

INFORMATIQUE

Quantique






Ce coup-ci on vous
dit tout...






ou pas...





 Sébastien Marie 
 Matmut (France)

 Olivier Ezratty   
 Quantum Energy Initiative (France)

 Fanny Bouton   
 OVHcloud (France)

 Guillaume Schurck 
 Alice & Bob (France)



Au programme

- **Ordinateurs quantiques** usages, principes, état de l'art et défis (1h30)

- **Pause** (15 min)



- **Que fais un cloud provider** avec des ordinateurs quantiques ? (15 min)

- Comment on code sur un **QPU Alice&Bob** ? (30 min)

- **Matmut**, que peut faire une assurance avec l'informatique quantique ? (30 min)

- **Q&A**



ordinateurs quantiques

usages, principes, état de l'art et défis



Olivier Ezratty

⟨ ... | quantum engineer | QEI cofounder | ... ⟩

olivier@oezratty.net www.oezratty.net @olivez

Devoxx 2026, Paris, 23 avril 2026

(Aage Niels Bohr | Abner Shimony | Adi Shamir | Akira Furusawa | Alain Aspect | Alain Ravex | Alain Sarlette
 Alan Aspuru-Guzik | Alastair Abbott | Albert Einstein | Alberto Bramati | Alexander Andreev | Alexander Holevo
 Alexander Prokhorov | Alexandre Blais | Alexandre Zagoskin | Alexei Bylinskii | Alexei Grinbaum | Alexei Kitaev
 Alexia Auffèves | Alfred Kastler | Alfred Pérot | Alonzo Church | Amir Naveh | André Luiz Barbosa | Andrea Morello
 Andrea Rodriguez Blanco | Andreas Wallraff | Andrew Childs | Andrew Cross | Andrew Gleason | Andrew Horsley
 Andrew S. Dzurak | Andrew Steane | Andrew G. White | Andy Matuschak | Anne Broadbent | Anne Couteau
 Anne Matsuura | Anthony Leverrier | Antoine Broweays | Anton Zeilinger | Aram Harrow | Arieh Warshel | Arthur
 Holly Compton | Arthur Leonard Schawlow | Artur Ekert | Astrid Lambrecht | Audrey Bienfait | Axel Becke | Barbara
 Terhal | Benjamin Huard | Benoit Valliron | Bettina Heim | Bob Wiens | Boris Podolsky | Brian Josephson | Bruce
 Kane | Bruno Desruelle | Bruno Witt | Carlo Rovelli | Charles Bennett | Charles Fabry
 Charles Hard Townes | Chiara Montani | Christian Weedbrook | Christine Silberhorn | Christophe Juenkes | Christopher
 Reid | Claude Cohen Tannoudji | Claude Weisbuch | Clauss Jonsson | Clinton Davison | Christopher Dorsman | Craig Gidney
 Cristian Calude | Cristina Escoda | Cyril Alouche | Damien Stehlé | Daniel Esteve | Daniel Gottesman | Dave Wecker
 David Bohm | David Elkouss | David Elkouss | David Elkouss | David Elkouss | David Elkouss | David Elkouss | David Elkouss
 Dennis Dieks | Dennis Dieks | Dirk Engelen | Dorit Aharonov | Dorit Aharonov | Dorit Aharonov | Dorit Aharonov
 Dorit Aharonov | Dorit Aharonov | Dorit Aharonov | Dorit Aharonov | Dorit Aharonov | Dorit Aharonov | Dorit Aharonov
 Edward Tang | Elena Caltale | Eleni Diamanti | Elham Kashefi | Elisabeth Gაცობინი | Elvira Chis-hennina | Emanuel
 Knill | Emmy Noether | Enrico Fermi | Eric Cornell | Ernest Rutherford | Ernst Ising | Erwin Schrödinger | Etienne
 Klein | Ettore Majorana | Ewin Tang | Fabio Sciarrino | Faye Wattleton | Felix Bloch | Francesca Ferlauto | Franck
 Balestro | Frank Wilczek | Francois Grangier | Francesco Caruso | Freeman John Dyson | Friedrich
 Hund | Friedrich Paschen | Garnet Gill | Giorgio Nicosia | Georges Paget Thomson | Georges
 Zweig | Gerard Milburn | Gerret Jan Flim | Gil Kalai | Gilles Brassard | Gilles Holt | Giorgio Prossati | Gordon Baym
 Gordon Gould | Guang-Can Guo | Haig Farris | Hans Albrecht Bethe | Hans Jürgen Briegel | Hantaro Nagaoka | Harald
 Fritzsch | Hartmut Neven | Heike Kammerlingh Onnes | Heinrich Hertz | Hélène Bouchiat | Hélène Perrin | Hendrik
 Anthony Kramers | Hendrik Casimir | Hendrik Lorentz | Hermann Minkowski | Hermann Weyl | Hugh
 Everett | Hui Khoon Ng | Ilana Wsiwy | Ilya Mikhalevich | Emanuel Bloch | Jordanis Kerensidi | Irfan Siddiqi
 Isaac Chang | Isaac Newton | Itamar Henrich | Jacques Salomon Hadamard | Jacqueline Romero
 James Chadiack | James Clerk Maxwell | James Park | Jared Cole | Jason Alicka | Jay Gambetta
 Jean Dalibard | Jean Michel Raimond | Jean-François Roch | Jean-Michel Gérard | Jean-Philip Piquemal | Jian-Wei
 Pan | Jelena Vucković | Jens Eisert | Jeremy O'Brien | Joannes van der Waals | Joe O'Gorman | Johann Balmer
 Johannes Pollanen | Johannes Rydberg | John Bardeen | John Clauser | John Frank Allen | John Hall | John Levy
 John Martinis | John Morton | John Preskill | John R. Oppenheimer | John Rowell | John Smolin | John Stewart Bell
 John Von Neumann | John Watrous | John Wheeler | Jonathan Dowling | Jonathan Koomey | Jonathan P. Home
 Jose Capmany | José David Domenech | Joseph J. Hopfield | Joseph John Thomson
 Josh Nunn | Juan Ignacio Cirac | Julia Kempe | Jürgen Borchers | Jürgen Myrnek | Kenneth Appel
 Kenneth Regan | Kevin Young | Kirill Tshernyshov | Kristian Nielsen | Krysta Svore | Kun Huang | Kurt
 Gödel | Le Si Dang | Lee Smolin | Leon P. Kadanoff | Lester R. Brown | Lev Bishop
 Lev Landau | Lieven Vandersypen | Lin Lin | Louis de Broglie | Louis Cauchy | Louis de Broglie
 Loy Grover | Lu Jeu Sham | Lucien H. Leggett | Magdalena Huzar | Marcus Doherty
 Marcus Hübner | Maria Schuld | Marie Perle | Marina Huerta | Martin Karpus | Masahide Sasaki | Masahiro
 Kitagawa | Masahito Hayashi | Mathias Jentsch | Matthias Muehlebach | Matthias Troyer | Matthieu Desjardins | Maud
 Vinet | Max Born | Max Planck | Max Tegmark | Michael A. Nielsen | Michael Ben-Or | Michael
 Frank | Michael Freedman | Michael J. Heule | Michel Brune | Michel Devoret |
 Michele Simmons | Mikhail Dyakonov | Mikhail Lukin | Gell-Mann | Nathan Gemmeke | Nathan
 Rosen | Nathanael Cottet | Niccolò Pignatelli | Nicolas Gisin | Nicolas Roch | Niels
 Henrik Abel | Nikolay Basov | Nir Minkovich | Nikolai G. Van Kampen | Olivier Carnal | Oskar Painter | Pascale
 Senellart | Pascal Jordan | Pascual Muñoz | Peter Higgs | Peter Knight | Peter Zoller | Philipp W. Anderson | Philipp
 Shadbolt | Peter Higgs | Peter Knight | Peter Zoller | Philipp W. Anderson | Philipp
 Lenard | Philippe Duple | Philippe Grangier | Pierre Rouchon | Pierre Zeman | Pranav Gokhale
 Piotr Kapcia | Qing Wang | Raymond Blatt | Raymond Laflamme | Rebecca Krauss | René
 Descartes | Richard Feynman | Richard Holt | Richard Murray | Rob Schoelkopf | Rob Whitney
 Robert Andrews Millikan | Robert Dendard | Robert König | Robert McDermott | Roy J. Glauber | Robert Raussendorf
 Robert Wille | Robert William Boyd | Robin Blume-Kohout | Roger Penrose | Roland Gähler | Roman Lutz | Ron
 Rivest | Roy Glauber | Ronald Walsworth | Rudolf Grimm | Ryan Babush | Samuel Goudsmit | Sandu Popescu | Sara
 Ducci | Sarah Sheldon | Satyendra Nath Bose | Scott Aaronson | Sébastien Balibar | Serge Haroche | Sergey Bravyi
 Seth Lloyd | Shengtao Wang | Shih-Yu Yang | Shiro Tomonaga | Silvano De Francesco | Simon Benjamin | Simon
 Perdrix | Simone Severini | Srinivas Aravamudan | Steve Girvin | Steve Lamoreaux | Steve
 Taki Kontos | Tahir Abdull | Theodore Lyman | Theodore
 Maiman | Thibault Jacqmin | Thierry Lahaye | Thomas Monz | Thomas Young | Tommaso Calarco | Tommaso Toffoli
 Tracy Northrup | Travis Humble | Tristan Meunier | Umesh Virkumar Vazirani | Urmila Mahadev | Valerian Giesz
 Vasilis Armaos | Vincent Bouchiat | Virginia D'Áuria | Vladan Anisimov | Vladan Vuletic | Vladimir Pavlov
 Brattain | Walter Kohn | Walter Brattain | Walter Messner | Walter Nestor | Wassim Estephan | Werner
 Heisenberg | Wilhelm Wien | William Rowan Hamilton | William Shockley | William Wootters | Willis Eugene Lamb
 Winfried Hensinger | Wojciech Zurek | Wolfgang Haken | Wolfgang Lechner | Wolfgang Pauli | Wolfgang Pauli
 Wolfgang Ketterle | Xavier Waintal | Yakov Frenkel | Yasuhiko Arai | Yasunobu Nakamura | Yehuda Naveh
 Yoshinisa Yamamoto | Yuichiro Minato | Yuri Alexeev | Yuri Manin | Zaki Leghtas)

Understanding Quantum technologies

Eighth edition 2025

Olivier Ezratty



le lab quantique



free 1,524 pages ebook



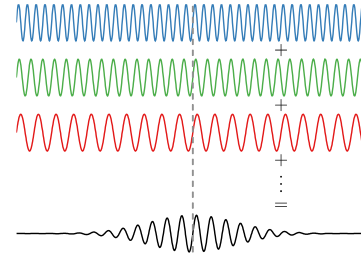
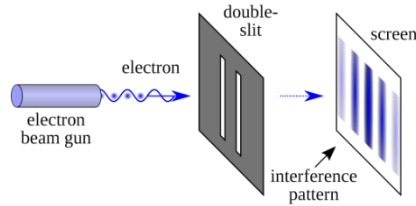
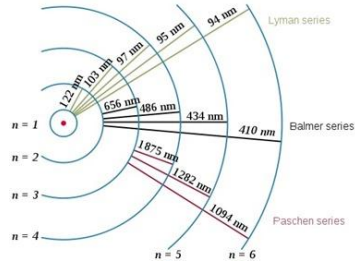
DECODE QUANTUM
 Decode Media
 Sciences
 ★★★★★ 5.0 (17 votes)
[Écouter sur Apple Podcasts >](#)

4 JANV. 2023
[DECODE Quantum] A la rencontre d'Anthony Leverrier, chercheur...
 Nous voici dans le 54e épisode des entretiens Decode Quantum où, Olivier Ezratty et Fanny Bouton accueillent Anthony Leverrier d'Irigo, après avoir reçu Harold Olivier qui coordonne la recherche dans le quantique chez Irigo. Anthony Leverrier est chercheur Irigo depuis 2012, dans l'équipe CODAQ...

