



AIDAS



ANR
AGENCE
NATIONALE
DE LA
RECHERCHE

université
PARIS-SACLAY

RobustSuperQ

PEPR quantique

Hardware quantique : état de l'art et enjeux

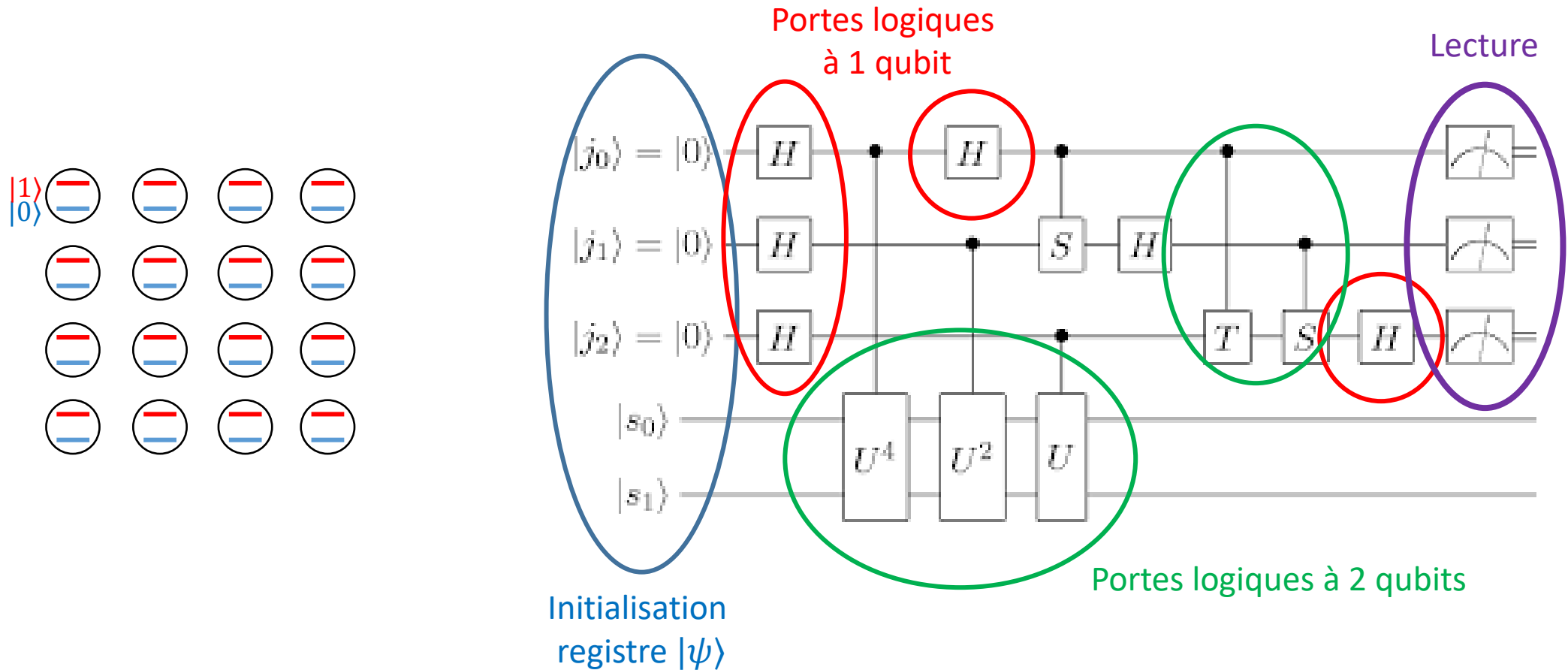
P. Bertet, Groupe Quantronique, SPEC, CEA Saclay
S. Mehr, Quandela

Calcul quantique, principe ...

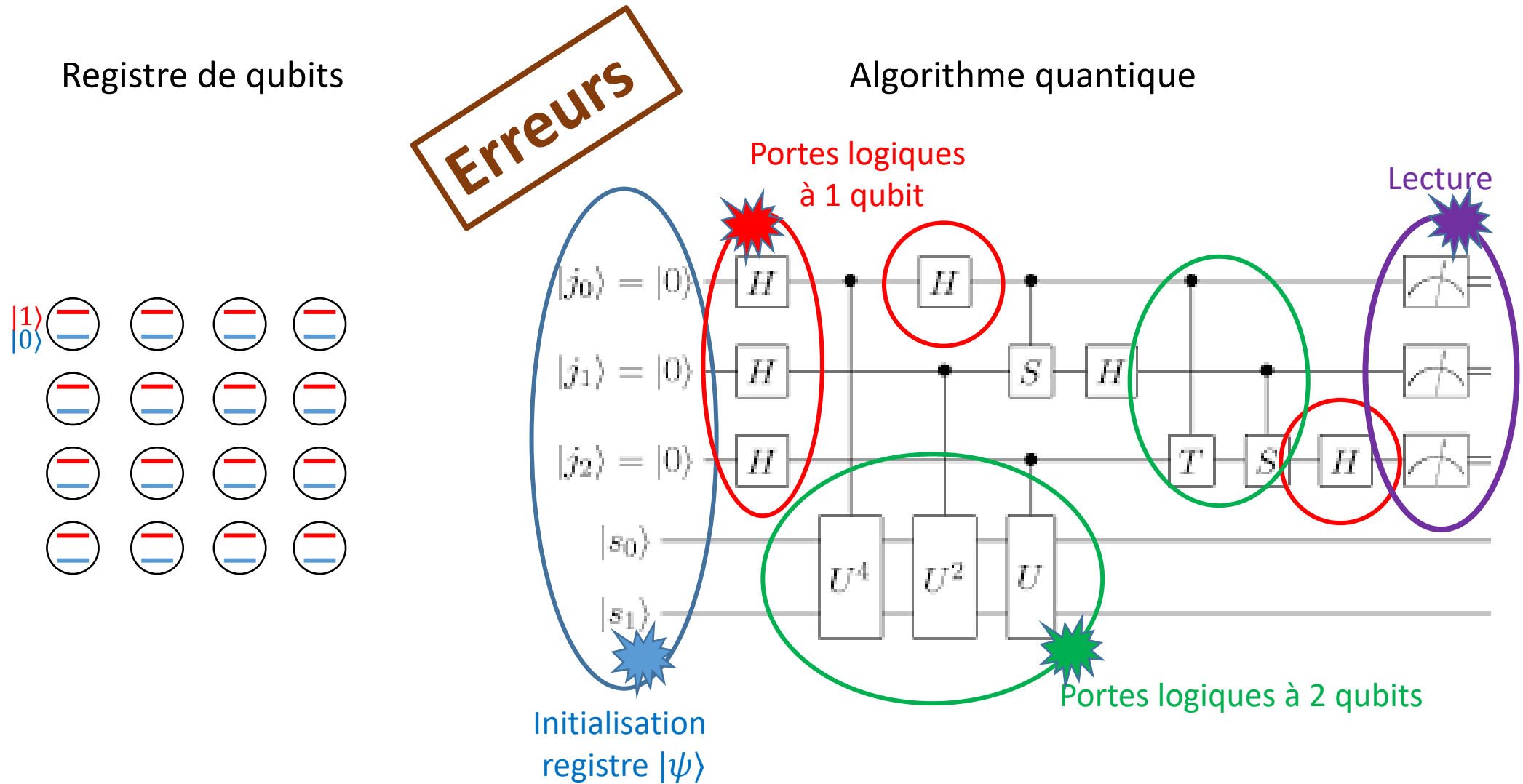
(restriction au modèle de calcul par porte logique)

