

CALCUL QUANTIQUE

INTERVENANTS :

Julien ZYLBERMAN – CERFACS
Clément HINDERER - CNES

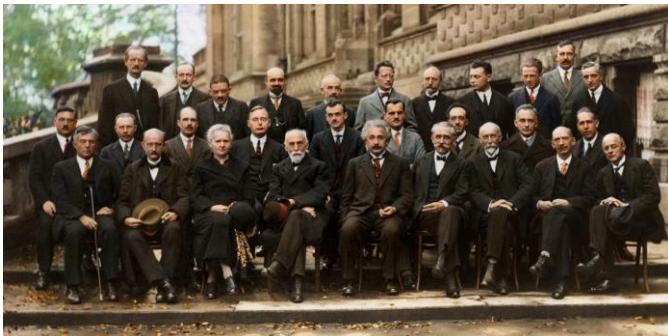
CALCUL QUANTIQUE

Technologies quantiques appliquées au
secteur spatial

Clément Hinderer (CNES) & Julien Zylberman (CERFACS)

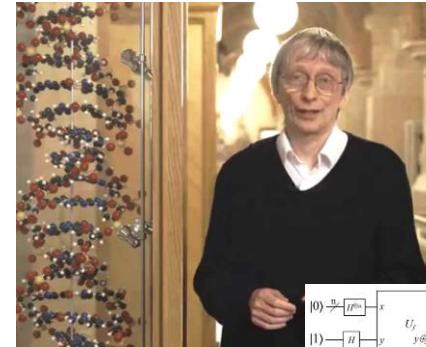
17 DÉCEMBRE 2025

#CONTEXTE HISTORIQUE



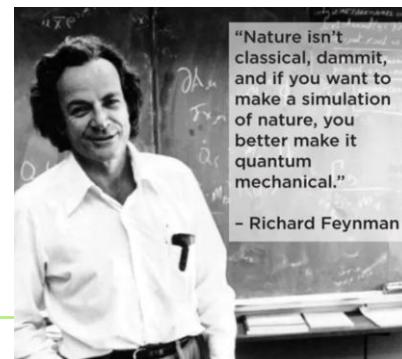
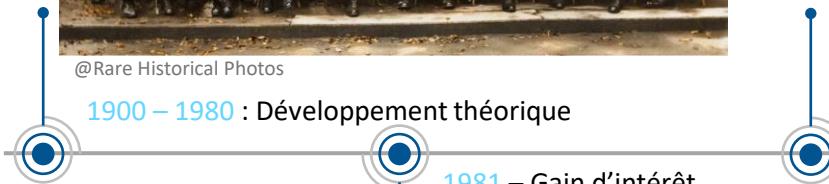
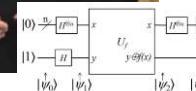
@Rare Historical Photos

1900 – 1980 : Développement théorique



@Historyofinformation.com

1985 – Deutsch et l'ordinateur quantique universel



@Rutgers Physics

“Nature isn’t classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you better make it quantum mechanical.”

- Richard Feynman

1992 - 2009 - Développement des premiers Algorithmes quantiques

- Algorithme de Deutsch-Josza (1992)
- Algorithme de Shor (1994) : factorisation
- Algorithme de Grover (1996) : recherche
- Algorithme HHL (2009) : solveur linéaire

#QUBIT

Le Qubit : l'unité de stockage d'information quantique
3 propriétés

Superposition

Une unité d'information quantique n'est pas soit 0 ou 1
mais une superposition entre l'état 0 et 1.

Comme pour le bit classique, quand on le mesure, il « s'écrase » vers 0 ou 1

Intrication

Deux qubits (ou plus) peuvent être intriqués, c'est-à-dire qu'une modification d'un qubit entraîne la modification d'un autre qubit

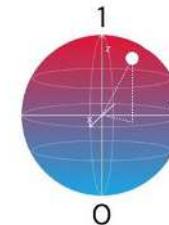
Interférence

L'interférence quantique se produit lorsque les états de superposition de qubits interfèrent les uns avec les autres, renforçant ou annulant certaines probabilités. Cela permet d'amplifier les solutions correctes à un problème tout en annulant les solutions incorrectes, rendant certains algorithmes quantiques très puissants par rapport à leurs équivalents classiques.