54 épisodes

[LIRE](#) 10 min

qu'est-ce être « quantique »?



quantification
propriétés physiques
discrètes: projection du
spin, niveaux d'énergie, ...

dualité onde-particule
électrons, photons,
atomes, neutrons

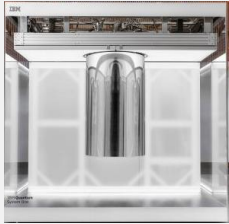
superposition
liée à la dualité et à la
linéarité de l'équation
de Schrödinger

contrôle
individuel d'objets
quantiques (atomes,
électrons, photons)

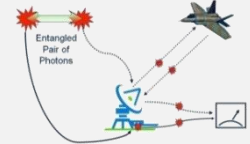
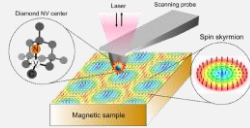
intrication
corrélation d'états distants
lors d'une mesure
aléatoire



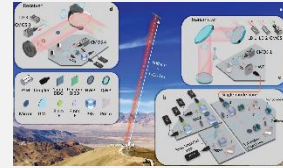
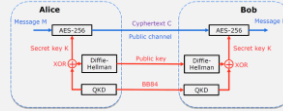
les technologies quantiques



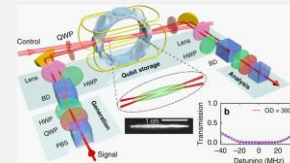
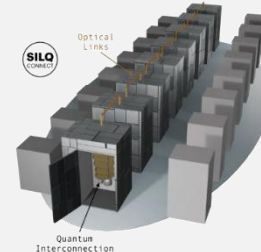
ordinateurs
quantiques



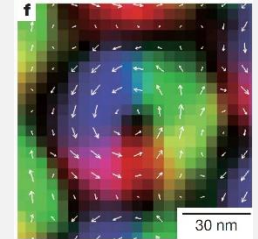
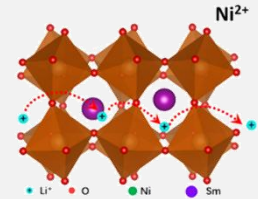
capteurs
quantiques



cryptographie
quantique



communications
quantiques



matière
quantique

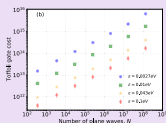
ambitions du calcul quantique



- résoudre plus vite certains problèmes complexes.
- rendre accessibles des calculs impossibles classiquement.

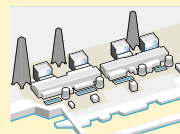


- réduire la quantité de données nécessaires, par exemple, dans le machine learning.



- améliorer la qualité des résultats.

matmut 



- réduire potentiellement la consommation d'énergie.

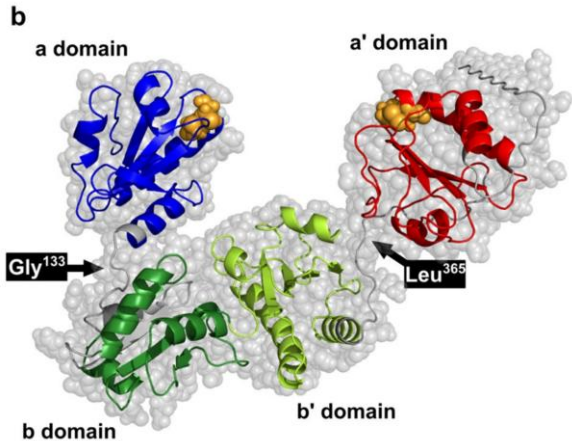
#QEI
the quantum energy initiative



- **utilité** : qui dépend de l'utilisateur (recherche scientifique, industriels, états).

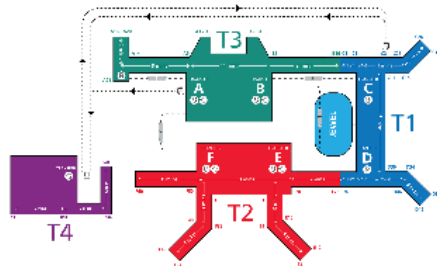
matmut 

problèmes cibles typiques

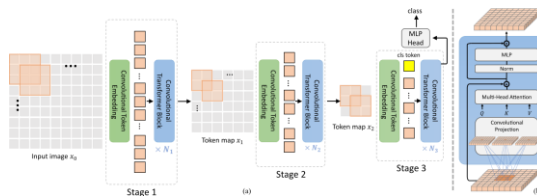


$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x)\Psi(x,t)$$

simuler la matière quantique



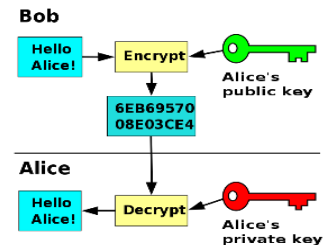
optimisations combinatoires
et problèmes de décision



machine learning
et deep learning



résolution d'équations
aux dérivées partielles



cryptanalyse

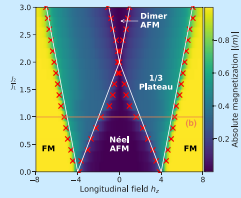
usages, de la recherche aux opérations

recherche fondamentale

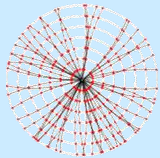
recherche appliquée

opérations

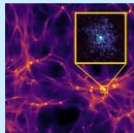
applications opérationnelles



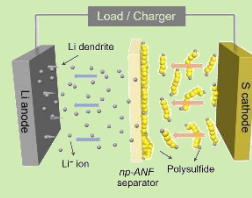
matière condensée
matière corrélée



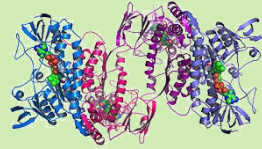
particules à hautes
énergies



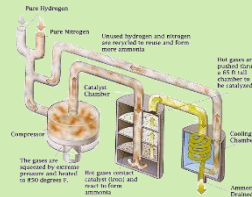
astrophysique



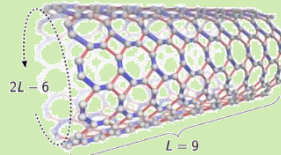
batteries



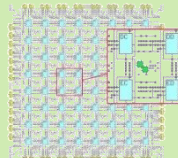
biotech



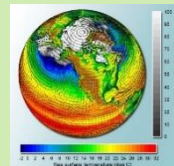
production d'engrais



matériaux



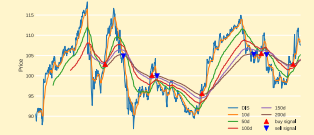
semiconducteurs



modélisation



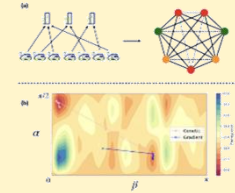
transports



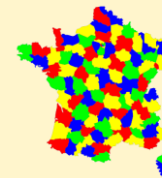
services financiers



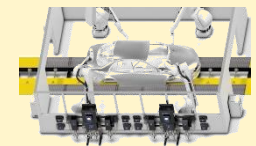
logistique
et commerce



énergie



télécommunications



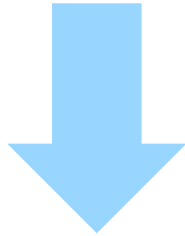
industrie

tendance attendue et espérée

le « quantum bit » du calcul quantique

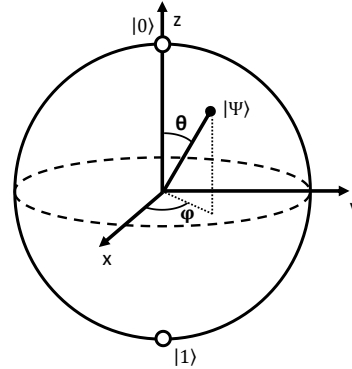
mathématiquement

unité de gestion de l'information
équivalent à deux nombres réels



physiquement

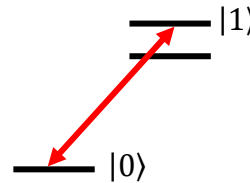
objet quantique
avec deux états contrôlables



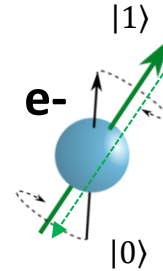
souvent représenté sous la
forme d'une amplitude et
d'une phase d'une onde,
dans la sphère de Bloch

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

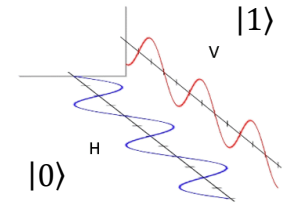
$$|\Psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + \sin\frac{\theta}{2}e^{i\varphi}|1\rangle$$



deux niveaux d'énergie
d'un atome



spin d'un
électron



polarisation
d'un photon

le modèle mathématique des qubits

amplitudes complexes

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} |0\rangle \\ |1\rangle \end{matrix}$$

$$|\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 = 1$$

1 qubit
objet quantique à deux états superposables, équivalent de 2 nombres réels (*après normalisation*)

amplitudes complexes

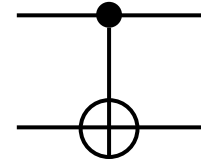
$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \alpha_{2^N} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} |00 \dots 00\rangle \\ |10 \dots 01\rangle \\ \dots \\ |11 \dots 11\rangle \end{matrix}$$

$$\sum_{i=1}^{2^N} |\alpha_i|^2 = 1$$

N qubits
équivalent de 2^{N+1} nombres réels

combinaisons de 0 et 1

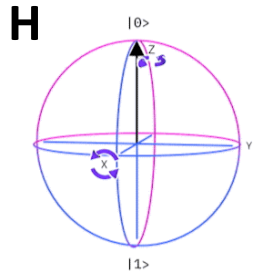
porte CNOT



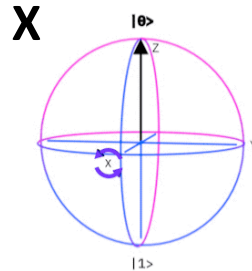
$$\begin{bmatrix} \alpha_{00} \\ \alpha_{01} \\ \alpha_{10} \\ \alpha_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{00} \\ \alpha_{01} \\ \alpha_{11} \\ \alpha_{10} \end{bmatrix}$$

l'intrication rend les qubits interdépendants et apporte la puissance du calcul dans certaines circonstances

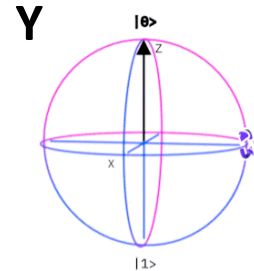
visualisation de portes à un qubit



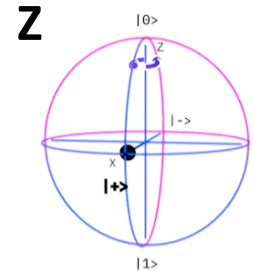
$$|0\rangle \rightarrow |+\rangle$$



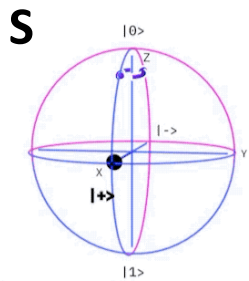
$$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$$



