

# Applied QML

*Lecture 10: Quantum Annealing vs Quantum Digital*

Christophe Pere

2024-03-21

# Table des matières

Digital versus Adiabatique

Quantum Annealing

Quantum Analog

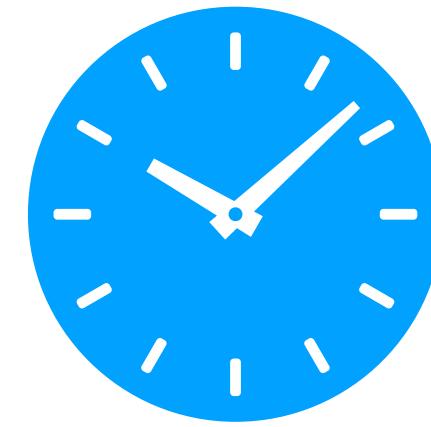
Atomes neutres

Adiabatique

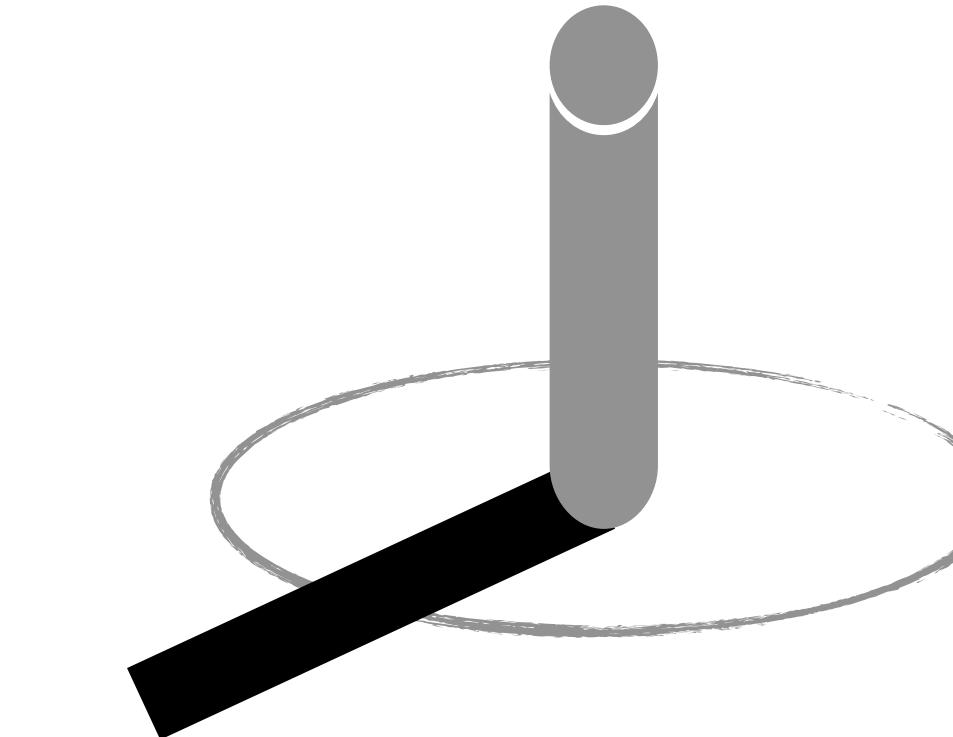
# Introduction

---

Digital QC



Adiabatique QC



# Introduction

Digital QC

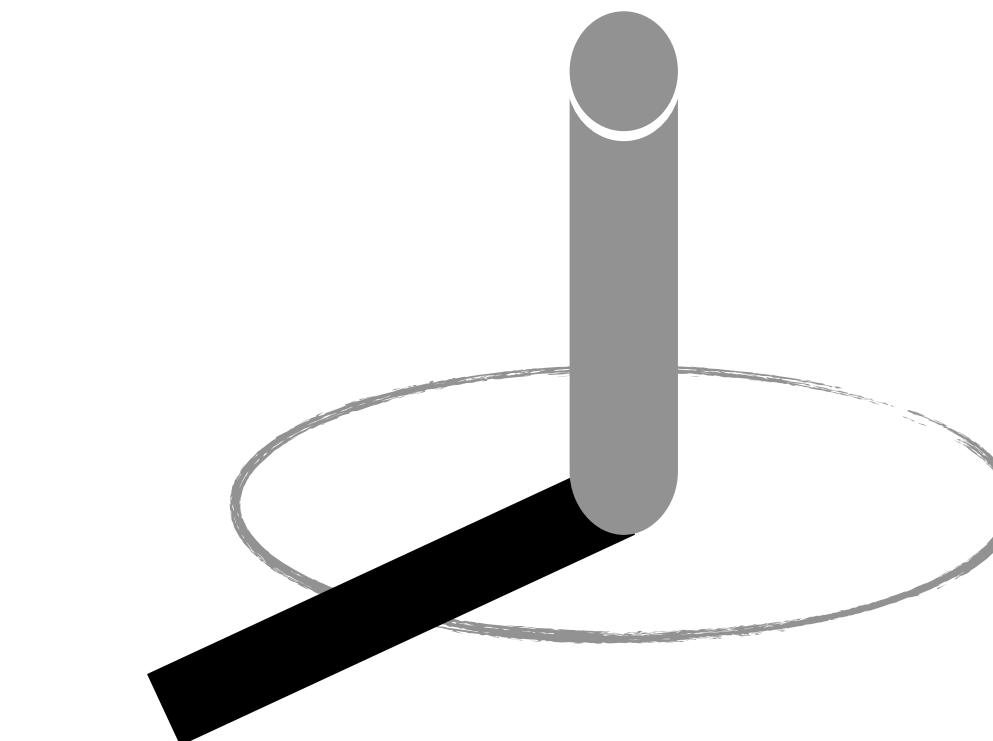
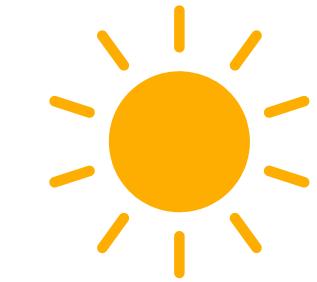


Étapes séquentielles ou discrètes

Portes logiques



Adiabatique QC



Transformations continues

Hamiltonien  $H(t)$

$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle$$

Dépendant du temps

Idée de l'évolution adiabatique

# Adiabatique

Adiabatique QC

Départ

Évolution contrôlée

Perturbations sans atteindre  
un état excité

Arrivée

# Adiabatique

Adiabatique QC

Départ

Arrivée

Évolution contrôlée

Perturbations sans atteindre  
un état excité

Hamiltonien  $H_0$  pour lequel on connaît  
le niveau d'énergie le plus bas

Forme simple dont on peut préparer l'état  
sur un ordi

# Adiabatique

Adiabatique QC

Départ

Hamiltonien  $H_0$  pour lequel on connaît  
le niveau d'énergie le plus bas

Forme simple dont on peut préparer l'état  
sur un ordi

$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

Évolution contrôlée  
Perturbations sans atteindre  
un état excité

Arrivée

Hamiltonien  $H_1$  plus complexe pour lequel  
on a le niveau d'énergie le plus bas et qui  
répond au problème

# Adiabatique

Adiabatique QC

Départ

Évolution contrôlée

Arrivée

Perturbations sans atteindre  
un état excité

Hamiltonien  $H_0$  pour lequel on connaît  
le niveau d'énergie le plus bas

Forme simple dont on peut préparer l'état  
sur un ordi

$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

Proportionnel  $\frac{1}{\text{spectral gap}^2}$

Doit être très lent

Théorème adiabatique

Hamiltonien  $H_1$  plus complexe pour lequel  
on a le niveau d'énergie le plus bas et qui  
répond au problème

1er état excité

Gap Spectral

Ground state

Annealing

# Annealing

---

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

# Annealing

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

Problèmes spécifiques

# Annealing

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

Problèmes spécifiques

$$H_1 = - \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - \sum_j h_j Z_j$$

Restrictions  
Hamiltonien cible

$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

# Annealing

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

Problèmes spécifiques

$$H_1 = - \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - \sum_j h_j Z_j$$

Restrictions  
Hamiltonien cible

$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

Il est commun que  $H_0$  soit fixé comme  $H_0 = - \sum_{j=0}^{n-1} X_j$

Souvenirs du QAOA

# Annealing

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

Problèmes spécifiques

$$H_1 = - \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - \sum_j h_j Z_j$$