Bit



Qubit



If a is red then b must be blue



If a is blue then b must be red



Constructive



Destructive

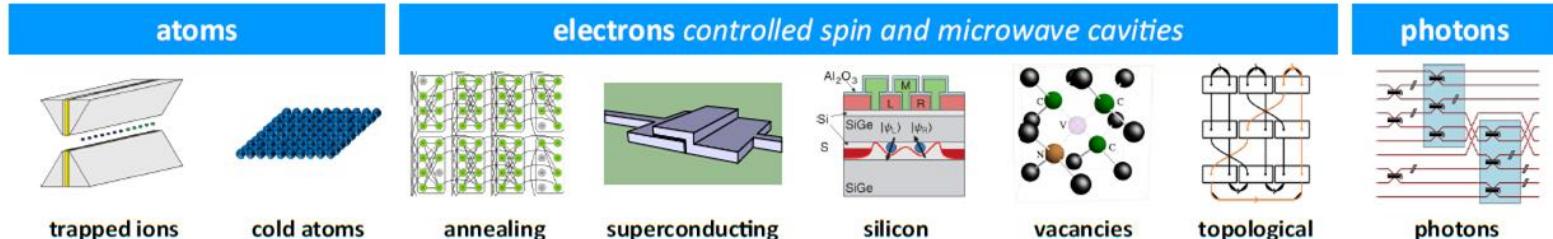


Avec un prix : la décohérence

#HARDWARE

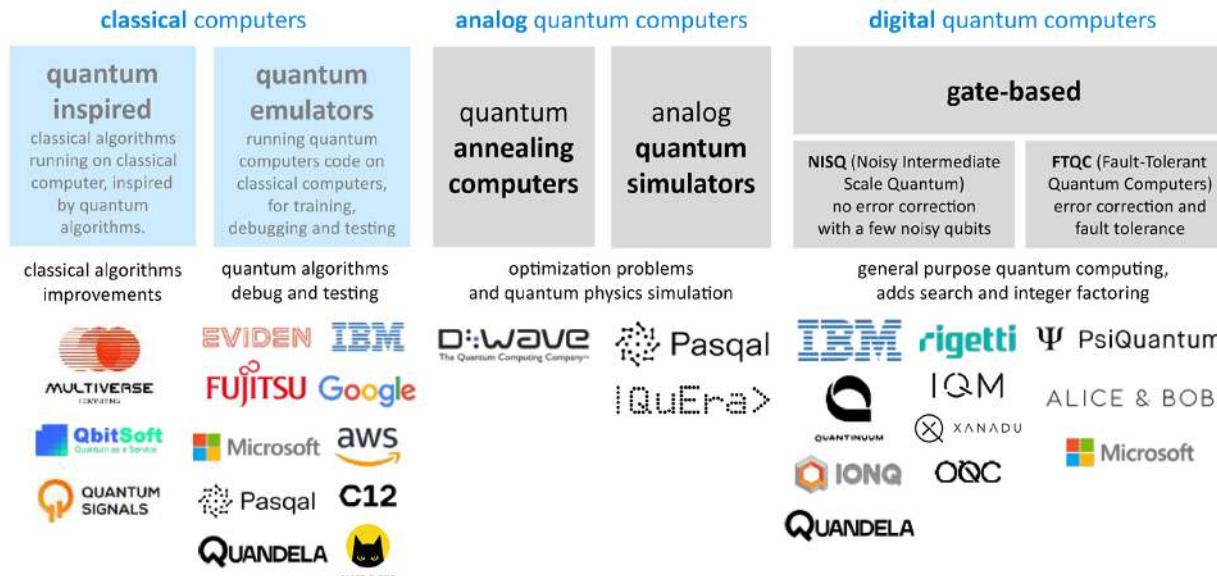
CALCUL QUANTIQUE
SÉMINAIRE QUANTIQUE &
SPATIAL

Les technologies
pour créer des
qubits



@Olivier Ezratty

Les
ordinateurs
quantiques



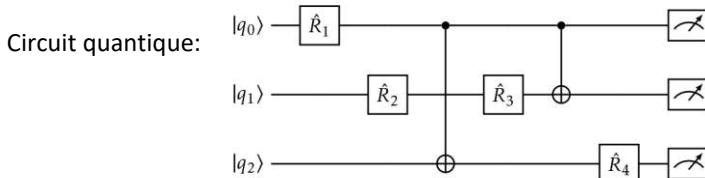
#Calcul quantique: digital versus analogique