Registre de qubits

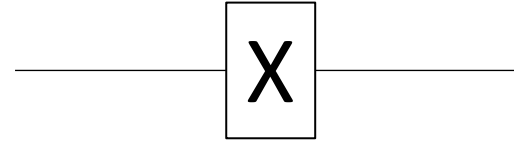
Algorithme quantique



Calcul quantique, principe ... et réalité



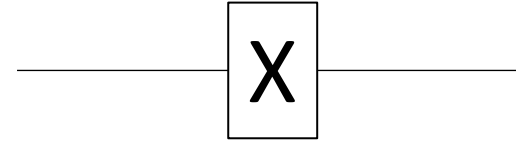
Implémentation physique d'une porte à 1 qubit



$$|0\rangle \longrightarrow |1\rangle$$

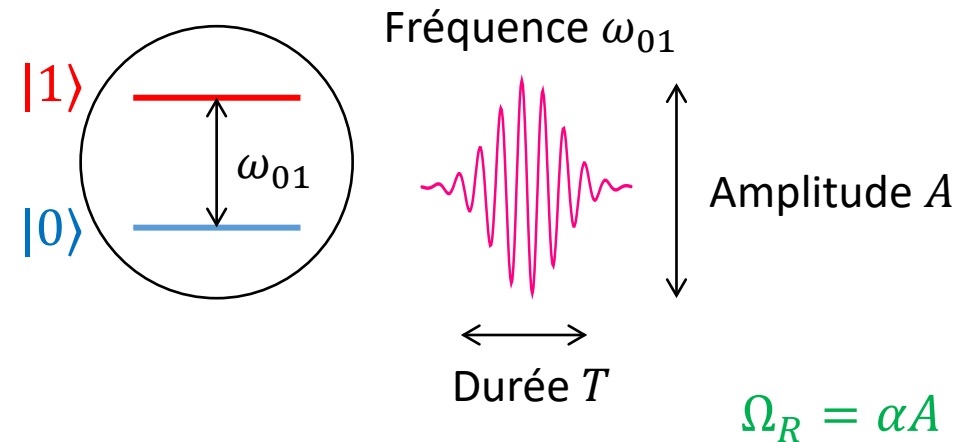
$$|1\rangle \longrightarrow |0\rangle$$

Implémentation physique d'une porte à 1 qubit



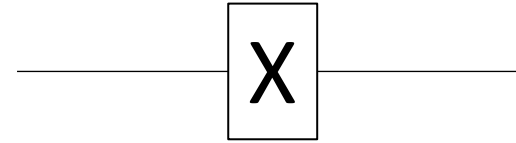
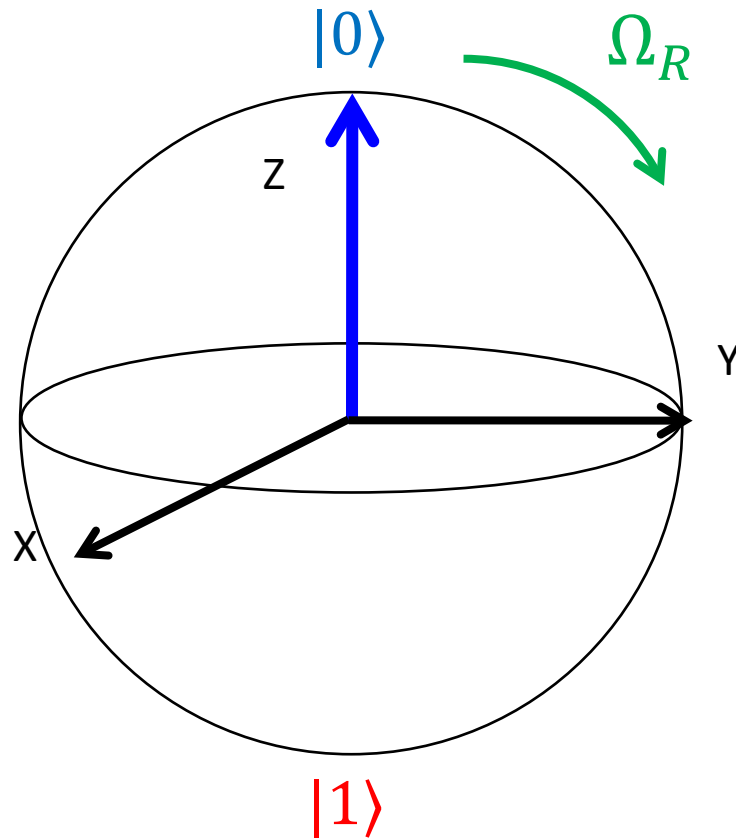
$$|0\rangle \longrightarrow |1\rangle$$

$$|1\rangle \longrightarrow |0\rangle$$



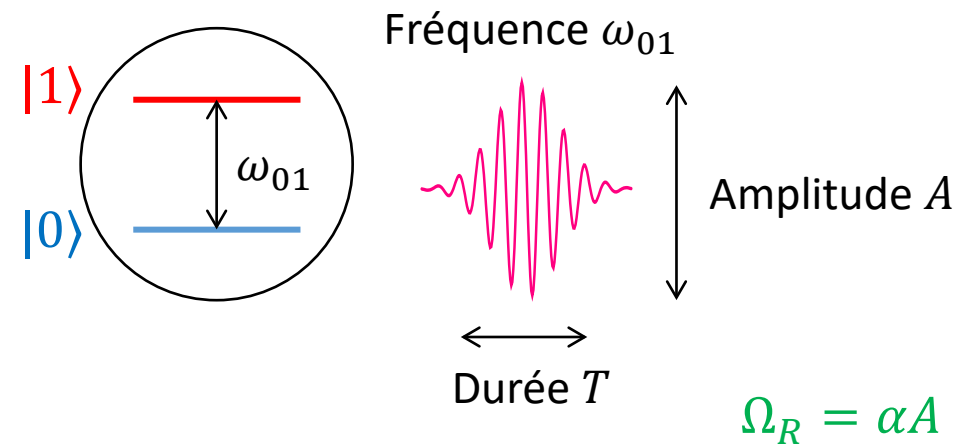
$$|\psi\rangle(T) = \cos\frac{\Omega_R T}{2} |0\rangle + \sin\frac{\Omega_R T}{2} |1\rangle$$

