

ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 01



Publication

1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

Titre de l'élément : Continuous-Variable Instantaneous Quantum Computing is Hard to Sample

URL de l'élément : <https://hal.science/hal-01644066>

Fichier de élément : Fichier pdf, PhysRevLett.118.070503 -- Continuous-Variable Instantaneous Quantum Computing is Hard to Sample.pdf

2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

Ce travail [12], publié dans *Physical Review Letters* —la revue de référence en physique après *Nature* et *Science*— a eu un impact assez important (plus de 50 citations malgré son caractère spécialisé). Il est représentatif du travail de l'équipe QI à plusieurs titres :

- ▶ il s'agit d'une collaboration interne entre les trois membres permanents de l'équipe à l'époque —Damian Markham, Eleni Diamanti et Elham Kashefi— et un postdoc —Tom Douce. Les collaborations internes —entre permanents notamment [6–8, 13, 16] — sont au cœur du fonctionnement de l'équipe
- ▶ ce travail est également fait en collaboration avec des collègues extérieurs —en l'occurrence du laboratoire MPQ de l'U. Paris Cité et de l'U. Johannes Gutenberg de Mayence— comme beaucoup de travaux de l'équipe
- ▶ ce travail concerne plusieurs spécialités pour lesquelles l'équipe est reconnue : les variables quantiques continues, les états graphes, le calcul quantique sous-universel, le calcul quantique fondé sur la mesure, l'optique quantique, la prise en compte d'imperfections réalistes en conservant la rigueur de l'analyse
- ▶ ce travail est à la source de plusieurs lignes de recherche au sein de l'équipe, toujours actives aujourd'hui : la calcul quantique —universel [3, 13], ou non [8, 10]— avec des variables continues, la caractérisation de la non-classicalité des variables continues [2, 9]. Ces sujets constituent une part importante des thèses de trois doctorants, Ulysse Chabaud [5], Pierre-Emmanuel Emeriau [14] et Robert Booth [4]. Il est aussi au cœur de la participation de l'équipe à un projet Européen (CLUSTEC) et de deux projets PEPR (EPIQ et NISQ2LSQ) du plan quantique. Ce type de ramification d'un sujet au sein de l'équipe peut s'observer sur plusieurs autres thèmes, comme le calcul délégué, la vérification, les états graphes, etc.

3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT

Cet article démontre la complexité algorithmique de l'optique quantique avec des variables continues et des détecteurs réalistes

Les variables continues (CV) correspondent à des systèmes physiques particuliers, en optique et dans certains systèmes solides, qui, contrairement aux qubits bidimensionnels standard, sont décrits par un espace de Hilbert de dimension infinie. Les systèmes CV sont incroyablement prometteurs pour les technologies quantiques, ayant démontré l'intrication cohérente et contrôlée de dizaines de milliers de systèmes [21], soit plusieurs ordres de grandeur de plus que les technologies concurrentes. Elles sont également naturelles pour l'intégration des technologies quantiques avec les technologies de communication existantes, et sont à l'avant-garde des efforts visant à construire des ordinateurs quantiques universels tolérants aux pannes [1, 20], avec plusieurs startups travaillant à cette fin, notamment Xanadu¹ au Canada et Alice&Bob² en France. Cependant, elles s'accompagnent de défis particuliers, la plupart compliquant les modèles formels de traitement de l'information (par exemple, la discontinuité et les problèmes de convergence propres aux espaces de dimension infinie). Et, bien que leur avenir soit très prometteur, il existe relativement peu de résultats dans cette direction, en particulier en ce qui concerne la complexité de calcul.


1. <https://xanadu.ai>

2. <https://alicebob.com>

Ce travail présente un premier **traitement théorique de la complexité de l'informatique quantique dans CV**. Avant notre travail, les techniques et les propositions existantes se limitaient soit à restreindre la dimension de l'espace et à y intégrer le calcul quantique à variables discrètes (DV) standard [15, 19], soit à des propositions vagues d'universalité [17], inappropriées pour l'analyse de la puissance de calcul au sens de la théorie de complexité. Dans [12], nous donnons pour la première fois une analyse adéquate en théorie de la complexité d'un modèle de calcul en CV et démontrons que **la difficulté de l'échantillonnage en CV** est équivalente à la classe de complexité CV-IQP. En outre, les techniques développées nous ont permis de montrer par la suite que **le calcul quantique universel tolérant aux fautes est possible en CV** en tenant à la fois compte des limites de squeezing et de précision des mesures [8, 13]. Nous avons étendu le flow ([11, 18]) —élément essentiel du cadre formel de l'informatique basée sur la mesure (MBQC)— aux CV, en montrant par exemple que, comme en DV, il existe une séparation en profondeur entre le MBQC et les modèles de circuits de calcul quantique [3, 4].