Restrictions  
Hamiltonien cible

$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

Il est commun que  $H_0$  soit fixé comme  $H_0 = - \sum_{j=0}^{n-1} X_j$

$$\otimes_{i=0}^{n-1} |+\rangle$$

Ground state

Souvenirs du QAOA

# Annealing

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

Problèmes spécifiques

$$H_1 = - \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - \sum_j h_j Z_j$$

Restrictions  
Hamiltonien cible

$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

"Quantum Annealers"  
sont "faciles" à construire  
et peuvent être de taille  
importante

Il est commun que  $H_0$  soit fixé comme  $H_0 = - \sum_{j=0}^{n-1} X_j$

$$\otimes_{i=0}^{n-1} |+\rangle$$

Ground state

# Annealing

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

Problèmes spécifiques

$$H_1 = - \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - \sum_j h_j Z_j$$

Restrictions  
Hamiltonien cible

$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

"Quantum Annealers"  
sont "faciles" à construire  
et peuvent être de taille  
importante

Hamiltonien en Annealing:

$$H(t) = - A(t) \sum_{j=0}^{n-1} X_j - B(t) \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - B(t) \sum_j h_j Z_j$$

$$\begin{aligned} A(0) &= B(T) = 1 \\ A(T) &= B(0) = 0 \end{aligned}$$

Il est commun que  $H_0$  soit fixé comme  $H_0 = - \sum_{j=0}^{n-1} X_j$

$$\otimes_{i=0}^{n-1} |+\rangle$$

Ground state

# Annealing

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

Problèmes spécifiques

$$H_1 = - \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - \sum_j h_j Z_j$$

Restrictions

$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

On ne peut garantir l'évolution adiabatique:

- Le temps d'évolution peut-être trop long
- Calculer le gap spectral entre l'état fondamental et le premier état excité peut être plus coûteux que le temps de calcul adiabatique.

Il est commun que  $H_0$  soit fixé comme  $H_0 = - \sum_{j=0}^{n-1} X_j$

Hamiltonien en Annealing:

$$H(t) = -A(t) \sum_{j=0}^{n-1} X_j - B(t) \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - B(t) \sum_j h_j Z_j$$