Calcul quantique digital:

→ Implémentation d'unitaires sur des qubits

vecteur n-qubit : $|\psi\rangle = \sum_{x=1}^{2^n} \psi_x |x\rangle = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_{2^n} \end{pmatrix}$, $\sum_{x=1}^{2^n} |\psi_x|^2 = 1$

Porte	Représentation matricielle	Symbole
NOT	$\hat{X} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	
Rotation	$\hat{R}_x(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & i \sin(\theta/2) \\ i \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{pmatrix}$	
CNOT	$c(\hat{X}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	



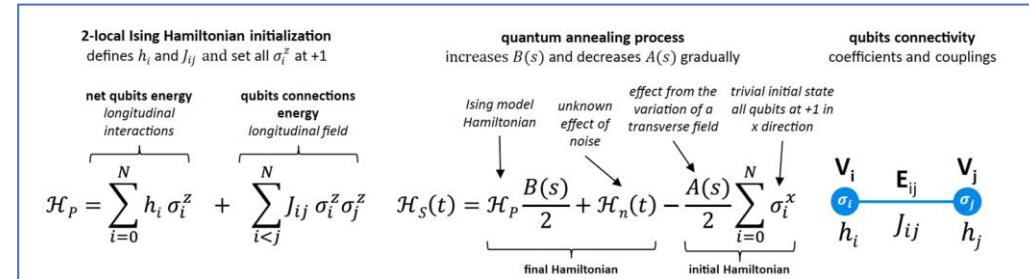
Calcul quantique analogique:

Problème d'optimisation

→ Mapping vers un Hamiltonian d'Ising

→ Recuit quantique

→ Théorème adiabatique



Classe de problèmes: QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization)

#ALGORITHMES QUANTIQUES

Algorithme de Shor

- **FTQC : Calcul quantique tolérant aux fautes (Fault-Tolerant Quantum Computing)**
 - **QPE** : Estimation de phase quantique
 - **QFT** : Transformée de Fourier quantique
 - **QLSA** : Algorithme quantique de résolution de systèmes linéaires
- **NISQ : Algorithmes / calcul quantique à échelle intermédiaire bruitée (Noisy Intermediate-Scale Quantum computing)**
 - **VQE** : Solveur quantique variationnel de valeurs propres
- **Analog:**
 - **QUBO** : Optimisation binaire quadratique non contrainte (Quadratic Unconstrained Binary Optimization)
 - Équivalent à l'optimisation d'un Hamiltonien d'Ising

FTQC
QPE & QFT based

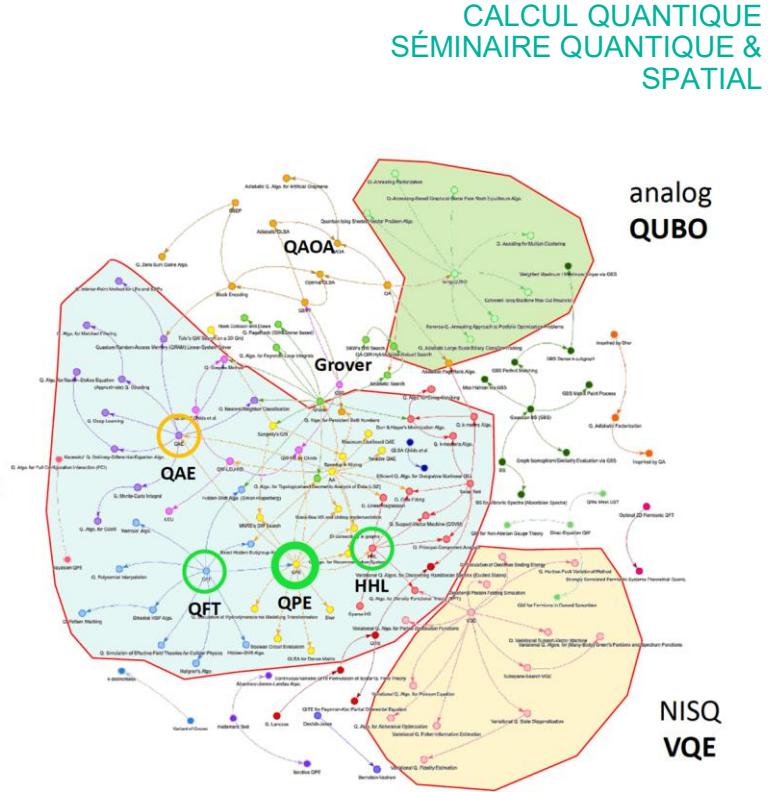


Figure 803: A classification of the main quantum algorithms classes with an overview of the three main buckets: analog algorithms (QUBO), NISQ algorithms (VQE/VQA based) and FTQC algorithms mostly all dependent on the QPE. Source: [4764]. With additions from Olivier Ezratty, January 2025.

