les métriques existantes des états purs aux états mixtes. Nous l'utilisons pour dériver des bornes inférieures de circuits, étudier la complexité des états aléatoires, analyser le bruit des canaux quantiques via des inégalités hypercontractives et affiner une stratégie bien étudiée de l'apprentissage automatique quantique. Le deuxième de ces outils est l'apprentissage de distributions inconnues à partir d'échantillons. Cela est essentiel dans l'étude et l'atténuation du bruit dans les canaux et circuits quantiques, en particulier la tomographie des canaux de Pauli et des états de Gibbs commutatifs. Les travaux existants sur la tomographie des états de Gibbs s'appuient sur la connaissance de la structure d'interaction de l'Hamiltonien. Nous proposons le premier algorithme permettant d'apprendre efficacement la structure d'interaction d'un état de Gibbs quantique en retravaillant un algorithme classique d'apprentissage des canaux de Pauli. Nous apportons des preuves théoriques et numériques solides de son efficacité, analysons et affinons les deux algorithmes en vue d'une mise en œuvre pratique, et proposons diverses expériences numériques pour démontrer leur robustesse face à la mise à l'échelle, à la non-homogénéité de la force des interactions, et aux erreurs de préparation et de mesure des états.

Summary:

A thorough understanding of the behaviour and evolution of quantum states is essential for the design and use of quantum computers. Key areas of consideration are computational complexity, noise, and data storage, transmission, and loss. The latter two are particularly important in the context of noisy near-term quantum devices. Classical probability theory gives broad insight into such behaviour through the natural correspondence between quantum states and probability distributions. This motivates the translation of tools from probability to quantum mechanics to further our understanding of quantum states. Entanglement, non-commutativity, and non-determinism prove to be formidable hurdles in this task. In this thesis we quantise two tools from classical probability, both of a geometric flavour and both of interest in the study of noise in quantum circuits, devices, and channels. The first such tool is the p -Wasserstein distance, which quantifies the cost of transporting one probability measure onto another. While recent attempts have sought to extend this measure to quantum states, existing definitions often present limitations, such as not being faithful. We present a definition of quantum p -Wasserstein distances, leveraging a property of the classical version: its determination of the underlying metric by the distance between point masses. This integrates metrics familiar to quantum information and extends existing metrics from pure to mixed states. We use this to derive quantum circuit lower bounds, study the complexity of random states, analyse quantum channel noise via so-called hypercontractive inequalities, and refine a well-studied quantum machine learning strategy. The second such tool is the learning of unknown distributions from samples. This is central in the study and mitigation of noise in quantum channels and circuits, in particular the learning of Pauli channels and commuting Gibbs states. Existing work in the learning of Gibbs states relies on knowledge of the state's interaction structure. We give the first algorithm to efficiently learn the interaction structure of a quantum Gibbs state by reworking a classical algorithm to learn Pauli channels. We provide strong theoretical and numerical evidence for its success, analyse and refine both algorithms for practical

implementation, and give a variety of numerical experiments for their robustness to scaling, non-homogeneity in interaction strength, and state-preparation-and-measurement errors.