$$\begin{aligned} A(0) &= B(T) = 1 \\ A(T) &= B(0) = 0 \end{aligned}$$

$$\otimes_{i=0}^{n-1} |+\rangle$$

Ground state

# Annealing

Quantum Annealing

version spécifique de calcul adiabatique

Non universel

Problèmes spécifiques

$$H_1 = - \sum_{j,k} J_{j,k} Z_j Z_k - \sum_j h_j Z_j$$

Restrictions

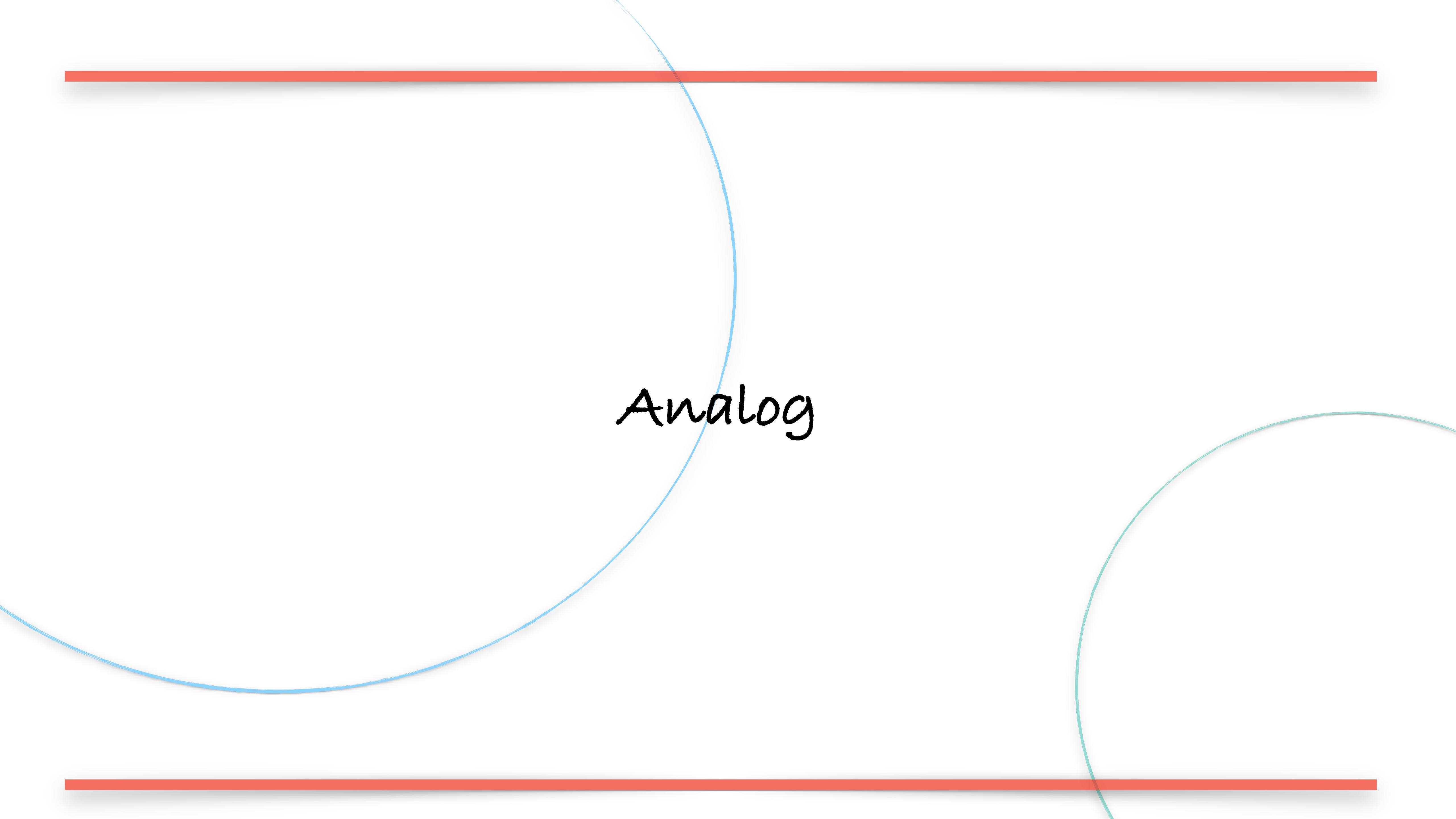
$$H(t) = A(t)H_0 + B(t)H_1$$

On ne peut garantir l'évolution adiabatique:

- Le temps d'évolution peut-être trop long
- Calculer le gap spectral entre l'état fondamental et le premier état excité peut être plus coûteux que le temps de calcul adiabatique.

Il est commun que  $H_0$  soit fixé comme  $H_0 = - \sum_{j=0}^{n-1} X_j$

Le temps de calcul est inférieur au temps adiabatique  
On espère que cela suffise à obtenir de bonnes approximations