#Simulations de phénomènes physiques

Calcul haute performance (HPC)

→ Avancées majeures dans la modélisation de phénomènes physiques complexes

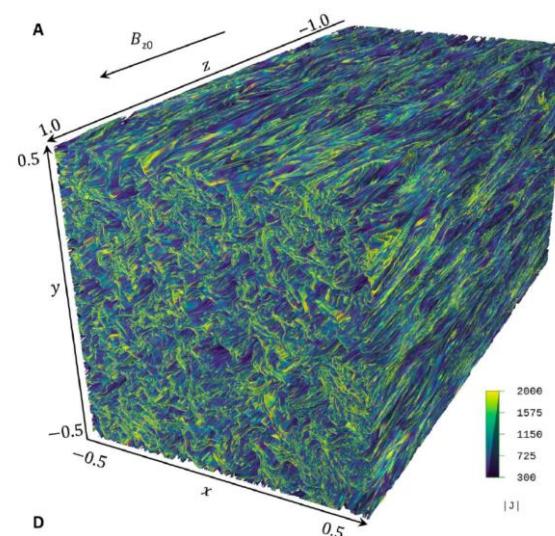
(par ex. fluides turbulents, plasmas, matériaux fortement corrélés)

→ Nombreuses applications industrielles

(énergie, aéronautique et spatial, défense, finance, science des matériaux, industrie pharmaceutique, ...)

Extrêmement difficile — parfois impossible :

- Grande dimensionnalité
- Phénomènes multi-échelles en temps et en espace
- Turbulence
- Chaos



Dong *et al.*, Sci. Adv. 2022

#Simulations de phénomènes physiques

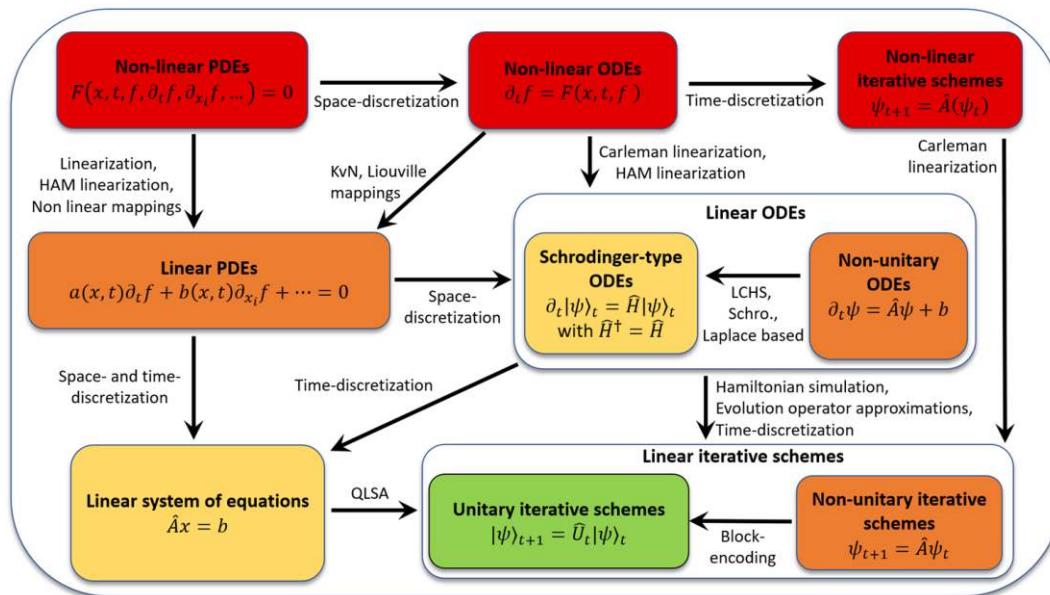
Équations différentielles → outils pour modéliser les phénomènes physiques

Les portes quantiques sont linéaires et unitaires.