Implémentation physique d'une porte à 1 qubit



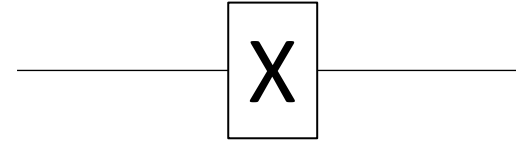
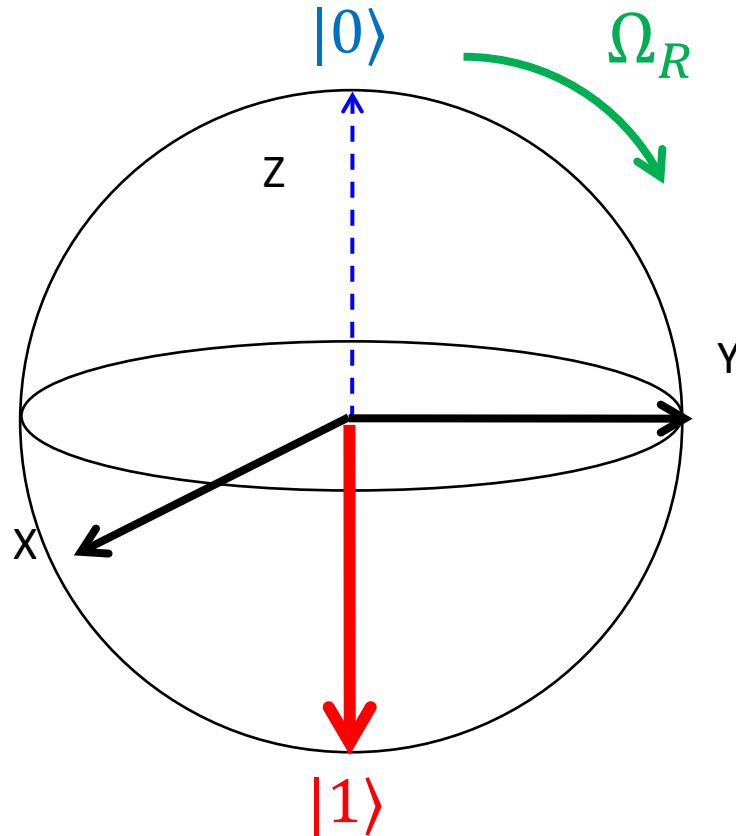
$$|0\rangle \longrightarrow |1\rangle$$

$$|1\rangle \longrightarrow |0\rangle$$

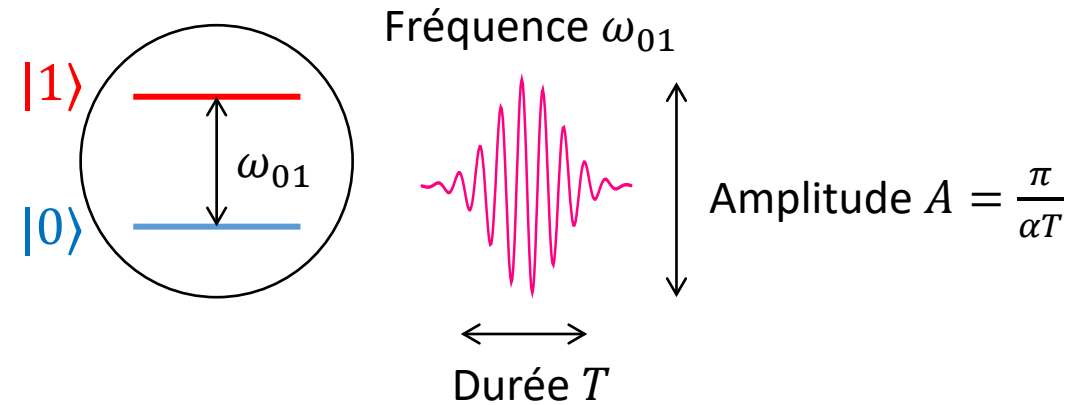


$$|\psi\rangle(T) = \cos\frac{\Omega_R T}{2} |0\rangle + \sin\frac{\Omega_R T}{2} |1\rangle$$

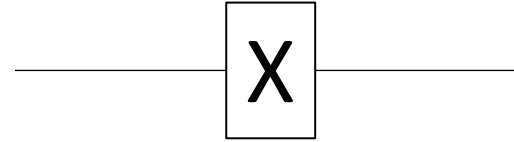
Implémentation physique d'une porte à 1 qubit



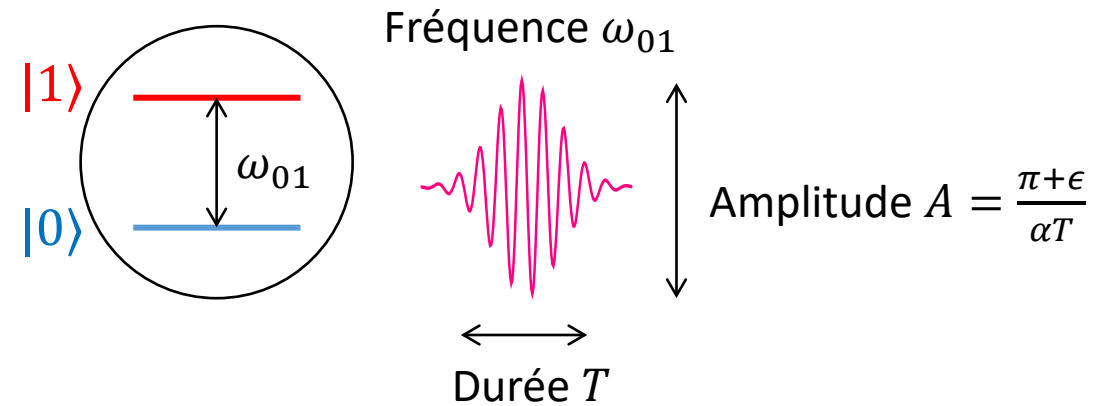
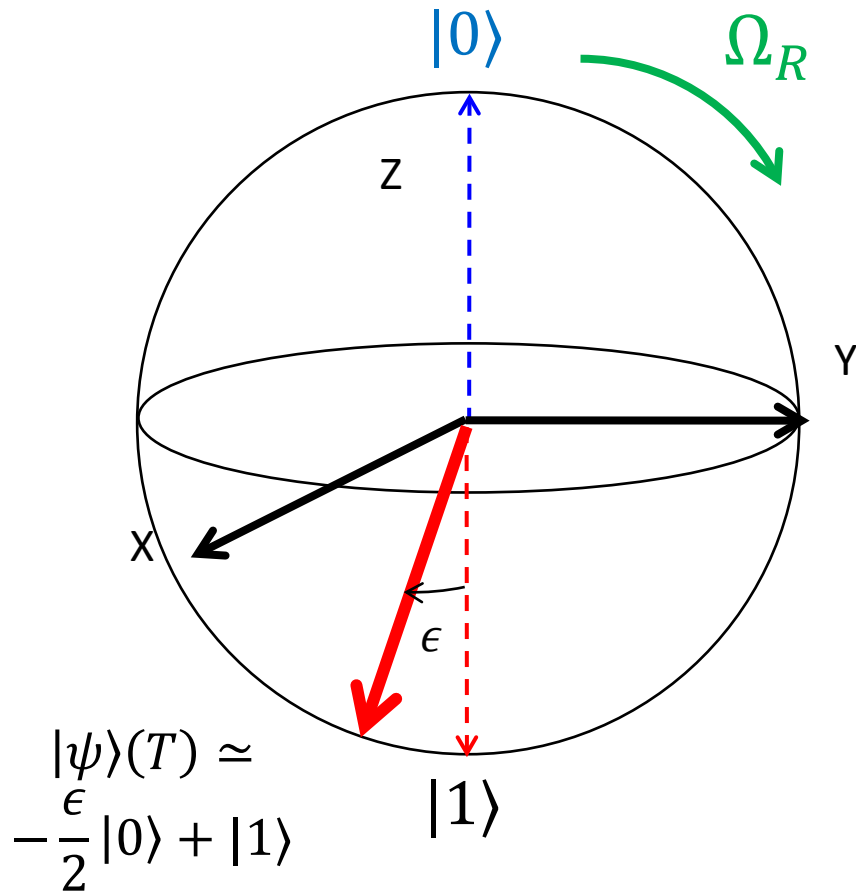
$$\Omega_R T = \pi$$