Analog

# Analog

---



# Analog

---

Transformations continues  
Évolution adiabatique

Annealer

Supra

Atomes neutres

Analog Mode

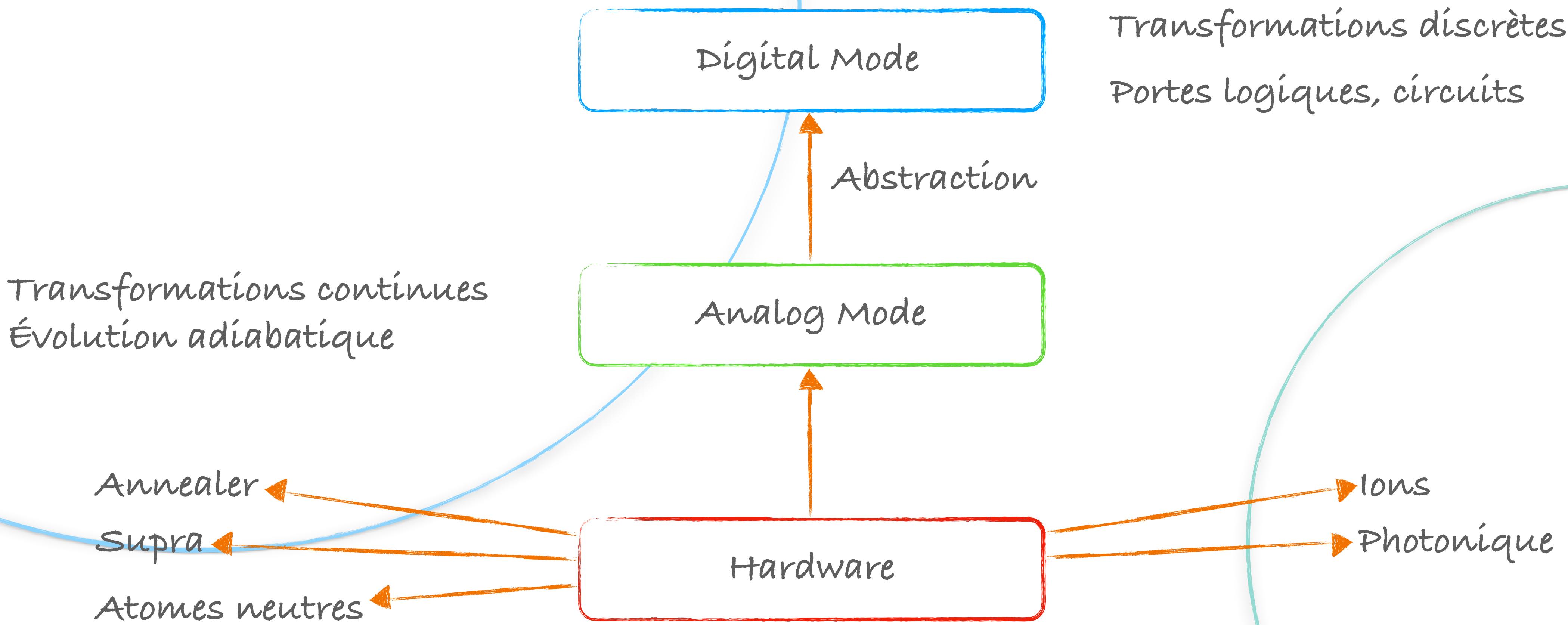
Hardware

Ions

Photonique

# Analog

---



Neutral Atoms

# Neutral Atoms

Company	QC Modality	Note/Comment
 PASQAL	Analog	324 qubit processor gaining increasing commercial success but not yet generally available
 IQuEra	Analog	256 qubit machine publicly accessible via Bracket