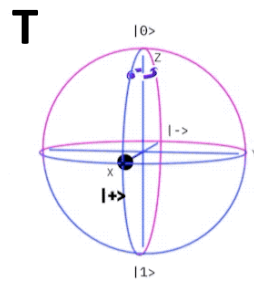
$$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$$



$$|+\rangle \rightarrow |-\rangle$$

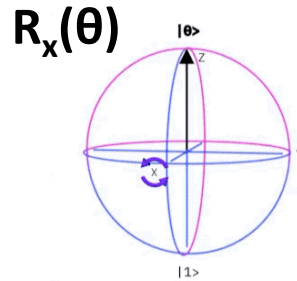


$$|+\rangle \rightarrow (|0\rangle + j|1\rangle)/\sqrt{2}$$

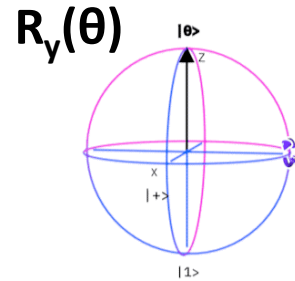


$$|+\rangle \rightarrow (|0\rangle + j\pi/4|1\rangle)/\sqrt{2}$$

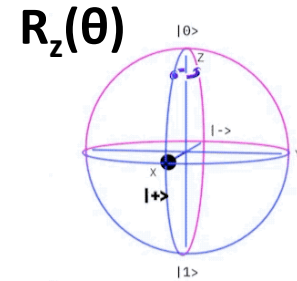
FTQC



$$|0\rangle \rightarrow (|0\rangle - j|1\rangle)/\sqrt{2}$$



$$|0\rangle \rightarrow |+\rangle$$

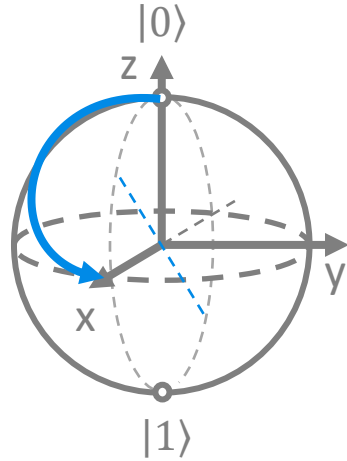


$$|+\rangle \rightarrow (|0\rangle + j|1\rangle)/\sqrt{2}$$

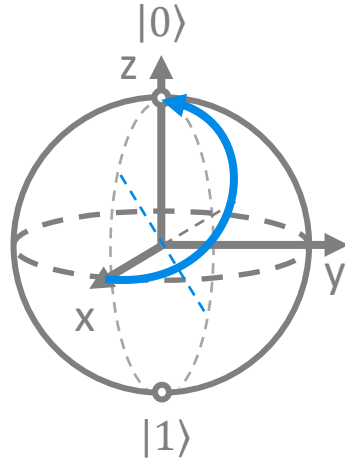
NISQ

source : IBM Quantum instruction glossary

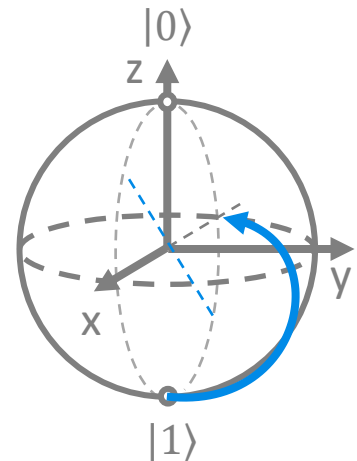
l'effet de la porte de Hadamard



$$|0\rangle \Rightarrow \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} = |+\rangle$$

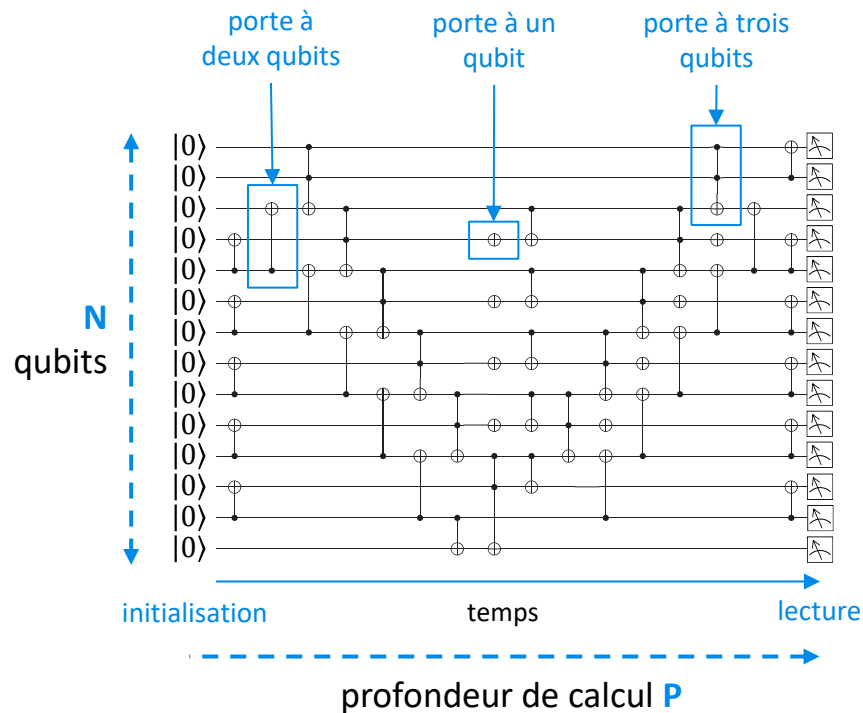


$$\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \Rightarrow |0\rangle$$



$$|1\rangle \Rightarrow \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} = |-\rangle$$

qu'est-ce qu'un algorithme quantique?



algorithme quantique : décompose un problème mathématique en circuit quantique.

circuit quantique : suite d'opérations agissant sur une mémoire quantique de qubits, individuellement (superposition) ou les reliant entre eux (intrication), et se terminant par une mesure.

modèle mathématique : calcul matriciel opérant sur un espace mémoire de 2^{N+1} nombres réels.

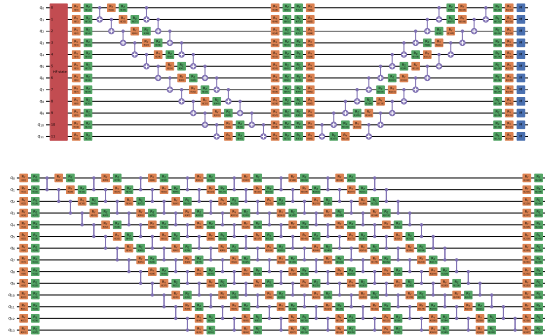
mécanisme : exploite diverses techniques comme la génération d'interférences pour faire ressortir une valeur d'intérêt sous forme de bits classiques lus en sortie.

calcul classique : utilisé pour préparer le circuit, y encoder les données, et extraire les résultats.

quelques différences clés

$$\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle = [\overline{\alpha_1}, \overline{\beta_1}] \times \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \overline{\alpha_1} \alpha_2 + \overline{\beta_1} \beta_2$$

$$|\Psi_2\rangle \langle \Psi_1| = \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \times [\overline{\alpha_1}, \overline{\beta_1}] = \begin{bmatrix} \alpha_2 \overline{\alpha_1} & \alpha_2 \overline{\beta_1} \\ \beta_2 \overline{\alpha_1} & \beta_2 \overline{\beta_1} \end{bmatrix}$$



```
# Initialize counting qubits
# in state |+>
for q in range(n_count):
    qc.h(q)

# And auxiliary register in state |1>
qc.x(3+n_count)

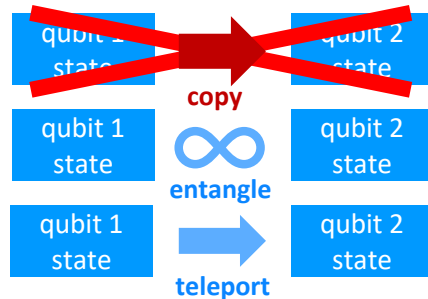
# Do controlled-U operations
for q in range(n_count):
    qc.append(c_amos15(a, 2**q),
              [q] + [i+n_count for i in range(4)])

# Do inverse-QFT
qc.append(qft_dagger(n_count), range(n_count))

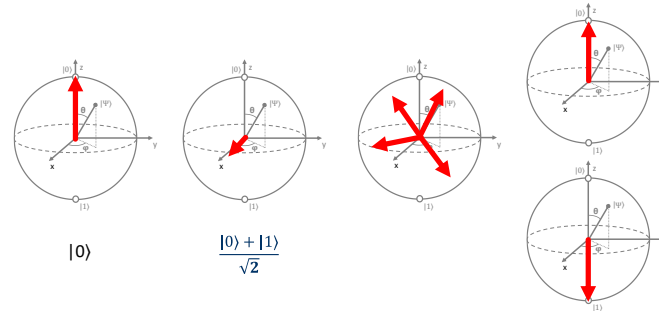
# Measure circuit
qc.measure(range(n_count), range(n_count))
qc.draw(fold=-1) # -1 means 'do not fold'
```

formalisme de l'algèbre linéaire

programmation de « circuits » visuelle ou en Python



données non copiables, mais transférables ou « intriqués »



résultats probabilistes, et calculs répétés pour générer une moyenne déterministe

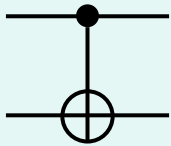
conditions de l'accélération quantique

condition #1

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \alpha_{2^N} \end{bmatrix} \begin{matrix} |00 \dots 00\rangle \\ |10 \dots 01\rangle \\ |11 \dots 11\rangle \end{matrix}$$

- utiliser la superposition.
- vecteur d'amplitude de 2^N nombres complexes.
- chargement de données.

condition #2

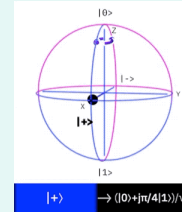


- utiliser l'intrication.
- portes à deux qubits.
- génération d'interférences.

condition #5

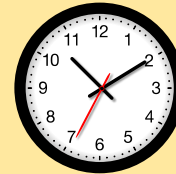
- algorithme qui n'a pas d'équivalent classique aussi performant en intégrant tous les coûts.
- concurrence des réseaux de tenseurs.

condition #3



- permettre des rotations arbitraires dans l'espace de Hilbert.
- support de portes T ou Toffoli.

condition #4

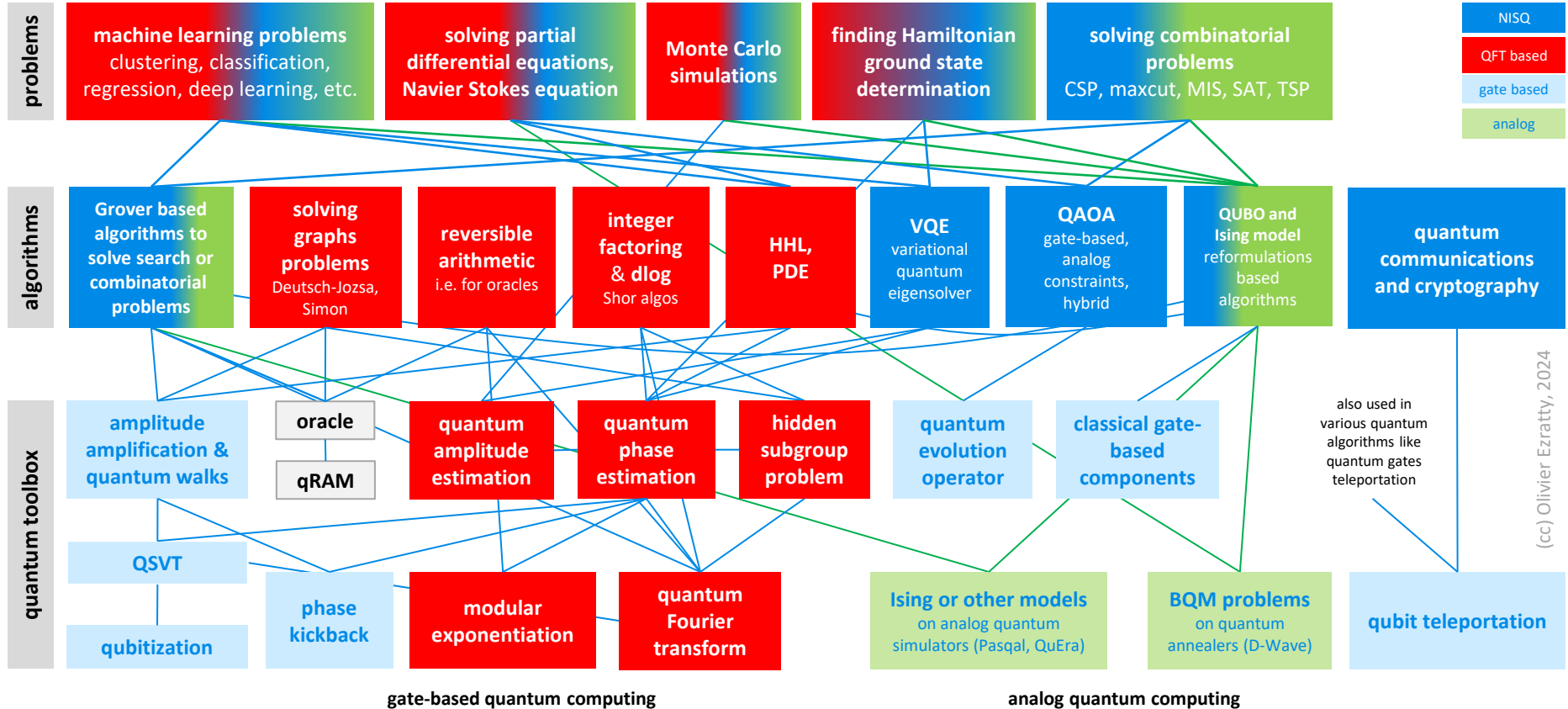


- algorithme générant un résultat plus rapidement que les calculateurs classiques.