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Warit Asavanant, Yu Shiozawa, Shota Yokoyama, Baramée Charoensombutamorn, Hiroki Emura, Rafael N Alexander, Shuntaro Takeda, Jun-ichi Yoshikawa, Nicolas C Menicucci, Hidehiro Yonezawa, et al. Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state. *Science*, 366(6463) :373–376, 2019.
- [2] Robert Booth, Ulysse Chabaud, and Pierre-Emmanuel Emeriau. Contextuality and Wigner negativity are equivalent for continuous-variable quantum measurements. *Physical Review Letters*, 129(23) :230401, November 2022. 21 pages + 4 pages of appendices, 1 figure.
- [3] Robert I. Booth and Damian Markham. Flow conditions for continuous variable measurement-based quantum computing. 23 pages + 14 pages of appendices, 5 figures ; fixes minor mistakes, May 2021.
- [4] Robert Ivan Booth. *Measurement-based quantum computation beyond qubits*. Theses, Sorbonne Université, February 2022.
- [5] Ulysse Chabaud. *Continuous variable quantum advantages and applications in quantum optics*. Theses, Sorbonne Université, July 2020.
- [6] Ulysse Chabaud, Eleni Diamanti, Damian Markham, Elham Kashefi, and Antoine Joux. Optimal quantum-programmable projective measurement with linear optics. *Physical Review A : Atomic, molecular, and optical physics*, December 2018. 11 pages, 7 figures.
- [7] Ulysse Chabaud, Tom Douce, Frédéric Grosshans, Elham Kashefi, and Damian Markham. Building trust for continuous variable quantum states. In Steven T. Flammia, editor, *15th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC 2020)*, volume 158 of *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, pages 3 :1–3 :15, Riga, Latvia, June 2020. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik.
- [8] Ulysse Chabaud, Tom Douce, Damian Markham, Peter van Loock, Elham Kashefi, and Giulia Ferrini. Continuous-Variable Sampling from Photon-Added or Photon-Subtracted Squeezed States. *Physical Review A : Atomic, molecular, and optical physics*, December 2017. 11 pages, 6 figures.
- [9] Ulysse Chabaud, Pierre-Emmanuel Emeriau, and Frédéric Grosshans. Witnessing Wigner Negativity. *Quantum*, 5 :471, June 2021.
- [10] Ulysse Chabaud, Giulia Ferrini, Frédéric Grosshans, and Damian Markham. Classical simulation of Gaussian quantum circuits with non-Gaussian input states. *Physical Review Research*, 3(3) :033018, July 2021.
- [11] V. Danos and E. Kashefi. Determinism in the one-way model. *Phys. Rev. A*, 74(052310), 2006.
- [12] Tom Douce, Damian Markham, Elham Kashefi, Eleni Diamanti, Thomas Coudreau, Perola Milman, Peter van Loock, and Giulia Ferrini. Continuous-Variable Instantaneous Quantum Computing is Hard to Sample. *Physical Review Letters*, 118(7), February 2017.
- [13] Tom Douce, Damian Markham, Elham Kashefi, Peter van Loock, and Giulia Ferrini. Probabilistic Fault-Tolerant Universal Quantum Computation and Sampling Problems in Continuous Variables. *Physical Review A*, 99(1), January 2019. Corrected a mistake in v1 concerning squeezing amplification.
- [14] Pierre-Emmanuel Emeriau. *The interplay between quantum contextuality and Wigner negativity*. Theses, Sorbonne Université, November 2021.
- [15] Emanuel Knill, Raymond Laflamme, and Gerald J Milburn. A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *nature*, 409(6816) :46–52, 2001.

- 
- [16] Niraj Kumar, Ulysse Chabaud, Elham Kashefi, Damian Markham, and Eleni Diamanti. Optimal quantum-programmable projective measurements with coherent states. *Physical Review Research*, 3(4) :043035, October 2021.
 - [17] Seth Lloyd and Samuel L Braunstein. Quantum computation over continuous variables. In *Quantum information with continuous variables*, pages 9–17. Springer, 1999.
 - [18] Damian Markham and Elham Kashefi. Entanglement, flow and classical simulatability in measurement based quantum computation. In *Horizons of the Mind. A Tribute to Prakash Panangaden*, pages 427–453. Springer, 2014.
 - [19] Nicolas C Menicucci. Fault-tolerant measurement-based quantum computing with continuous-variable cluster states. *Physical review letters*, 112(12) :120504, 2014.
 - [20] Olivier Pfister. Continuous-variable quantum computing in the quantum optical frequency comb. *Journal of Physics B : Atomic, Molecular and Optical Physics*, 53(1) :012001, 2019.
 - [21] Shota Yokoyama, Ryuji Ukai, Seiji C Armstrong, Chanond Sornphiphatphong, Toshiyuki Kaji, Shigenari Suzuki, Jun-ichi Yoshikawa, Hidehiro Yonezawa, Nicolas C Menicucci, and Akira Furusawa. Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain. *Nature Photonics*, 7(12) :982–986, 2013.