 planqc	Analog	Early-stage spin-out from Max Planck Institute; access to their machine not yet available
 atom computing	Digital/Gate Based	100 qubit processor not yet generally available, but select beta customers utilizing
 Infleqtion	Digital/Gate Based	100 qubit processor not yet generally available, but select beta customers utilizing

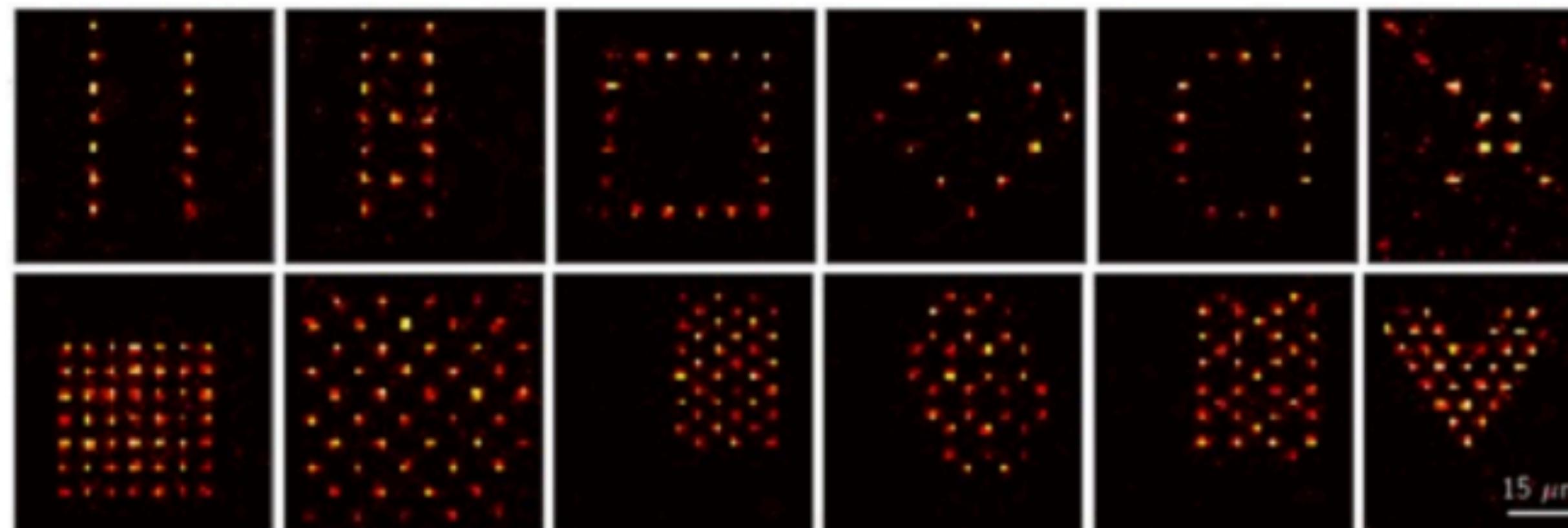
A tweezer array with 6100 highly coherent atomic qubits

