

Faculté des sciences  
Université de Sherbrooke

*Les applications du calcul analogique (minute paper)*

par  
Antoine Carrier

Remis à  
Tania Belabbas

Dans le cadre de l'activité pédagogique  
BSQ201

Campus principal  
September 8, 2025

Les appareils quantiques à atomes de Rydberg sont une forme d'ordinateurs quantiques pouvant être utilisés à la fois pour le calcul digital et pour le calcul analogique [5]. Cependant, c'est leur utilisation en tant que calculateur analogique qui est souvent prônée du fait que le calcul est alors moins sujet aux erreurs [5]. Cette particularité rendrait ces appareils fiables dans des régimes au-delà de ceux possibles pour les ordinateurs classiques, en faisant de bons candidats dans la course à l'avantage quantique.

Deux classes de problèmes résolus par les calculateurs analogiques à atomes de Rydberg sont souvent mises de l'avant: les problèmes d'optimisation sur graphes et la simulation de modèles physiques. L'avantage de ces calculateurs dans la première catégorie vient de la forme des interactions entre les atomes qui les constituent, qui leur permet de reproduire la matrice d'adjacence d'un graphe nativement [3]. Dans ces appareils, les qubits peuvent être configurés dans des structures 1D, 2D ou 3D arbitraires [5] et le blocage de Rydberg permet d'encoder et de simuler des interactions entre nœuds d'un graphe pesé décrites par un Hamiltonien habituel de problème QUBO [3]. Le calcul analogique avec les atomes de Rydberg pourrait donc être un bon candidat à la résolution efficace de problèmes d'optimisation sur graphes, ou à l'exécution d'algorithmes à base de graphes, deux avenues activement explorées par la compagnie Pasqal, qui publie des résultats de tels algorithmes employés à des problèmes dans les domaines de la finance et de la santé [5, 4, 1]. Malgré la frénésie que génère la course à l'avantage quantique en algorithmique, c'est peut-être plutôt la seconde catégorie d'applications de ce type d'ordinateur qui interpelle le physicien, car elle lui est utile dès à présent.

De la même façon qu'ils peuvent modéliser des matrices d'adjacence arbitraires en trois dimensions, les ordinateurs à atomes de Rydberg peuvent servir à construire des configurations arbitraires d'objets quantiques pour la simulation de modèles de physique à  $N$  corps [5, 2]. De telles simulations sont notoirement difficiles à réaliser sur un ordinateur classique étant donné la taille de l'espace d'Hilbert et elles nécessitent beaucoup plus d'opérations sur un ordinateur quantique digital que ce qui est requis d'un calculateur analogique pour le même taux d'erreurs [5]. Par exemple, dans l'étude de systèmes simples comme le modèle d'Ising quantique, là où la simulation sur un ordinateur classique usuel serait limitée par la mémoire à une trentaine d'objets (e.g. des spins), il est possible de simuler des matériaux en deux dimensions dont le nombre de composants est d'un ordre de grandeur supérieur [2]. Au-delà de ces modèles simples, les ordinateurs à atomes de Rydberg permettent de simuler des systèmes physiques à  $N$  corps aux comportements bien plus exotiques, comme le modèle PXP qui présente le phénomène de *scarred states* (ou états cicatrisés), des états propres brisant l'ergodicité [6]. Le propre de ces ordinateurs analogiques est donc la possibilité de servir de support expérimental configurable pour le physicien ayant atteint la limite de ce que lui permet la simulation classique dans l'étude de la dynamique des phénomènes quantiques à  $N$  corps et dans l'attente de découvrir ce que pourra lui offrir l'ordinateur quantique digital tolérant aux fautes.

## References

- [1] Boris Albrecht et al. “Quantum Feature Maps for Graph Machine Learning on a Neutral Atom Quantum Processor”. In: *Physical Review A* 107.4 (Apr. 2023). arXiv:2211.16337 [quant-ph], p. 042615. ISSN: 2469-9926, 2469-9934. DOI: 10.1103/PhysRevA.107.042615. URL: <http://arxiv.org/abs/2211.16337> (visited on 09/07/2025).
- [2] Shovan Kanti Barik et al. “Quantum technologies with Rydberg atoms”. In: *Frontiers in Quantum Science and Technology* 3 (July 2024), p. 1426216. ISSN: 2813-2181. DOI: 10.3389/frqst.2024.1426216. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frqst.2024.1426216/full> (visited on 09/05/2025).
- [3] Lucas Leclerc. “Quantum computing with Rydberg atoms : control and modelling for quantum simulation and practical algorithms”. English. PhD thesis. Université Paris-Saclay, Sept. 2024. URL: <https://ube.hal.science/I0GS-THESE/tel-04745992v1>.
- [4] Lucas Leclerc et al. *Financial Risk Management on a Neutral Atom Quantum Processor*. arXiv:2212.03223 [quant-ph]. Apr. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2212.03223. URL: <http://arxiv.org/abs/2212.03223> (visited on 09/07/2025).
- [5] Pasqal. *The Analog Neutral Atom Advantage Over Digital Quantum Computing in the Noisy Qubits’ Era*. English. Nov. 2023. URL: <https://www.pasqal.com/blog/the-analog-neutral-atom-advantage-in-the-noisy-qubits-era/>.
- [6] Martin Schnee, Roya Radgohar, and Stefanos Kourtis. *Unconventional early-time relaxation in the Rydberg chain*. arXiv:2406.12968 [cond-mat]. May 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2406.12968. URL: <http://arxiv.org/abs/2406.12968> (visited on 09/05/2025).