condition #6

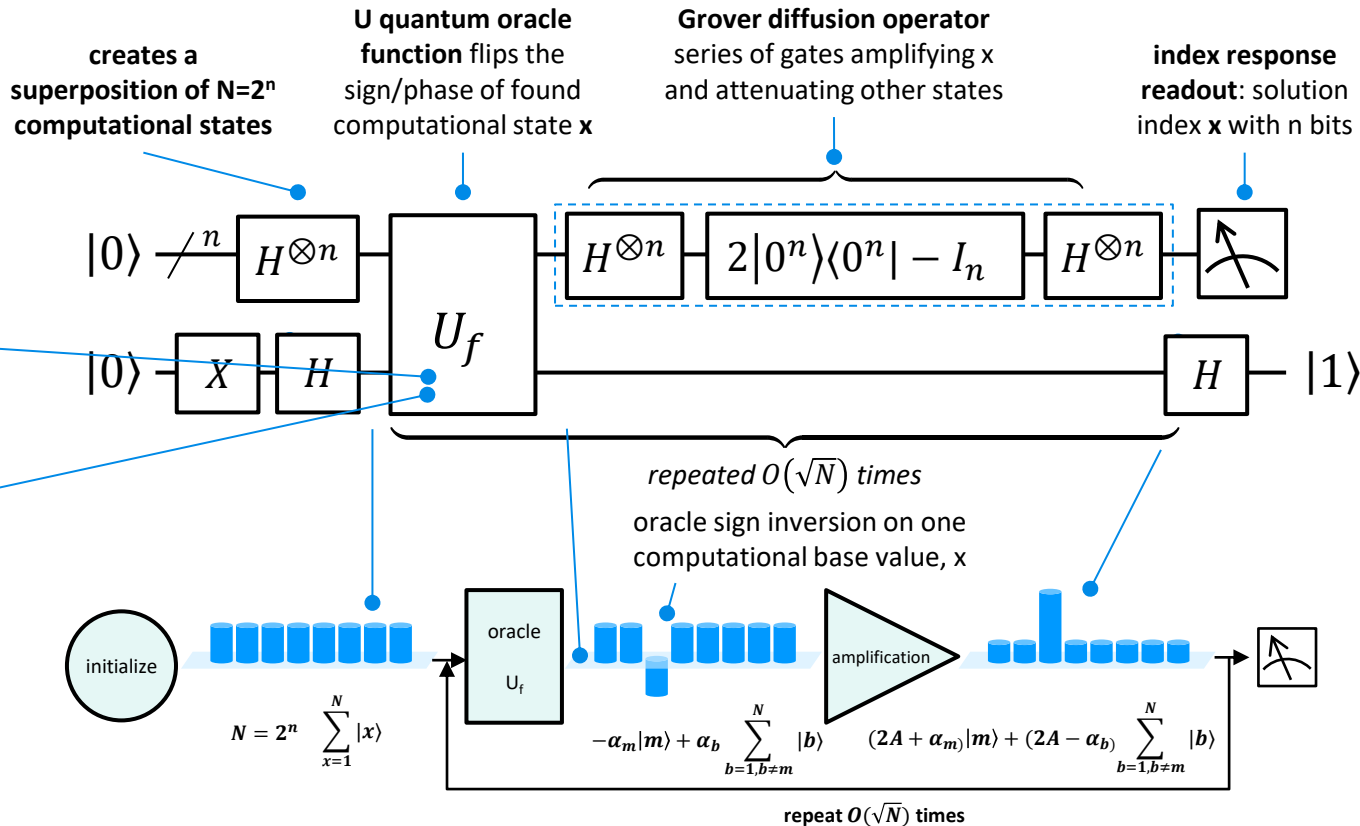
- ordinateur qui supporte la taille du circuit quantique à exécuter.
- correction d'erreurs et FTQC.