Hannah J. Manetsch,\* Gyohei Nomura,\* Elic Bataille,\* Kon H. Leung, Xudong Lv, and Manuel Endres†  
*California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA*

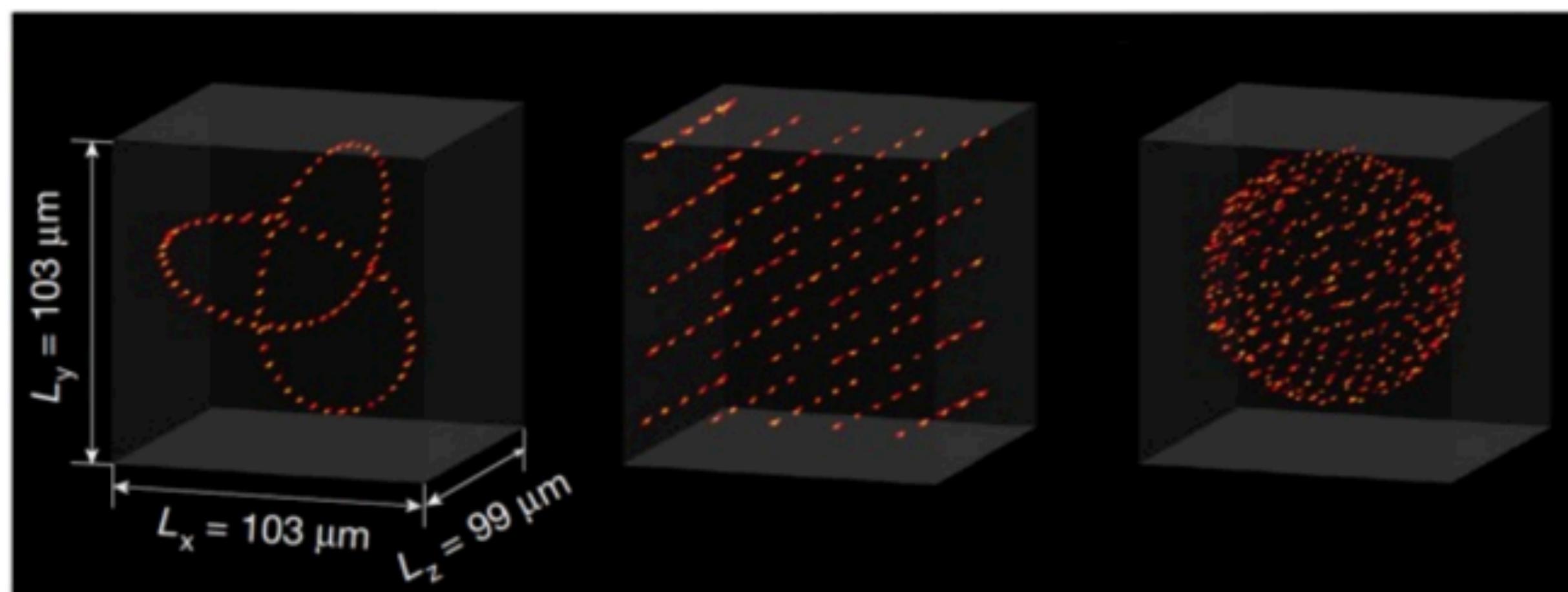
19 Mars 2024

# Neutral Atoms

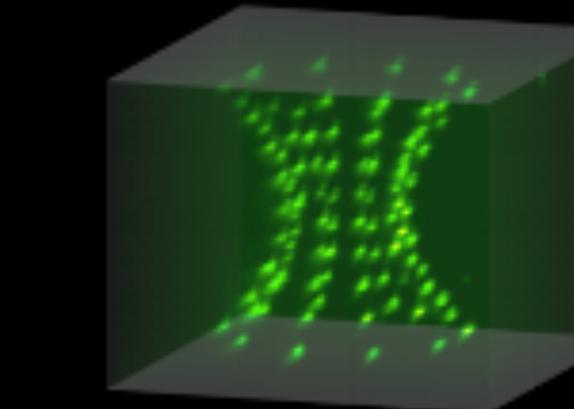
2D



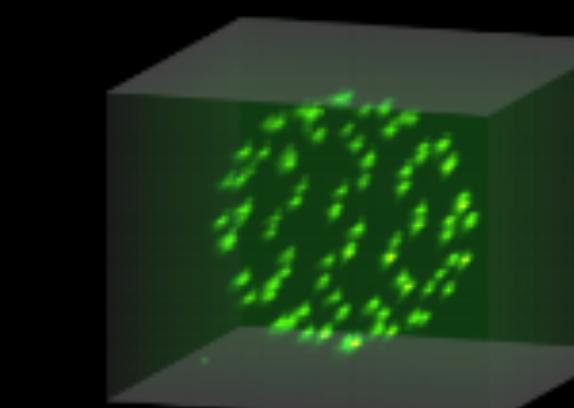
3D



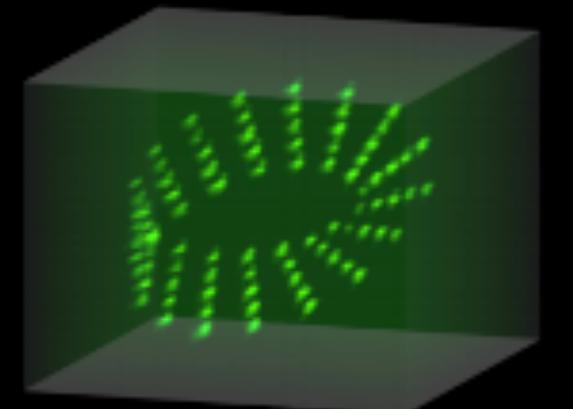
a Hyperboloid (90 sites)



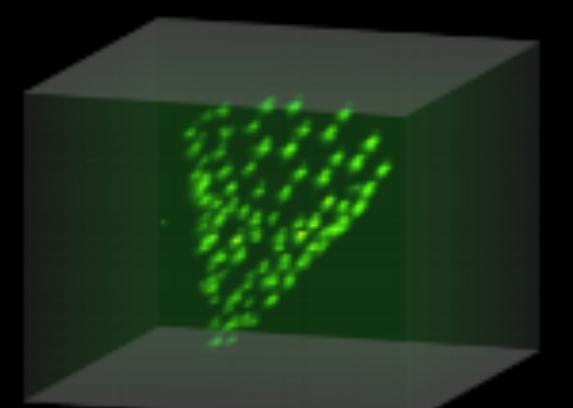
c  $\text{C}_{84}$  fullerene-like (84 sites)