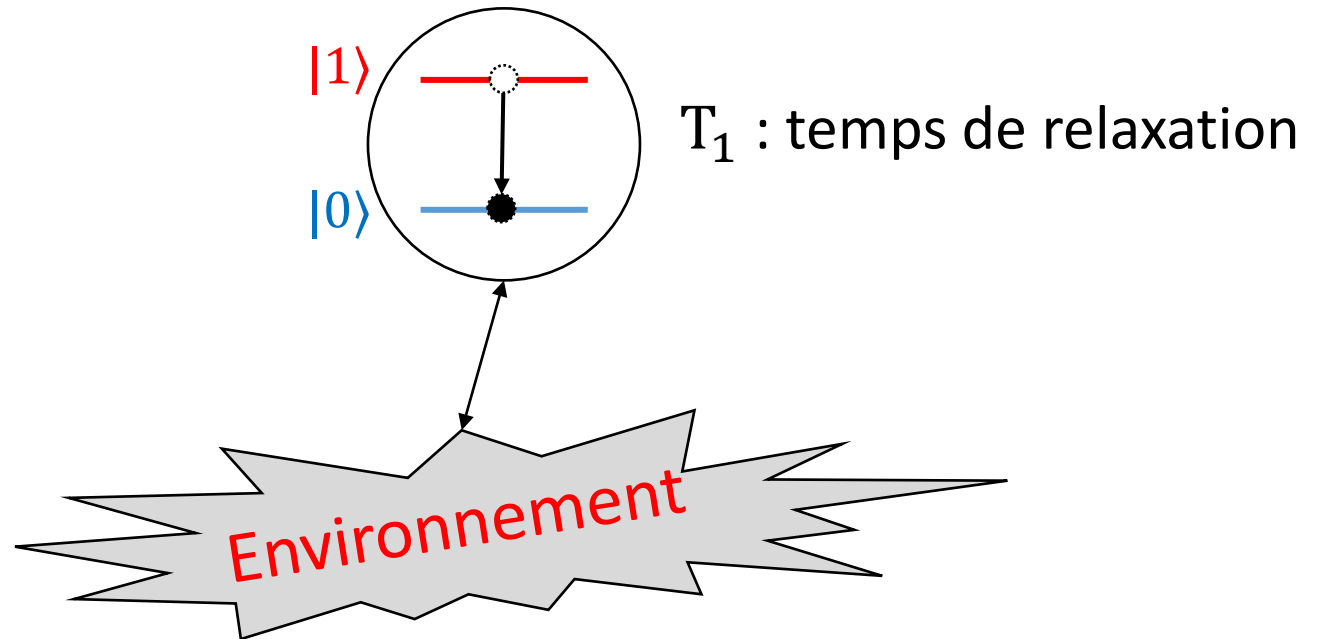
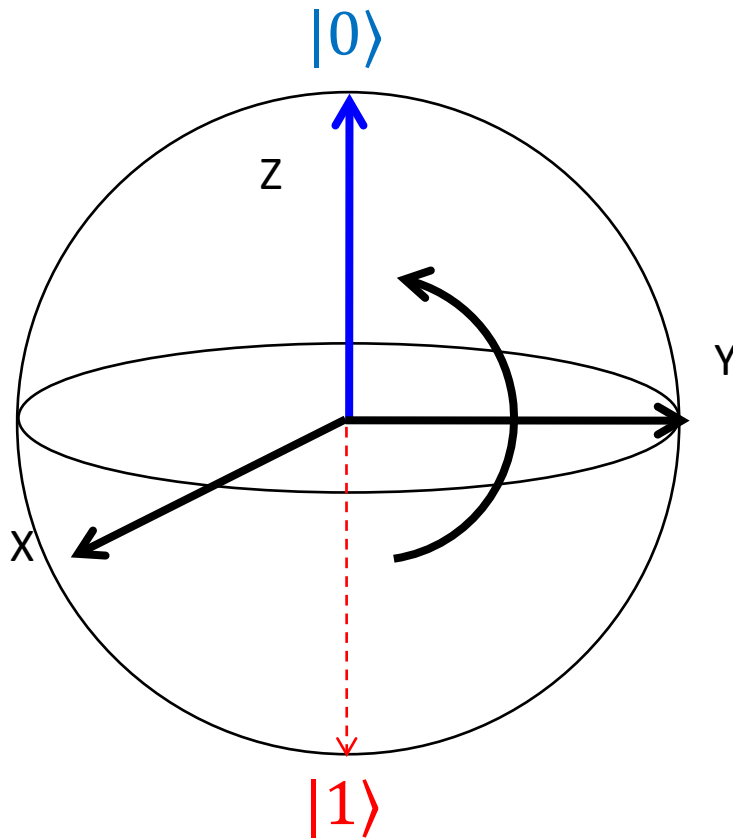
Erreurs cohérentes