zoo 'simplifié' des algorithmes quantiques



algorithme à base d'oracle

example with the Grover algorithm

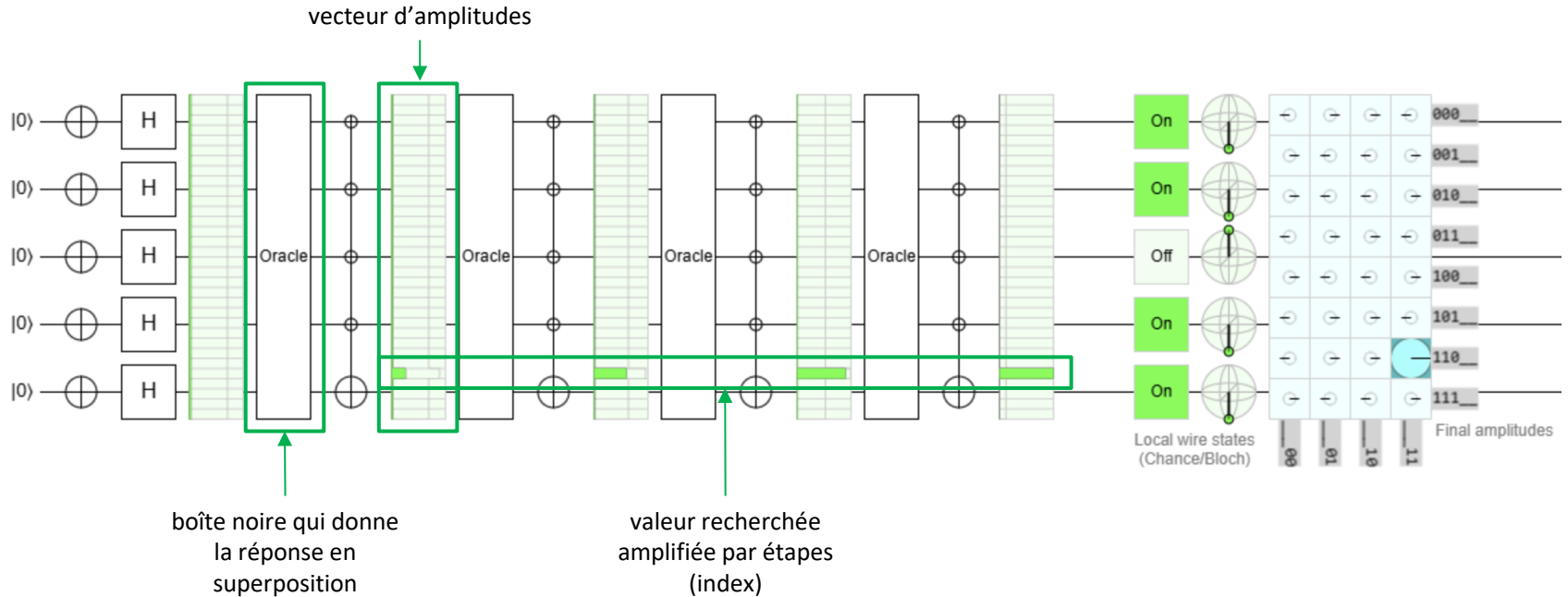


Grover

Simon

Bernstein-Vazirani

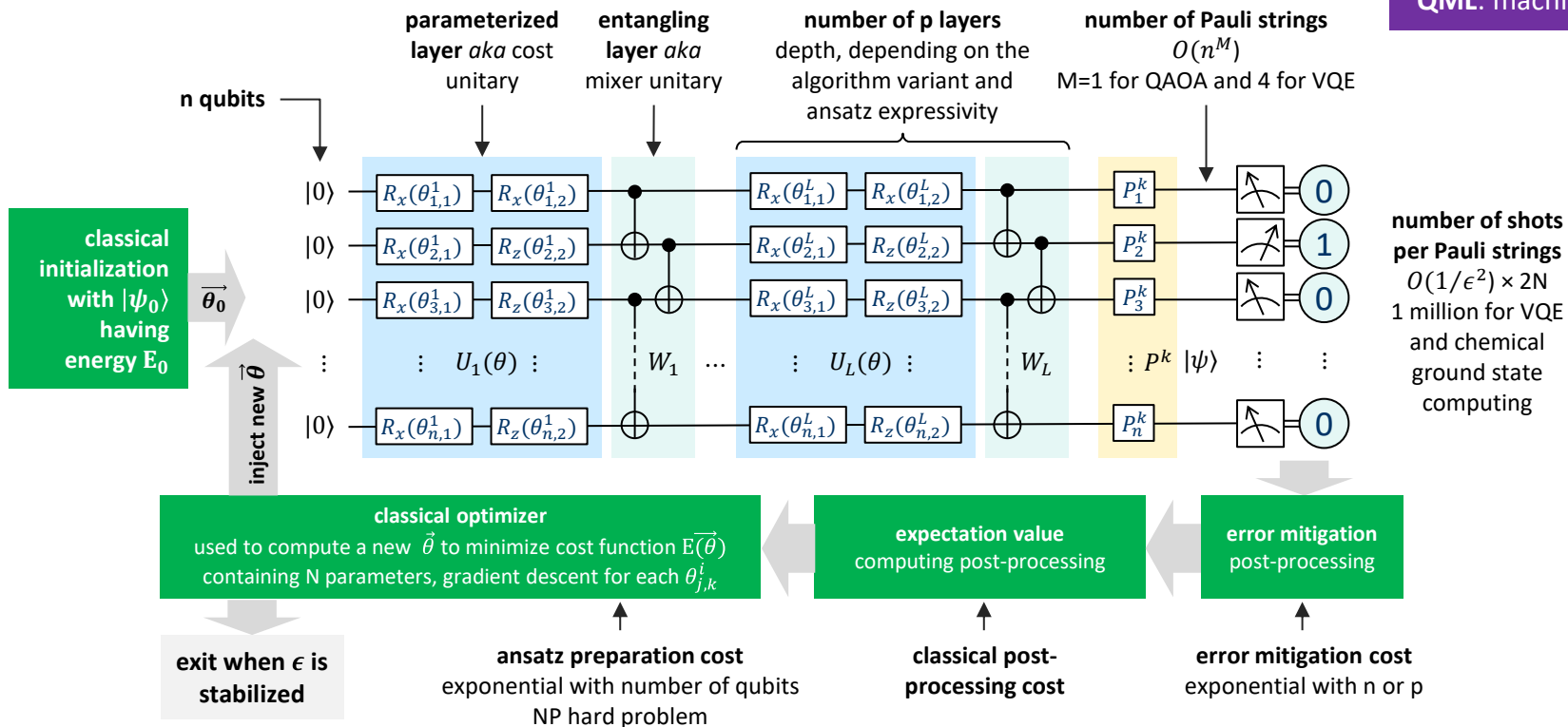
exemple de l'algorithme de Grover



<https://algassert.com/quirk>

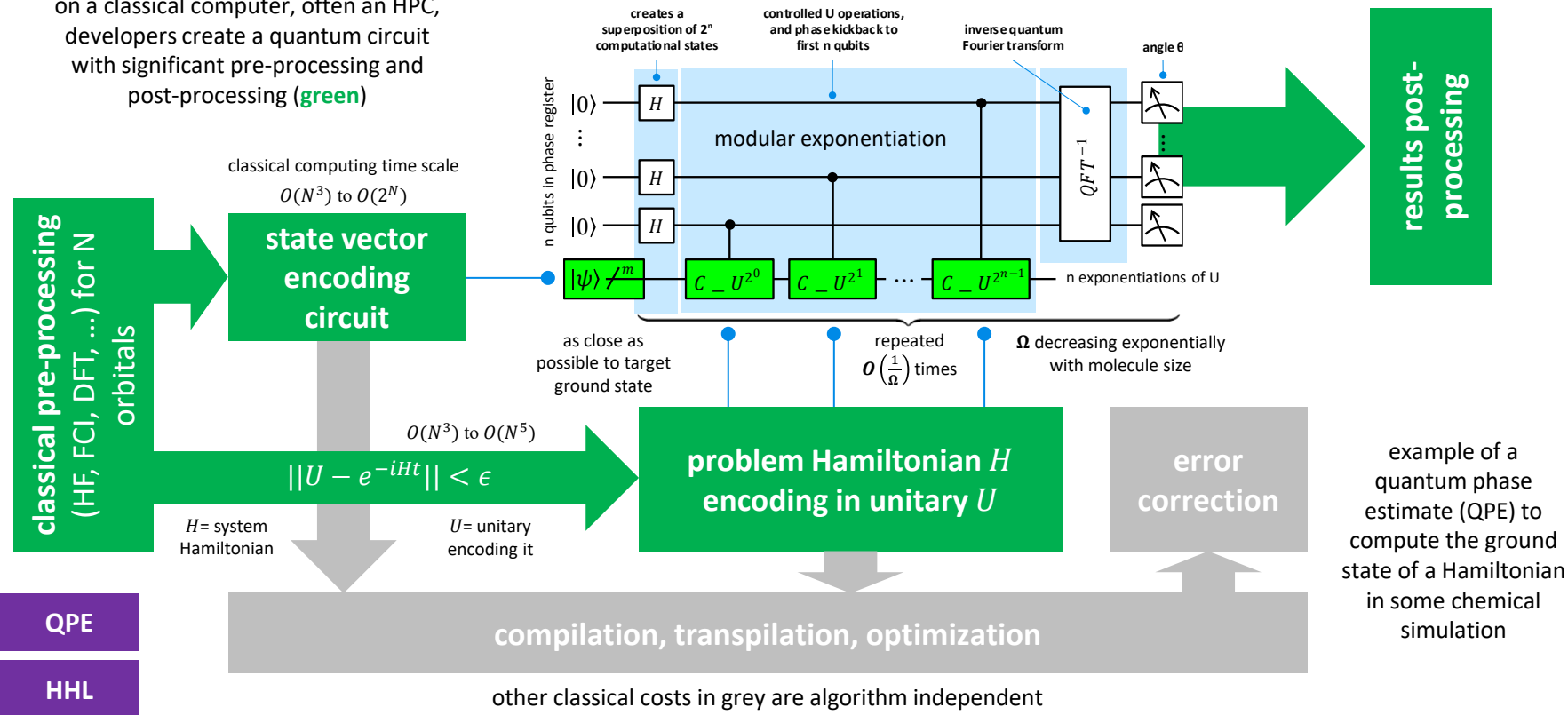
algorithme variationnel

- VQE: chimie
- QAOA: optimisations
- QML: machine learning

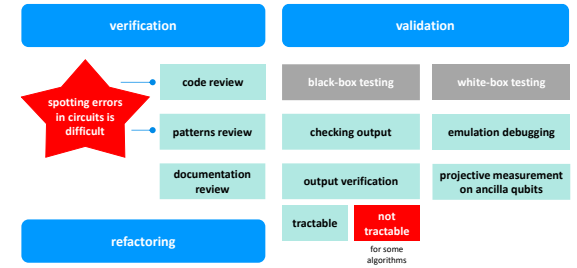
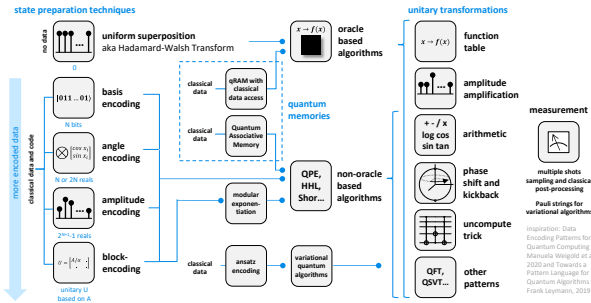
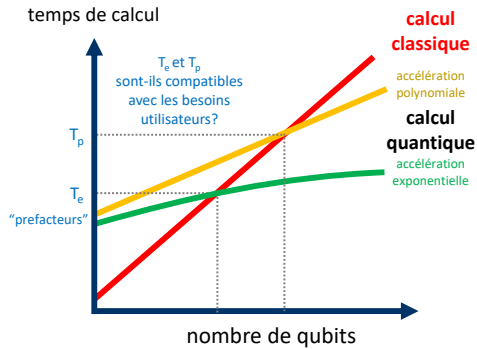


algorithme de simulation chimique

on a classical computer, often an HPC, developers create a quantum circuit with significant pre-processing and post-processing (green)



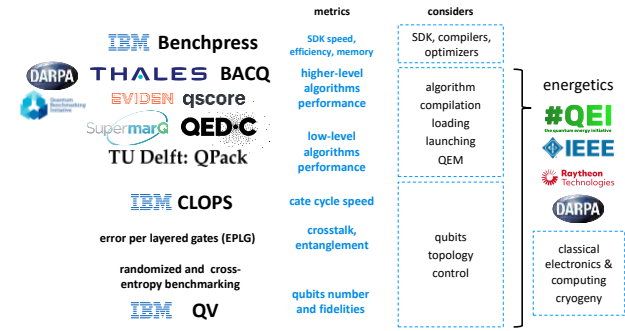
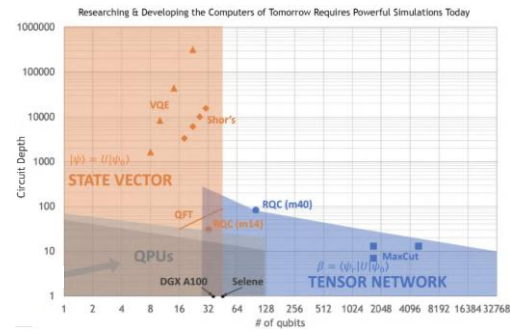
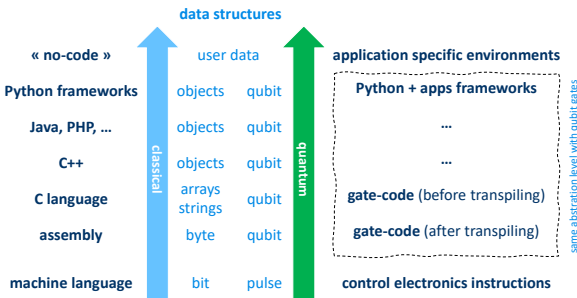
défis logiciels



algorithmes

chargement des données

génie logiciel et cloud



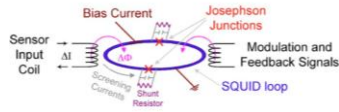
niveaux d'abstraction

IA et réseaux de tenseurs

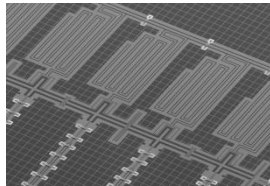
benchmarking

principaux types de qubits physiques

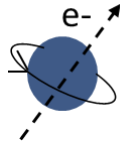
boucles supraconductrices



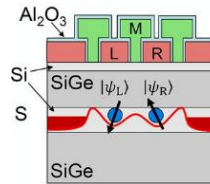
phase ou énergie
de la boucle de courant



spin d'électron

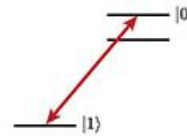


orientation
du spin d'un électron

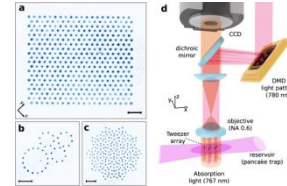


pulsations micro-ondes et tensions

atome

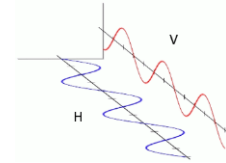


niveau d'énergie
d'un l'atome

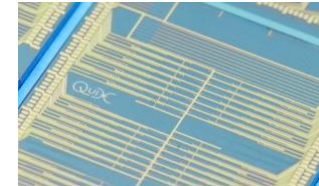


lasers et/ou micro-ondes

photon



polarisation (ou autre
propriété) d'un photon



polariseurs,
interféromètres, etc.