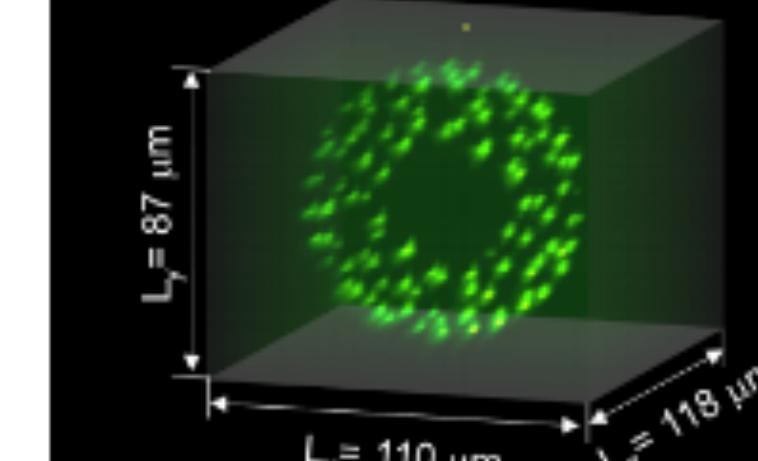
b Möbius strip (85 sites)



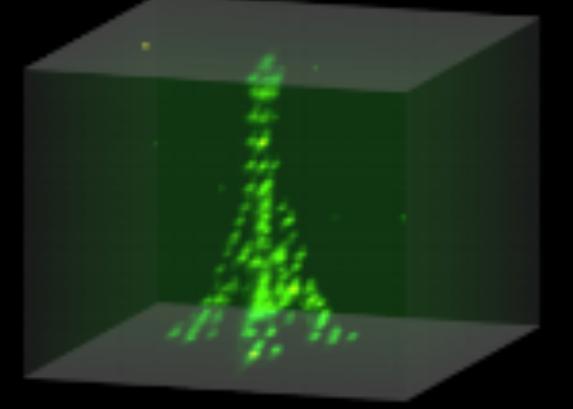
d Cone (100 sites)



e Torus (120 sites)



f Eiffel tower (126 sites)



# Neutral Atoms

---

## Avantages

- Long temps de cohérence ( $>40$  sec en 2022)
- Forte connectivité (la structure peut être créée)
- Mise à l'échelle (atomes réels donc chaque atome est identique)
- La cryogénie externe n'est pas nécessaire
- Moins de câbles (interaction faite par des lasers en "free-space")
- Peuvent être utilisés en Analog ou Digital mode (ou les deux)
- Plus de 30 ans de recherche

# Références

- [1] Combarro E. F. & González-Castillo S., 2023, A Practical Guide to Quantum Machine Learning and Quantum Optimization, Chapter 4
- [2] Henriet et al., 2020, QUANTUM COMPUTING WITH NEUTRAL ATOMS, Quantum-Journal, <https://arxiv.org/pdf/2006.12326.pdf>
- [3] De Castro & Henriet, 2023, The Analog Neutral Atom Advantage Over Digital Quantum Computing in the Noisy Qubits' Era <https://www.pasqal.com/articles/the-analog-neutral-atom-advantage-over-digital-quantum-computing-in-noisy-qubits-era>
- [4] Wintersperger et al., 2023, Neutral Atom Quantum Computing Hardware: Performance and End-user Perspective, <https://arxiv.org/pdf/2304.14360.pdf>
- [5] Ballon, 2023, Neutral-atom quantum computers, [https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial\\_neutral\\_atoms/](https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_neutral_atoms/)
- [6] Killoran, 2020, Quantum computation with neutral atoms, [https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial\\_pasqal/](https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_pasqal/)
- [7] Henriet, 2022, Why Analog Neutral Atoms Quantum Computing Is A Promising Direction For Early Quantum Advantage, <https://thequantuminsider.com/2022/06/28/why-analog-neutral-atoms-quantum-computing-is-a-promising-direction-for-early-quantum-advantage/>
- [8] Rajak et al., 2023, Quantum Annealing: An Overview, <https://arxiv.org/pdf/2207.01827.pdf>
- [9] Barredo et al., 2017, Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom, <https://arxiv.org/abs/1712.02727>

# Références

---

- [1] Combarro E. F. & González-Castillo S., 2023, A Practical Guide to Quantum Machine Learning and Quantum Optimization, Chapter 4
- [2] Fein, 2023, Quantum Computing with Neutral Atoms, <https://medium.com/@russfein/quantum-computing-with-atoms-12db614e7319>
- [3] Manetsch et al., 2024, A tweezer array with 6100 highly coherent atomic qubits, <https://arxiv.org/pdf/2403.12021.pdf>