Bruit ϵ sur l'amplitude de l'impulsion de contrôle

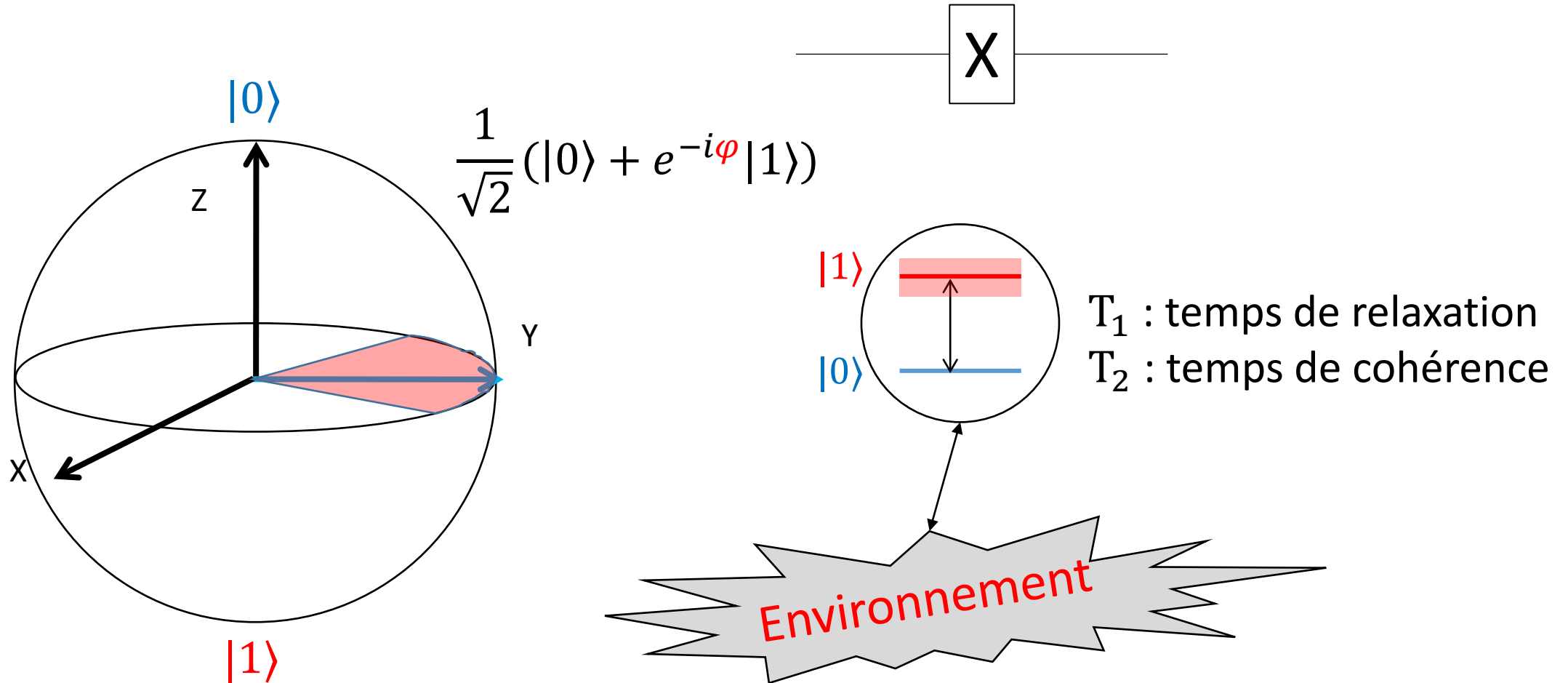


Erreurs incohérentes



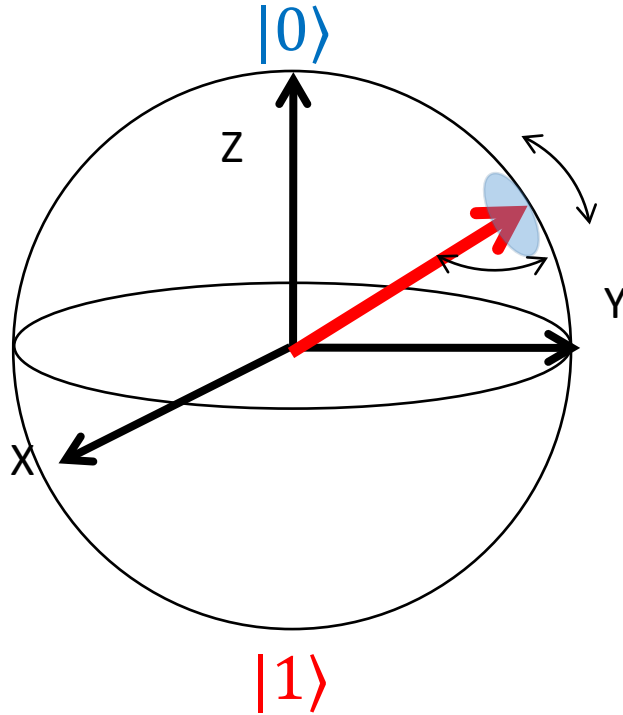
Probabilité d'erreur de type X $p_X \sim T/T_1$

Erreurs incohérentes

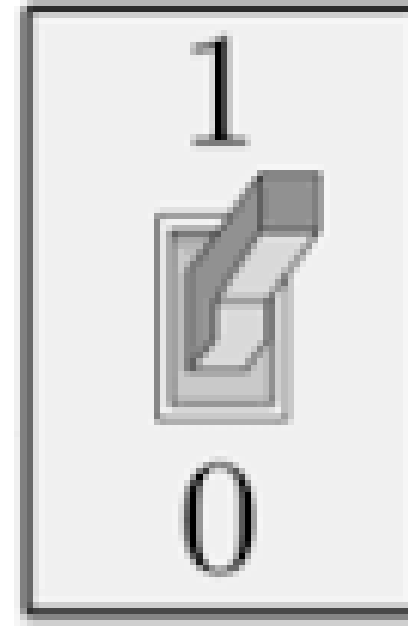


Probabilité d'erreur de type X $p_X \sim T/T_1$
Probabilité d'erreur de type Z $p_Z \sim T/T_2$

Bits quantiques / Bits classiques



- Erreurs sont intrinsèquement liées au caractère « continu », analogique, d'un qubit (p.ex, lien entre $|\psi\rangle$ et les impulsions de contrôle)
Semble « impossible » de faire mieux que $p_{x,z} \sim 10^{-6}$



- La bi-stabilité intrinsèque offre une protection exponentielle
Probabilité d'erreur par opération : $\sim 10^{-30}$ (?)

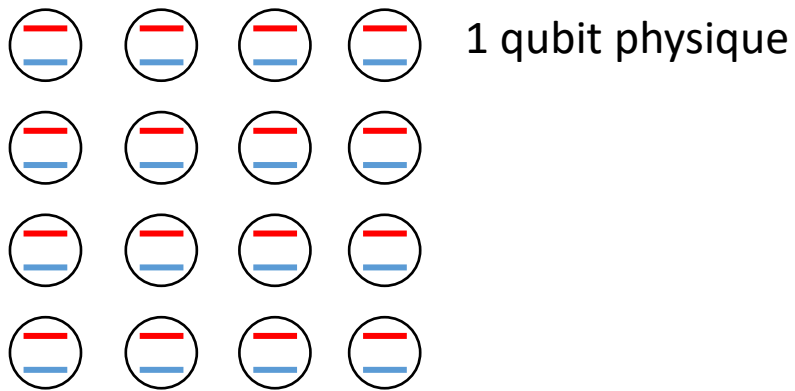
Le hardware, point faible du calcul quantique

- Les algorithmes intéressants nécessitent beaucoup de qubits et de portes logiques
Exemple : chimie quantique $\sim 10^3$ « qubits parfaits » (ou qubits logiques) et 10^{10} portes logiques

Von Burg et al., arXiv:2007.14460

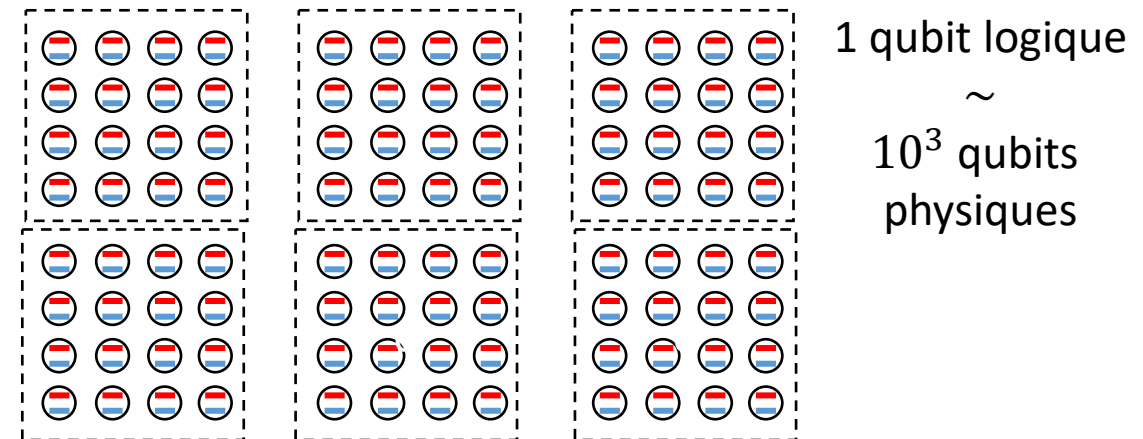
- Les qubits physiques actuels sont imparfaits. Erreur / porte logique $\sim 10^{-3}$, qui est très insuffisant

Machine imparfaite ou NISQ
(Noisy Intermediate Scale Quantum)



Est-ce utile ?