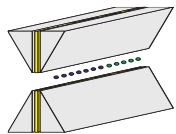
états
quantiques

aspect
physique

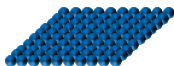
interactions

plus de 80 acteurs du hardware

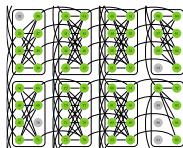
atoms



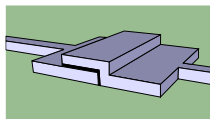
trapped ions



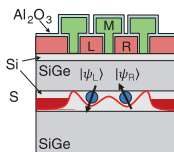
cold atoms



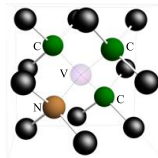
annealing



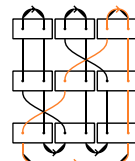
superconducting



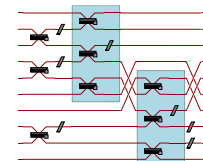
silicon



vacancies



topological



photons

electrons controlled spin and microwave cavities

1

2

3

4

6

5

7

9

12

13

14

BEN
QUADINAROS



RATTS TYERELL



BOLES ROOR



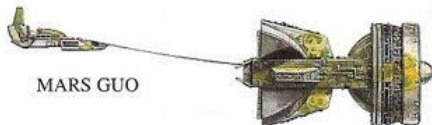
DUD BOLT



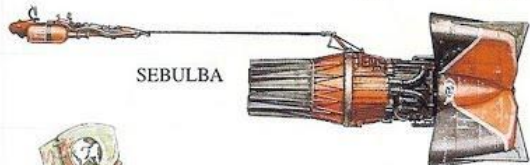
ANAKIN SKYWALKER



MARS GUO



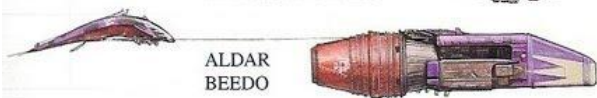
SEBULBA



TEEMTO PAGALIES



ALDAR
BEEDO



NEVA KEE



GASGANO



ARK "BUMPY" ROOSE



ODY MANDRELL



ELAN MAK



EBE ENDOCOTT



MAWHONIC



WAN
SANDAGE



CLEGG
HOLDFAST



IBM



QUANDELA

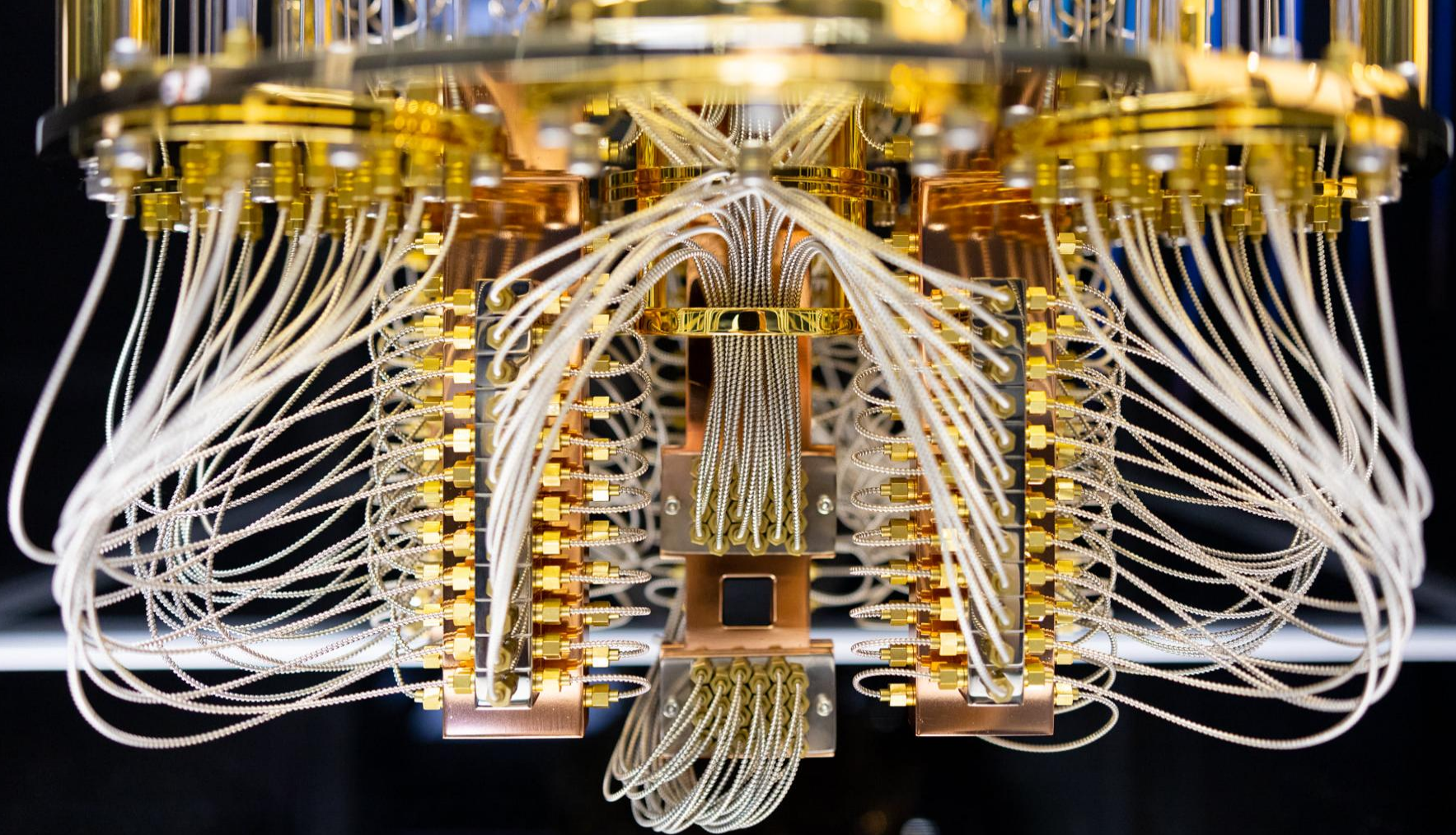


IONQ



Pasqal







IBM Night Hawk 120 qubit installation
January 2026

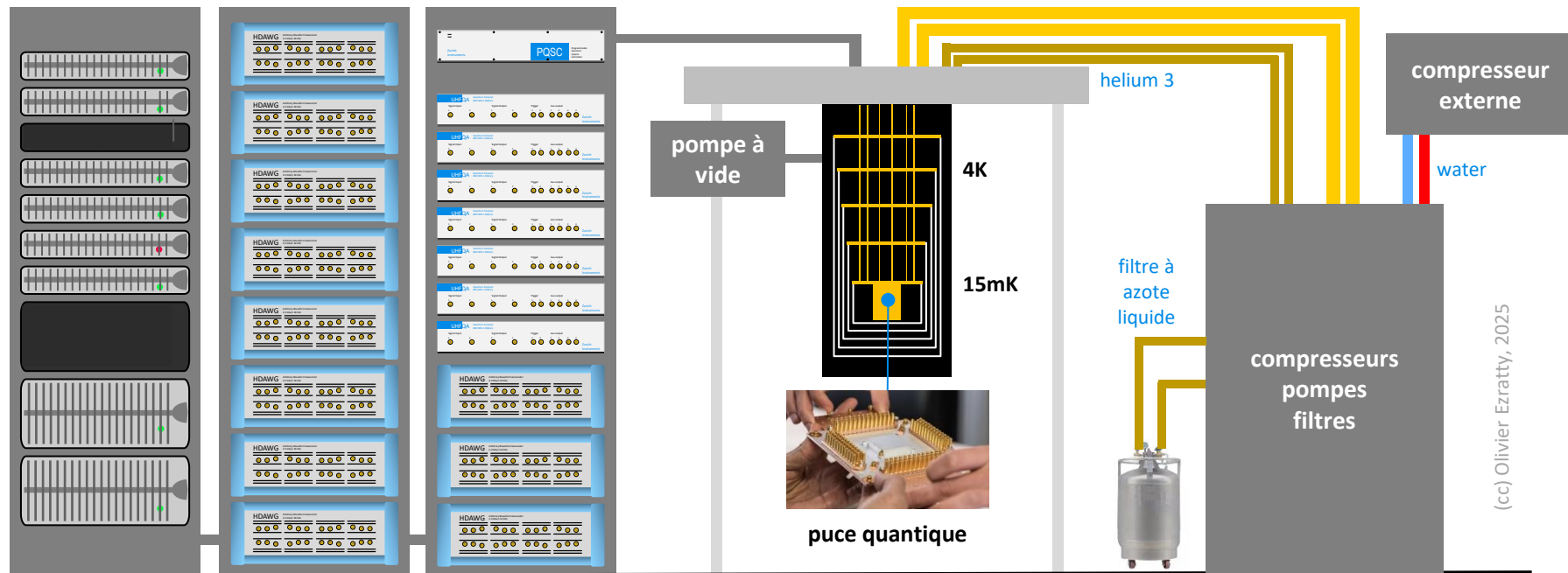
composantes d'un ordinateur quantique

informatique

électronique

qubits isolés

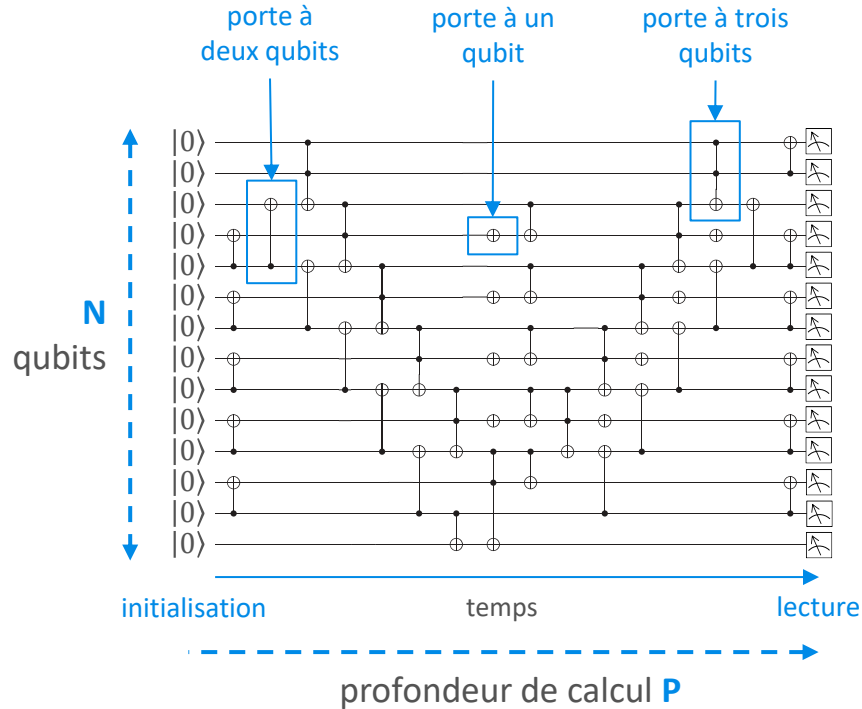
cryogénie



pour des qubits supraconducteurs ou spins dans le silicium

(cc) Olivier Ezratty, 2025

besoins en “fidélité” des opérations



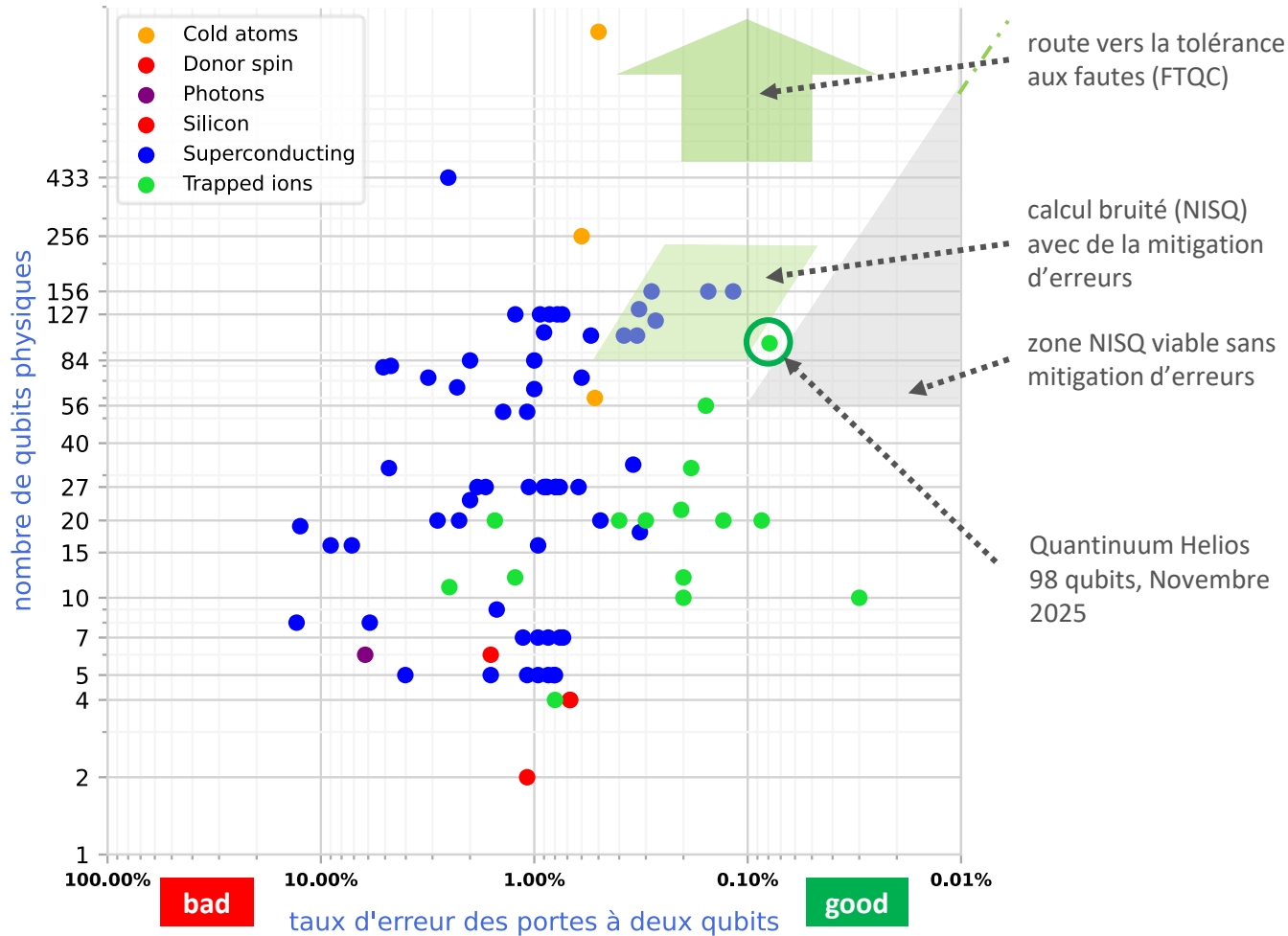
chaque opération en bleu
génère des erreurs qui
s'accumulent au gré du
calcul et réduisent la
qualité des résultats.

taux d'erreurs souhaité

+ →

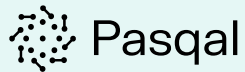
$$\epsilon < \frac{1}{N \times P}$$

un qubit inactif dérive
dans le temps
(émission spontanée)



où on est ...

ordinateurs quantiques « analogiques »



ordinateurs quantiques bruités « NISQ »
(noisy intermediate scale quantum)



et où on veut aller

ordinateurs quantiques tolérants aux fautes
« FTQC » (fault tolerant quantum computers)

objectifs

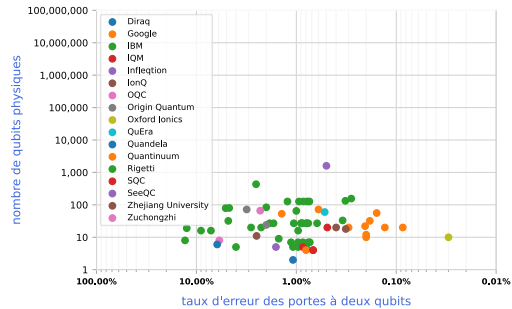
- plus grande capacité de calcul.
- « avantage quantique » vs le calcul classique.

moyens

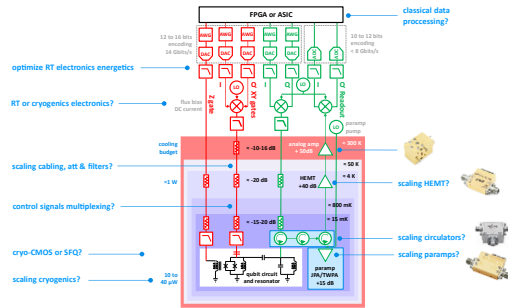
- mécanismes de correction d'erreurs.
- plus grand nombre de qubits physiques.