- **Problèmes non linéaires** → linéarisation ou mapping non-linéaires.
- **Opérations non unitaires** → *block-encoding*.

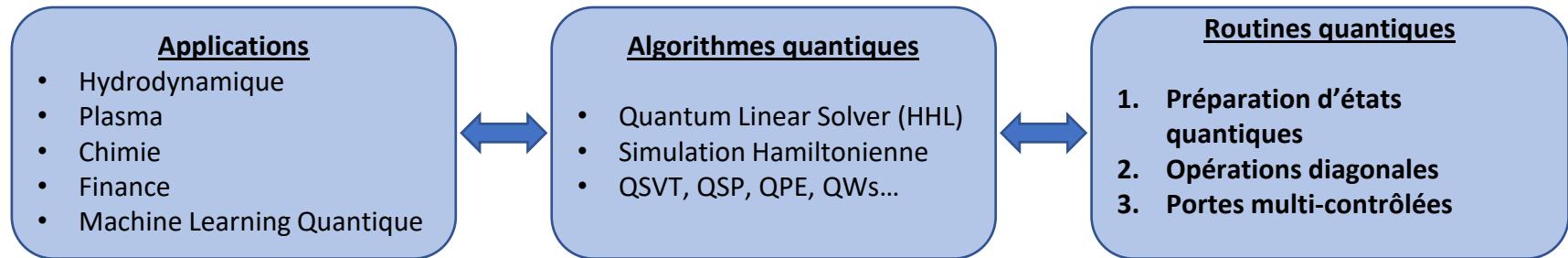
Deux stratégies :

- Mapper le problème sur un **système linéaire d'équations** à inverser.
- Mapper le problème sur une **équation différentielle ordinaire (EDO)** de type **Schrödinger**.



Oracles quantiques et routines quantiques

#Routines quantiques



1. Préparation d'états quantiques

- Comment préparer $|f\rangle = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{2^n} \end{pmatrix}$ depuis $|0\rangle^{\otimes n} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$?

2. Opérations diagonales unitaires

- Comment implémenter $e^{i\hat{f}} = \begin{pmatrix} e^{if_1} & & & \\ & \ddots & & \\ & & e^{if_{2^n}} & \end{pmatrix}$?

Défi: Les méthodes exactes nécessitent $O(2^n)$ portes quantiques.

- En physique, f n'est pas complètement aléatoire.
 - Exploiter les régularités de f
 - Utiliser des développements en série: Walsh, Fourier, polynomiales, ...

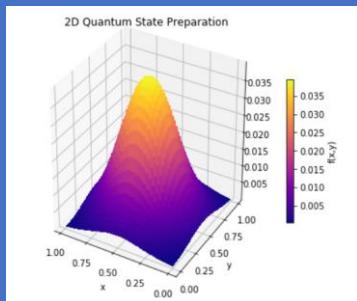
J.Z et F.D., Phys. Rev. A 109, 042401, 2024 → Premier protocole d'implémentation d'états quantiques avec une profondeur de circuit indépendante de n .

J.Z. et al. ACM Transactions on Quantum Computing, 2025 → Premiers circuits quantiques pour paralléliser et approximer des opérateurs diagonaux

#Schéma numérique quantique

1) Préparation d'états quantiques

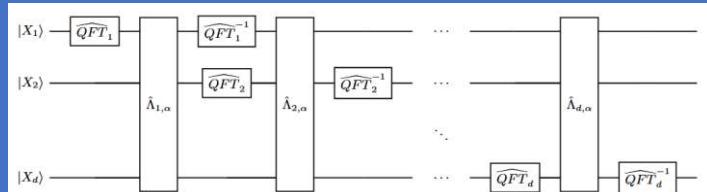
$$f_0 \rightarrow |f_0\rangle = \frac{1}{||f_0||} \sum_{\vec{x}} f_0(\vec{x}) |\vec{x}\rangle$$



J.Z & Fabrice Debbasch, *Efficient QSP with Walsh Series*, Phys. Rev. A 109, 042401 (2024)

2) Evolution/Inversion

$$|f_0\rangle \rightarrow |f\rangle_T$$



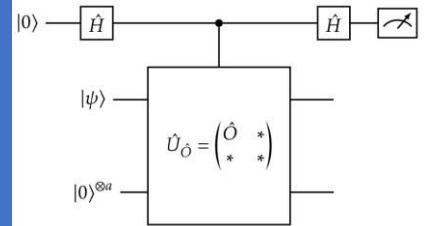
J.Z et al. (2025). Trotter-based quantum algorithm for solving transport equations with exponentially fewer time-steps.
arXiv:2508.15691.