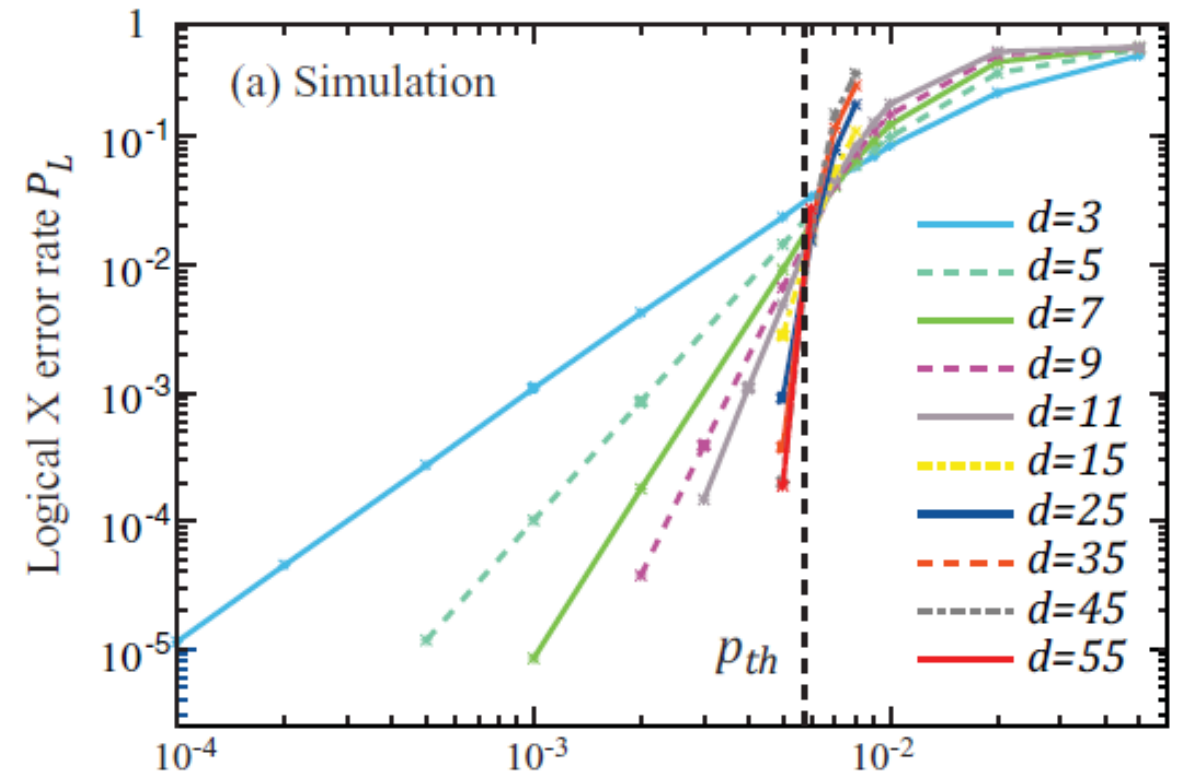
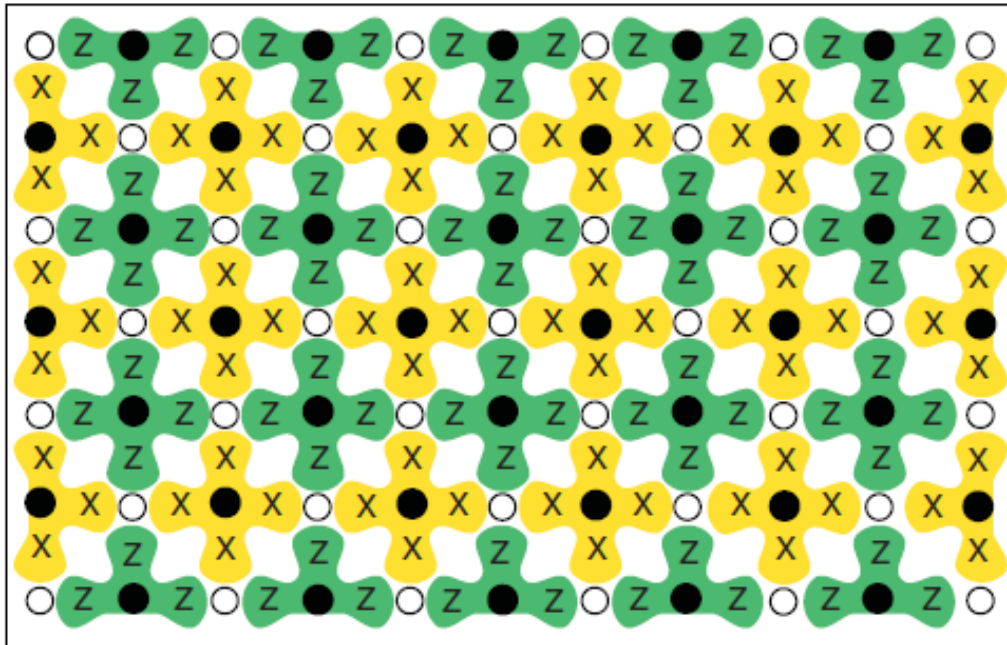
Machine tolérante aux erreurs
grâce à la correction d'erreurs quantique



Est-ce faisable ?

Le code de surface

1 qubit logique

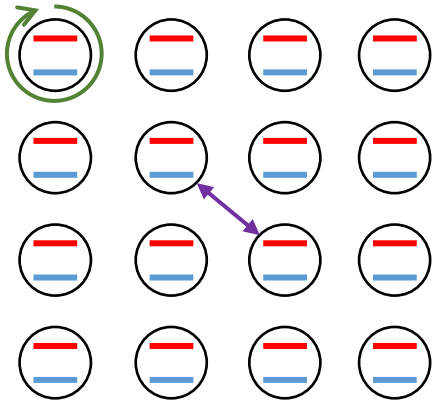


A. Fowler et al., PRA (2012)

Existence d'un seuil d'erreur par opération $p_{th} \sim 5 \cdot 10^{-3}$ au-delà duquel un qubit logique devrait être plus fiable que les qubits physiques utilisés.

Suppose un modèle d'erreurs indépendantes et non-corrélées

Les paramètres clé des qubits



Nombre ?

Taux d'erreur des **portes à 1 qubit** ?

Taux d'erreur des **portes à 2 qubits** ?

Taux d'erreur de l'initialisation ?

Taux d'erreur de la lecture ?

Mais aussi :

Taille physique ?

Vitesse de porte logique ?

Variabilité ?

Cross-talk ?

Contrôle à grande échelle ?

Connectivité ?