défis matériels

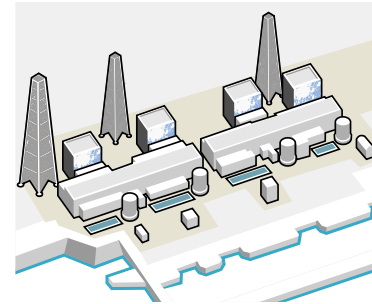


lutte contre le bruit

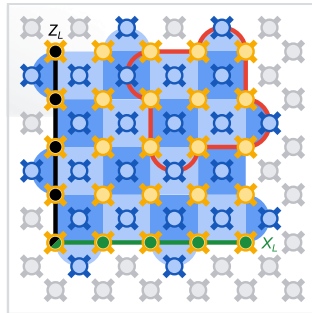


électronique, câblage, cryogénie

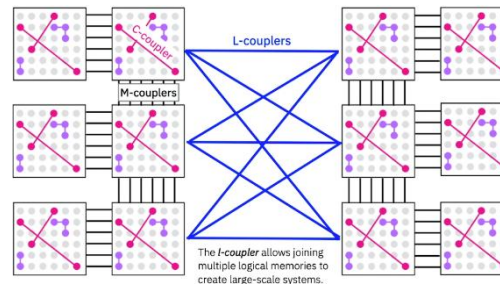
#QEI
the quantum energy initiative



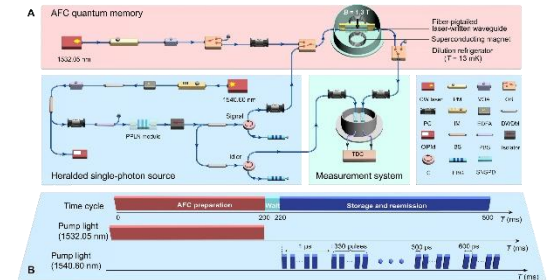
coût et énergie



correction d'erreurs



interconnexion quantique



mémoires quantiques

qubits logiques et tolérance aux fautes

qubit physiques

taux d'erreur $\approx 0.1\%$

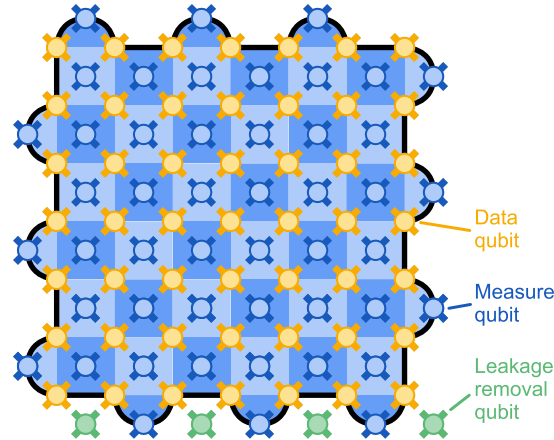
+

codes de
correction
d'erreurs



qubits logiques

taux d'erreurs $\approx 10^{-4}$ à $\approx 10^{-18}$



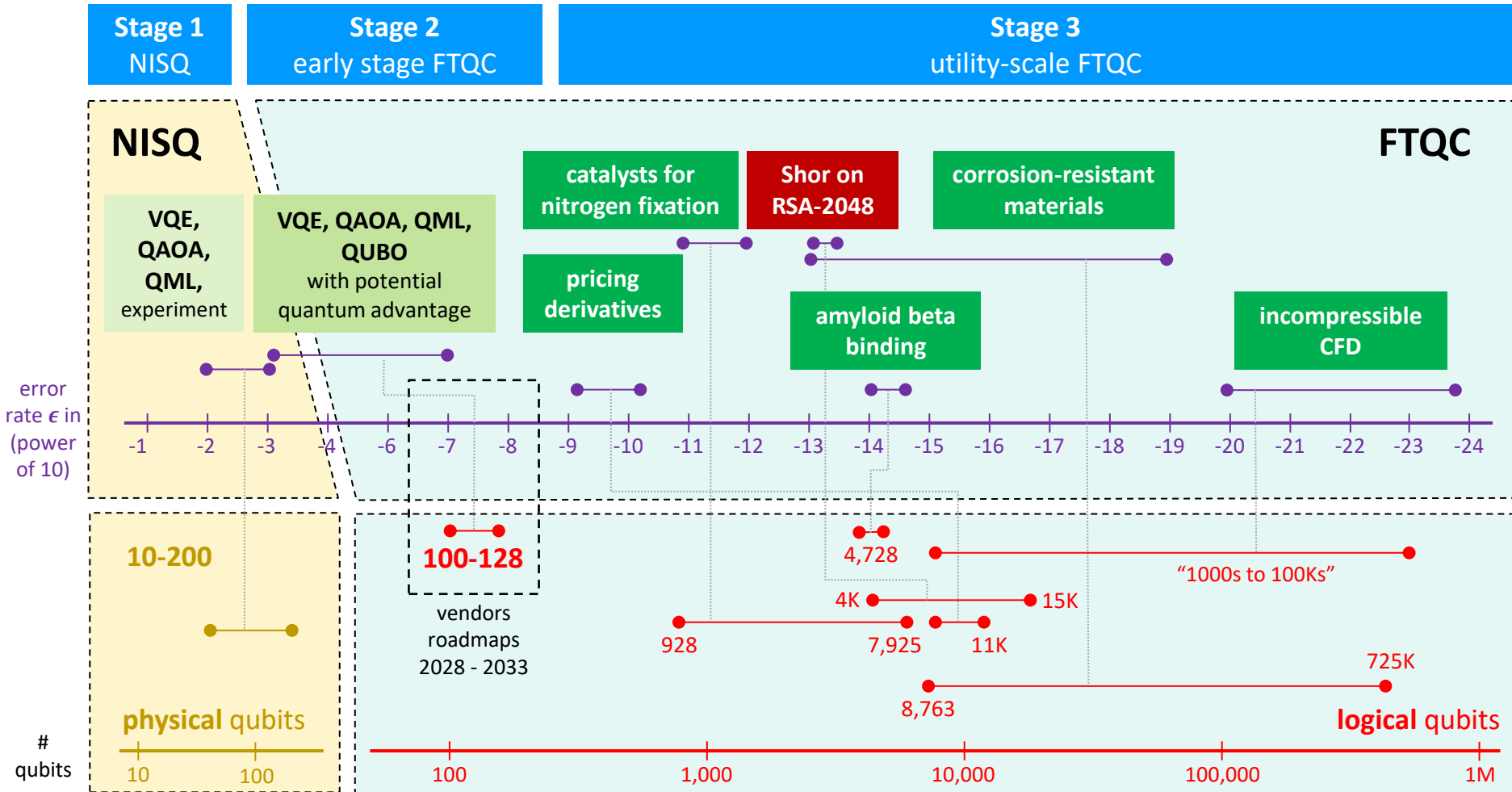
tolérance aux fautes
(FTQC)

- support de portes logiques.
- création d'états « magiques » (porte T).
- corriger les erreurs plus vite qu'elles n'apparaissent.
- éviter la propagation d'erreurs et leur amplification.
- corriger les erreurs corrélées, d'effacement, et de pertes.

mémoire quantique corrigée

dizaines à milliers de qubits physiques
par qubits logiques en fonction de
nombreux paramètres

FTQC: fault tolerant quantum computing



ventes et déploiements d'ordinateurs quantiques

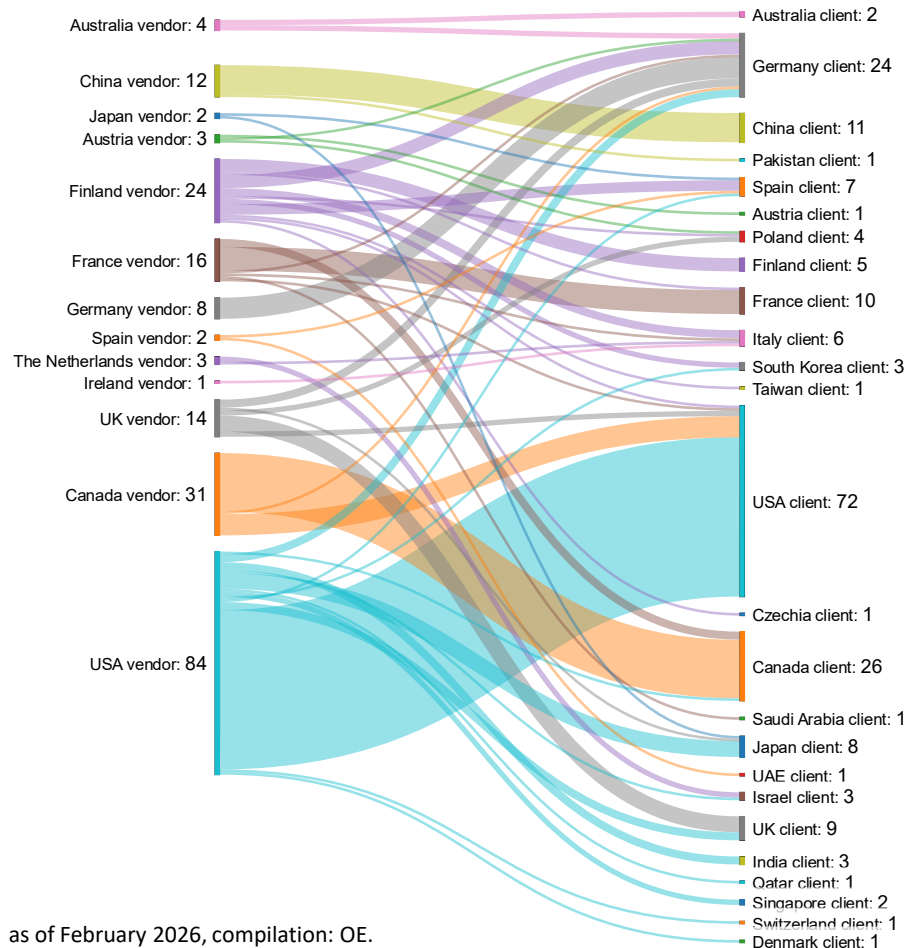


includes

- QPU sales to onprem customers.
- industry vendor self-hosted QPUs.
- includes retired systems for IBM.

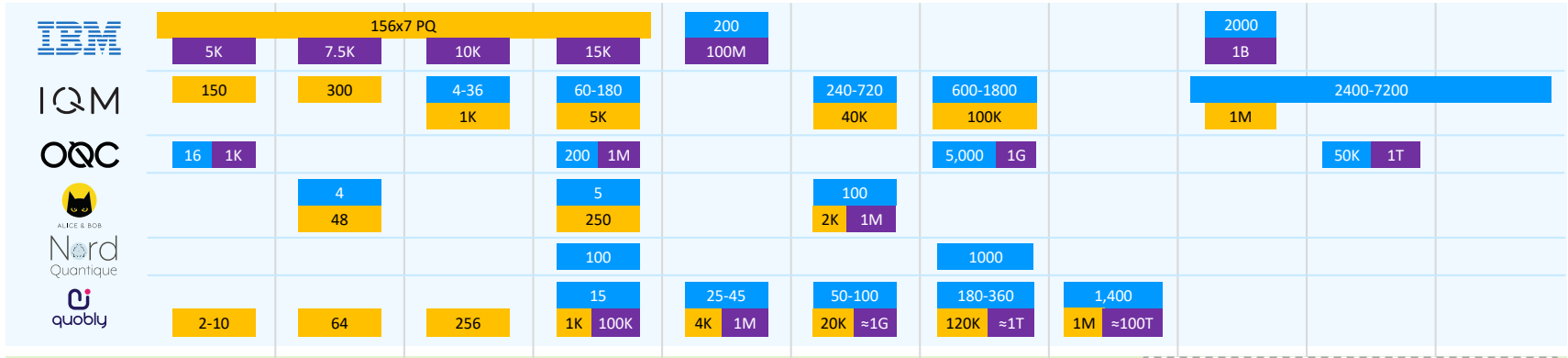
comments

- quantum systems of diverse sizes.
- most end-users are in the public sector.
- EU vendors not selling much in the USA.

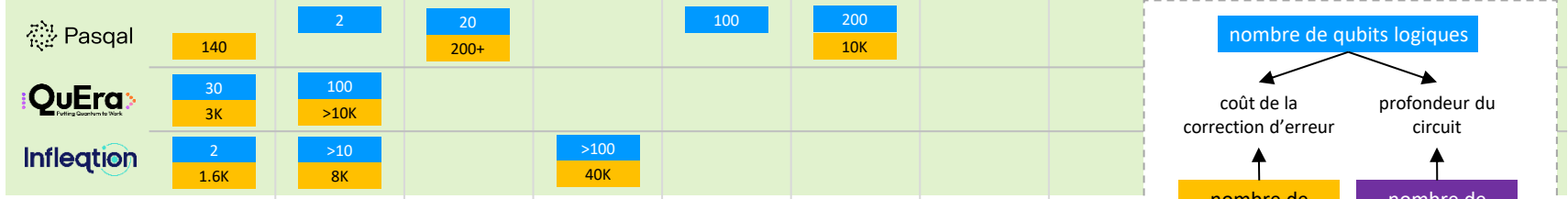


as of February 2026, compilation: OE.