3) Mesure d'observables d'intérêt

$$|f\rangle_T \rightarrow \langle f | \hat{O} | f \rangle_T$$

\hat{O} peut être construite pour correspondre à des quantités d'intérêt comme un moment fluide, un flux,...

Hadamard test, Swap test, Quantum amplitude estimation



#Quantum computing for non-linear problems

PHYSICAL REVIEW RESEARCH 7, 013036 (2025)

Potential quantum advantage for simulation of fluid dynamics

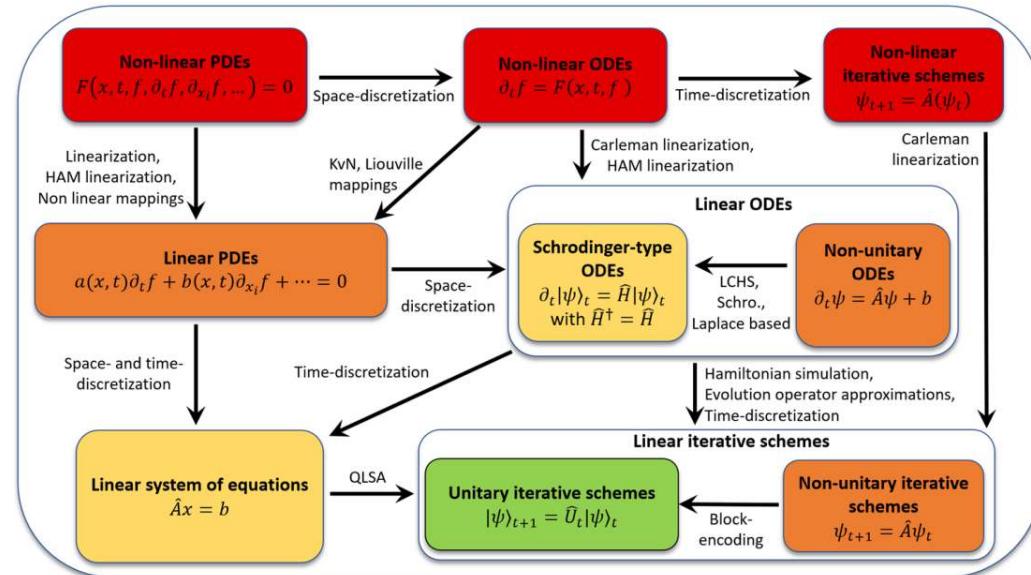
Xiangyu Li^{1,*}, Xiaolong Yin^{2,3}, Nathan Wiebe^{4,1,5}, Jaehun Chun^{1,6}, Gregory K. Schenter¹, Margaret S. Cheung^{1,7}, and Johannes Mülmenstädt^{1,†}

An end-to-end quantum algorithm for nonlinear fluid dynamics with bounded quantum advantage

David Jennings¹, Kamil Korzekwa^{*1}, Matteo Lostaglio¹, Richard Ashworth², Emanuele Marsili², and Stephen Rolston²

¹PsiQuantum, 700 Hansen Way, Palo Alto, CA 94304, USA

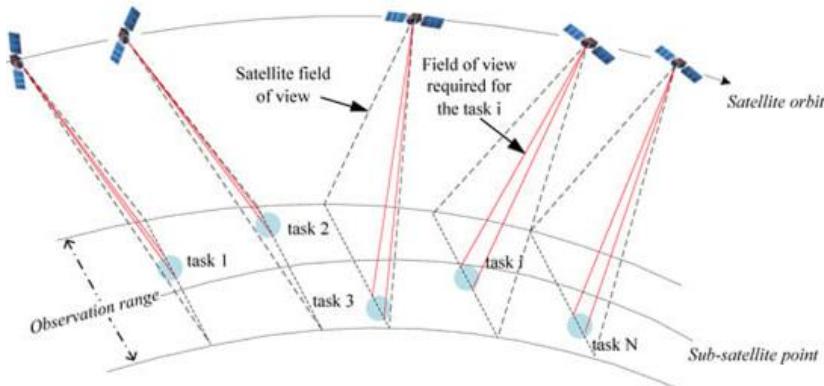
²Airbus Operations Ltd, Pegasus House Aerospace Avenue, Filton, Bristol, UK