1) Qubits supraconducteurs

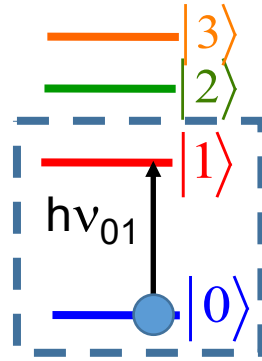
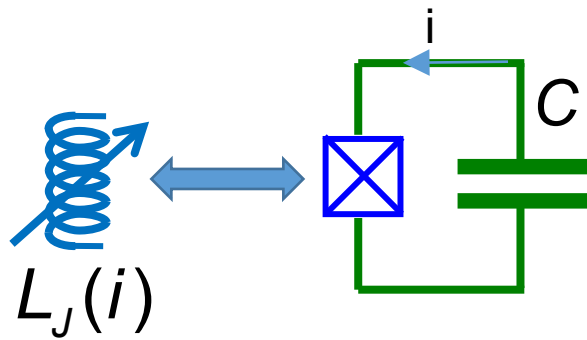
2) Qubits de spin

3) Ions piégés

+ Atomes neutres (cf Pasqal)

+ Photons (S. Mehr)

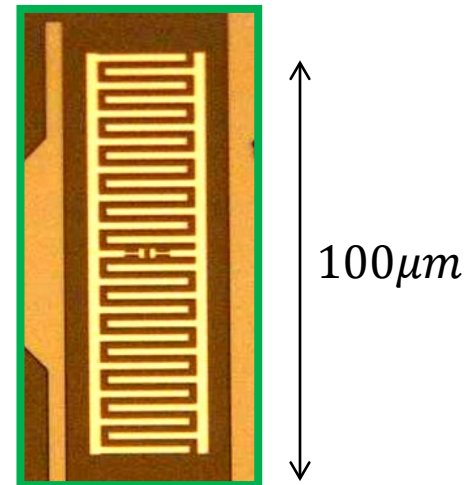
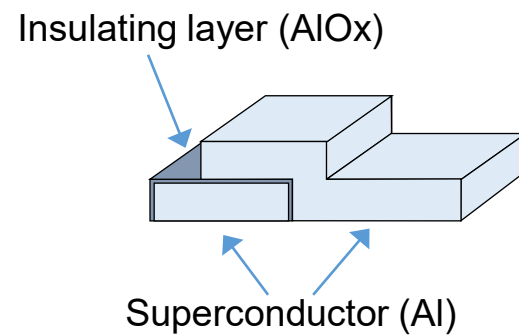
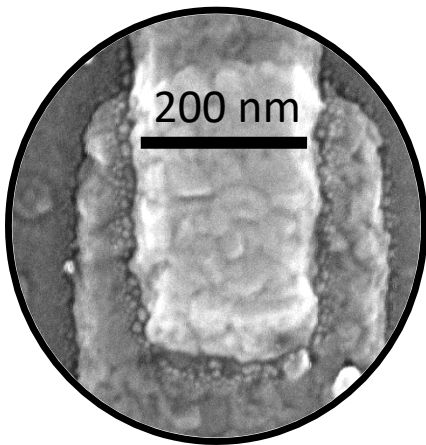
Qubits supraconducteurs : le transmon



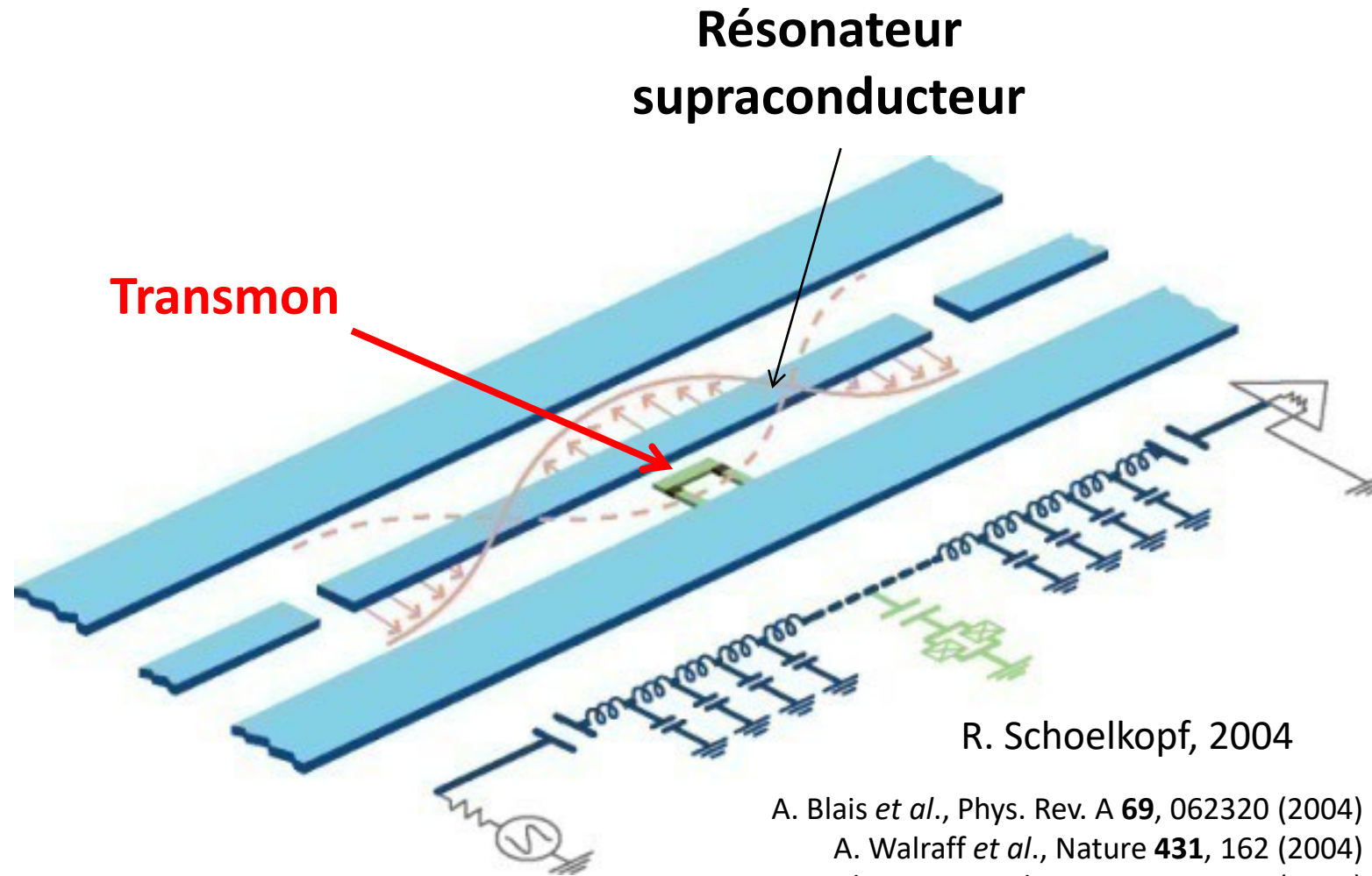
Pour initialisation dans $|0\rangle$,
nécessaire que $k_B T \ll h\nu_{01}$