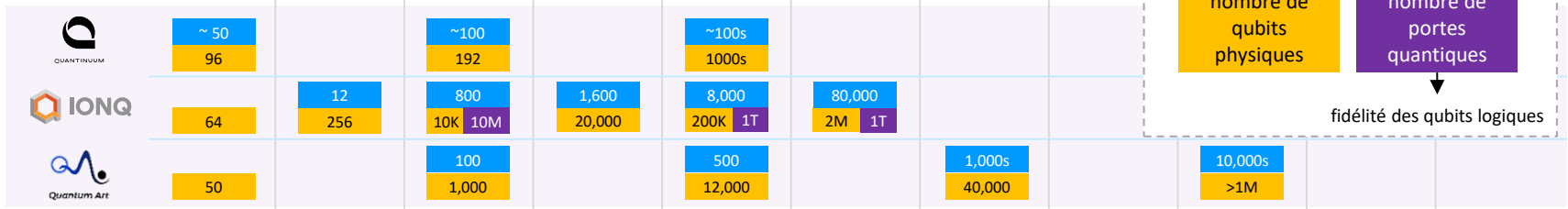
supraconducteurs



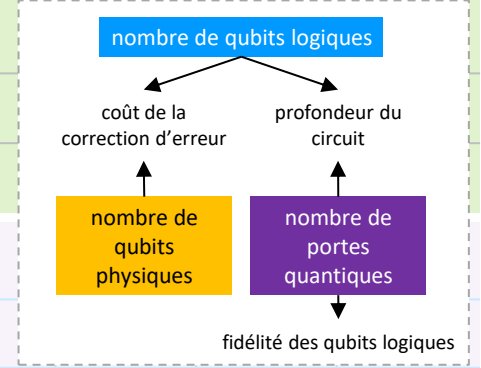
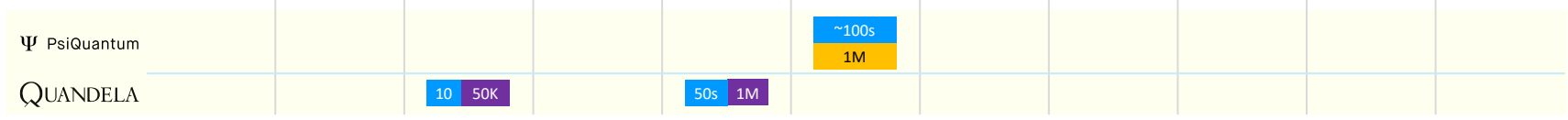
atomes froids



ions piégés



photons



(cc) Olivier Ezratty, Octobre 2025.

ordinateurs quantiques NISQ



Quandela Belenos,
12 qubits, 2 kW



Pasqal Orion Gamma, >140
qubits in analog mode, 3 kW



Quantum Helios, 98 qubits, 34 kW, uses
liquid helium cooling



AQT Marmot, 20
qubits, <2 kW

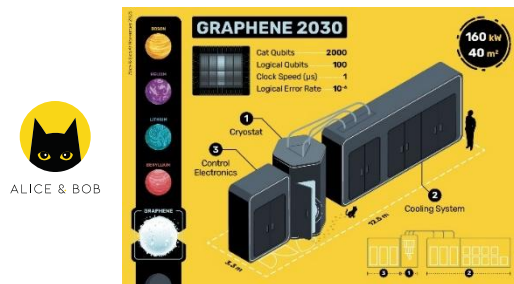


D-Wave Advantage 2, 4,400
qubits in analog mode, 12.5 kW



IBM System Two < 150 kW,
hosting three 156-qubit Heron processors

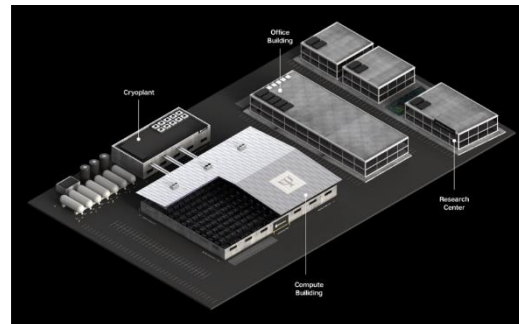
ordinateurs quantiques FTQC à venir



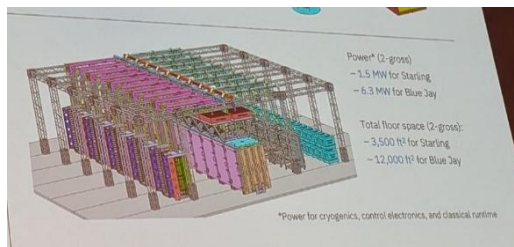
Alice&Bob @ Supercomputing December 2025, Graphene (100 LQ) = 160 kW



several 10s of MW for a couple hundred logical qubits, Christian Weedbrook (CEO) in February 2026



PsiQuantum power estimates at about 100 MW, 80 cabinets requiring 30W-100W cooling power at 4K

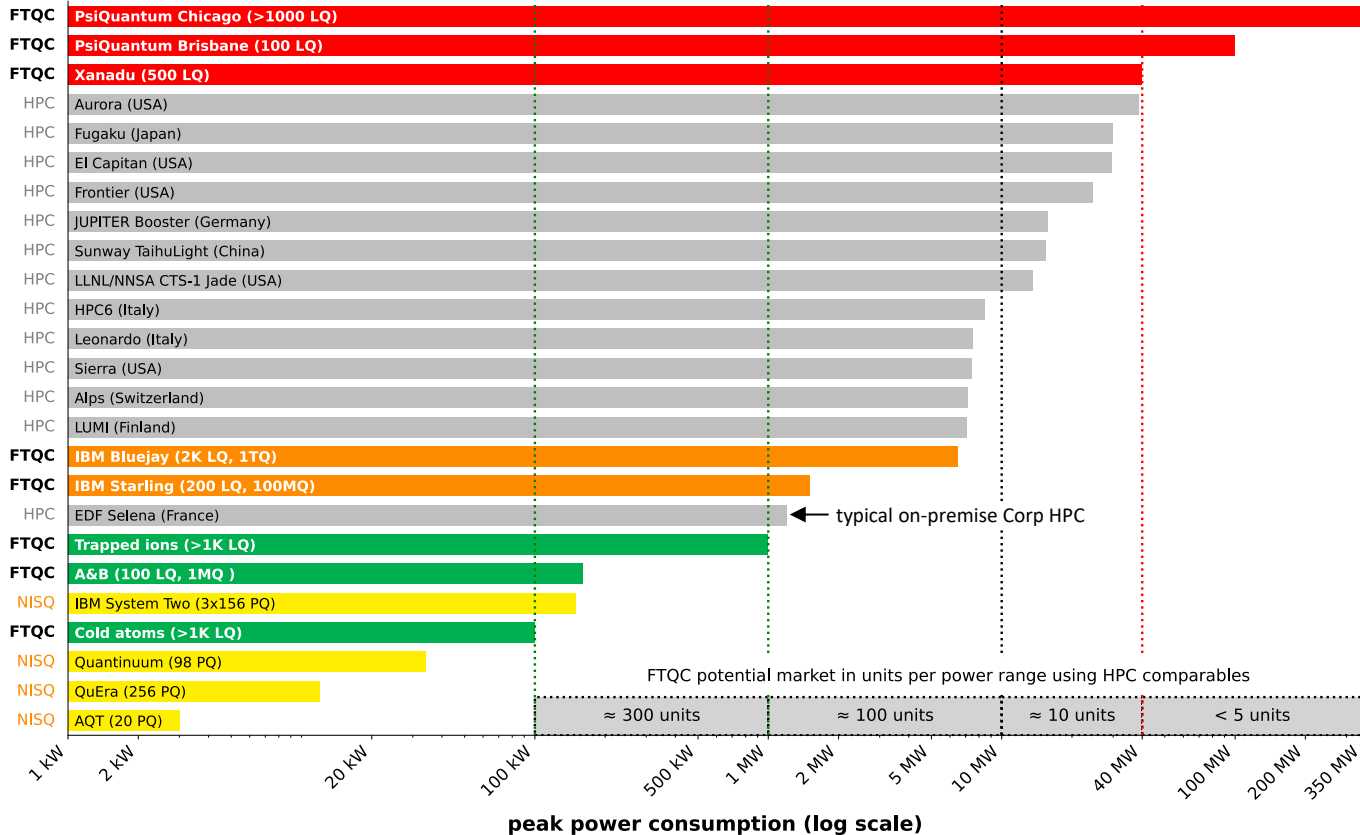


IBM @ Osaka, January 2026, Starling (200 LQ) = 1.5 MW, BlueJay (2K LQ) = 6.5MW



they expect to require < 1 MW to support 4K logical qubits

comparaison énergétique



#QEI

the quantum energy initiative

estimate base power for various FTQCs and actual for existing largest HPCs WW. HPC source: <https://www.top500.org/lists/top500/2025/11/>. FTQC sources: vendor data. Source: Olivier Ezratty, April 2026.

- NISQ: ordinateurs quantiques actuels limités.
- FTQC: ordinateurs quantiques futurs à même d'apporter un avantage Quantique aux entreprises.
- HPC: supercalculateurs actuels.

Q-Day?

WIRED



[QUANTIQUE]

Décideur entreprise

AVIS D'EXPERT – Q-Day : c'est maintenant !

22 décembre 2025

The Pinnacle Architecture: Reducing the cost of breaking RSA-2048 to 100 000 physical qubits using quantum LDPC codes

Paul Webster,* Lucas Berent, Omprakash Chandra, Evan T. Hockings,
Nouédyn Baspin, Felix Thomsen, Samuel C. Smith, and Lawrence Z. Cohen†
Iceberg Quantum, Sydney

The realisation of utility-scale quantum computing inextricably depends on the design of practical, low-overhead fault-tolerant architectures. We introduce the *Pinnacle Architecture*, which uses quantum low-density parity check (QLDPC) codes to allow for universal, fault-tolerant quantum computation with a spacetime overhead significantly smaller than that of any competing architecture. With this architecture, we show that 2048-bit RSA integers can be factored with less than one hundred thousand physical qubits, given a physical error rate of 10^{-3} , code cycle time of $1 \mu\text{s}$ and a reaction time of $10 \mu\text{s}$. We thereby demonstrate the feasibility of utility-scale quantum computing with an order of magnitude fewer physical qubits than has previously been believed necessary.

Code Cycle	Physical Error Rate	Physical Qubits for Runtime \leq			
		1 year	1 month	1 week	1 day
$1 \mu\text{s}$	10^{-3}	97 kq	98 kq	151 kq	471 kq
	10^{-4}	53 kq	53 kq	65 kq	149 kq
$10 \mu\text{s}$	10^{-3}	97 kq	223 kq	624 kq	3.8 Mq
	10^{-4}	53 kq	85 kq	184 kq	949 kq
$100 \mu\text{s}$	10^{-3}	198 kq	1.3 Mq	5.4 Mq	41 Mq
	10^{-4}	79 kq	359 kq	1.3 Mq	9.5 Mq
1 ms	10^{-3}	1.1 Mq	13 Mq	58 Mq	-
	10^{-4}	307 kq	3.1 Mq	14 Mq	128 Mq

assumptions

- bounded many-to-many qubit connectivity.
- 99.9% fidelities at scale.
- accounts for compiler optimizations.
- no problem with correlated errors.

la bataille du cloud a déjà démarré

emulation

quantum computing

hybrid
computing
centers



40 qubits

Qiskit on
your own
hardware

34-50 qubits

30 qubits

40 qubits

100 qubits (analog)

12 qubits

100 qubits (analog)

12 qubits

54 qubits

120, 127, 133
& 156 qubits

256 qubits (analog)

36 qubits

100 qubits (analog)

25-32 qubits

11 qubits

84 qubits

20 qubits

84 qubits

20 qubits

56 qubits



entreprises de l'offre quantique

computing



software



cybersecurity



sensing



cryogeny



electronics



photonics



manufacturing



materials



entreprises explorant des cas d'usage



energie, chimie, santé



IT & services cloud



services financiers



aérospatial et défense



transports





discussion



support de présentation