#Problèmes de planification en sciences spatiales

- satellite d'observation de la Terre
- trajectoires du "deep space network"
- positions d'une constellation de satellites
- activités d'un robot martien

→ optimisation QUBO → recuit simulé quantique



Torta, Pietro, et al. "Quantum computing for space applications: a selective review and perspectives." *EPJ Quantum Technology* 12.1 (2025): 66.

#Problèmes de planification en sciences spatiales

EXACT AND APPROXIMATE METHODS FOR THE DAILY MANAGEMENT OF AN EARTH OBSERVATION SATELLITE

J.C. Agnès, N.Bataille, D. Blumstein (†)
E. Bensana, G. Verfaillie (‡)

† : CNES, Centre Spatial de Toulouse, 18 av. E. Belin, 31055 Toulouse Cedex, France

‡ : CERT-ONERA, 2, av. E. Belin, BP 4025, 31055 Toulouse Cedex, France

Agile Earth Observation Satellite Scheduling With a Quantum Annealer

Publisher: IEEE

[Cite This](#)

[PDF](#)

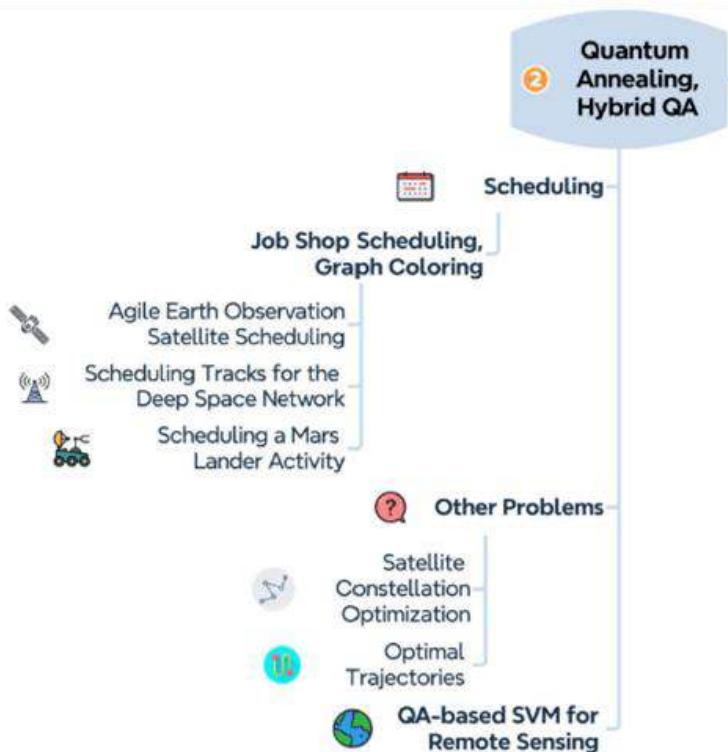
Tobias Stollenwerk  ; Vincent Michaud  ; Elisabeth Lobe  ; Mathieu Picard ; Achim Basermann ; Thierry Botter  [All Authors](#)
Airbus Defence and Space, Toulouse, France ; Central Research and Technology Group, Airbus, Munich, Germany ; German Aerospace Center, Köln, Germany

7062

IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING, VOL. 16, 2023

Quantum Algorithms Applied to Satellite Mission Planning for Earth Observation

Serge Rainjonneau, Igor Tokarev, Sergei Iudin, Saaketh Rayaprolu, Karan Pinto, Daria Lemtiuzhnikova, Miras Koblan, Egor Barashov, Mo Kordzanganeh , Markus Pflitsch, and Alexey Melnikov 



#Machine Learning Quantique pour la télédétection et l'observation de la Terre

		Type of Algorithm
		classical
		quantum
Type of Data	classical	CC
	quantum	CQ
quantum	QC	QQ

Objectif : traiter et classifier d'énormes ensembles de données provenant des satellites et capteurs

- Approche QML : algorithmes hybrides quantiques-classiques
- Applications :
 - Classification d'images pour l'observation de la Terre
 - Extraction de caractéristiques à partir de données de télédétection
 - Détection d'anomalies dans les réseaux de capteurs

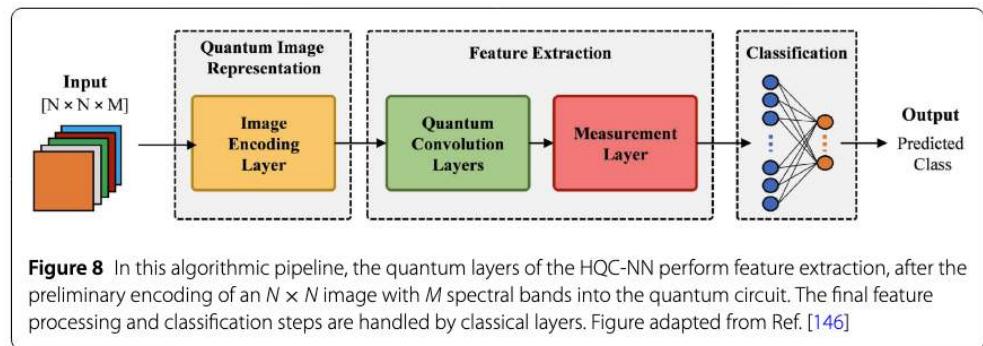
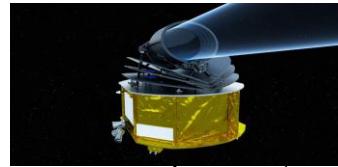


Figure 8 In this algorithmic pipeline, the quantum layers of the HQC-NN perform feature extraction, after the preliminary encoding of an $N \times N$ image with M spectral bands into the quantum circuit. The final feature processing and classification steps are handled by classical layers. Figure adapted from Ref. [146]

Torta, Pietro, et al. "Quantum computing for space applications: a selective review and perspectives." *EPJ Quantum Technology* 12.1 (2025): 66.

#ARIEL - CHIMIE QUANTIQUE

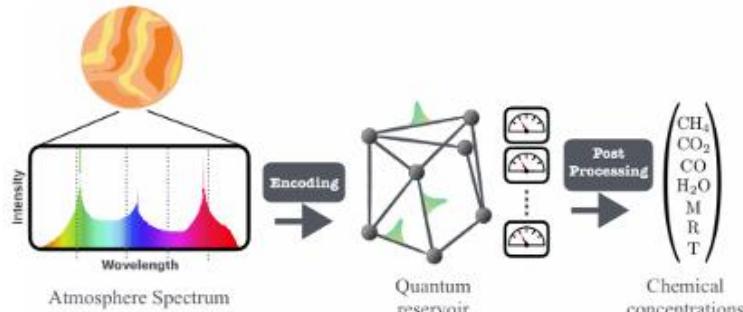
CALCUL QUANTIQUE
SÉMINAIRE QUANTIQUE &
SPATIAL



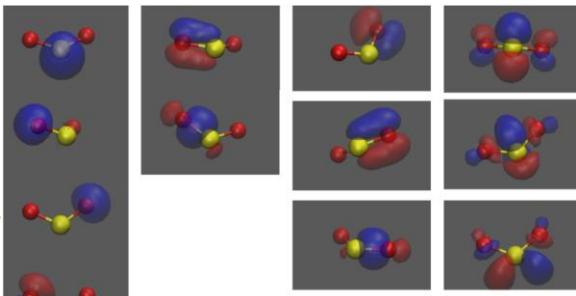
ARIEL = Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey

Mission de l'ESA 2029. Caractérisation de centaines d'exoplanètes par des mesures de spectroscopie de transit et d'émission.

Rôle important du **dioxyde de soufre SO₂** et de sa **composition électronique**.



Résultats différents entre le simulateur et la machine quantique IQM Qarnet



Implémentation en optimisation binaire quadratique non contrainte (QUBO) sur ordinateur à recuit quantique

#Conclusion

Calcul quantique:

- Simulation de phénomènes complexes (fluide, plasma, matériaux, combustion, ...)
- Problèmes de planification
- Traitement de données spatiales
- Etude et reconstruction de spectres

Avantage quantique potentiel en temps, en mémoire ou en pratique pour certains problèmes.