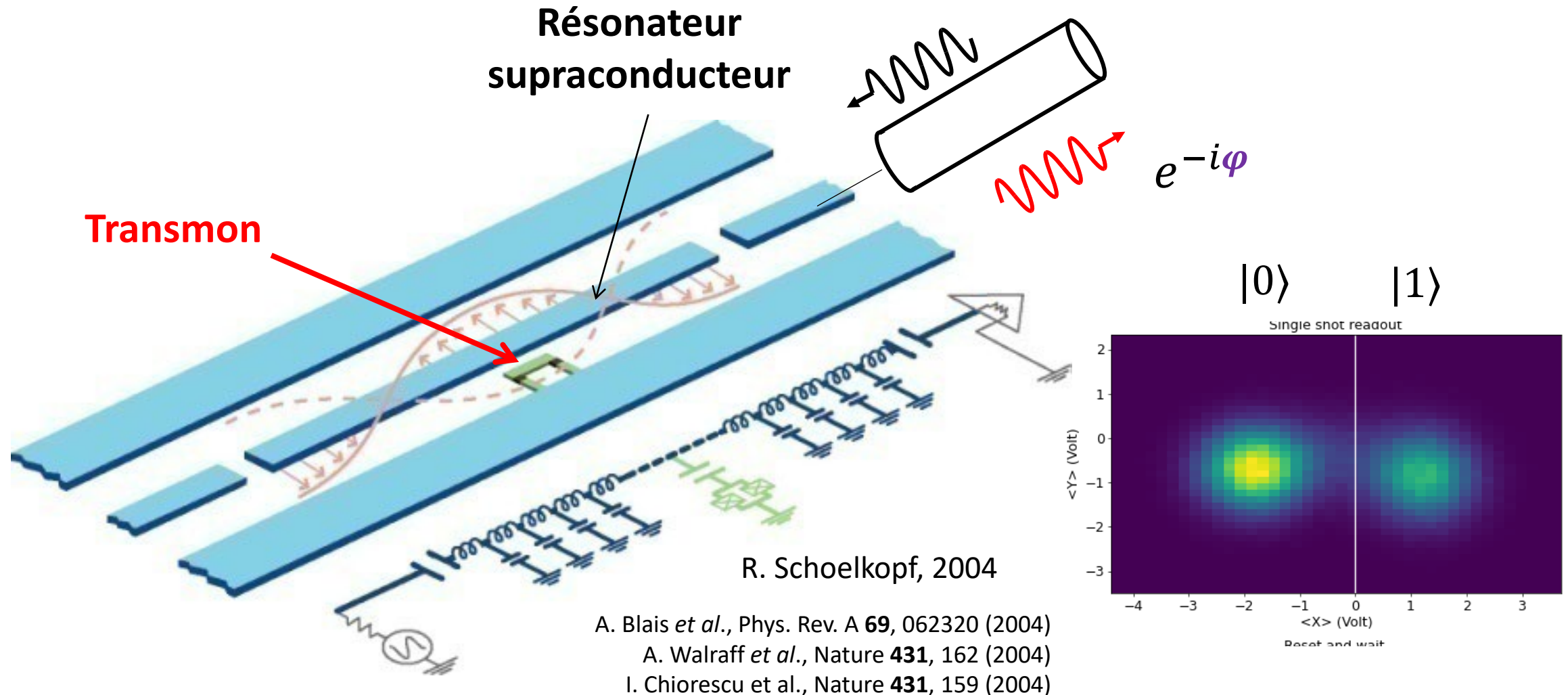
$$\nu_{01} \sim 5 - 10 \text{ GHz}$$
$$T = 10 \text{ mK}$$



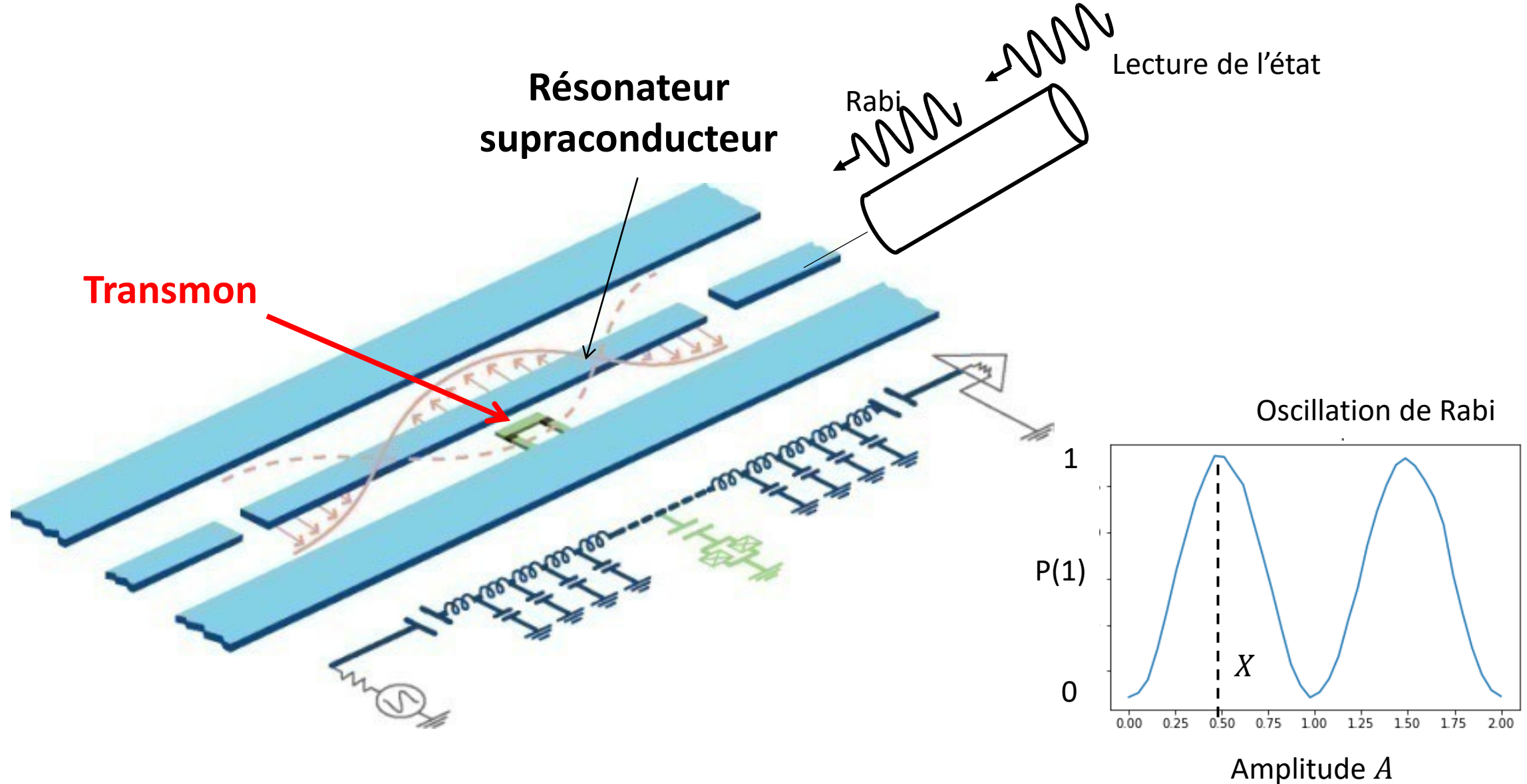
Qubits supraconducteurs : lecture



Qubits supraconducteurs : lecture



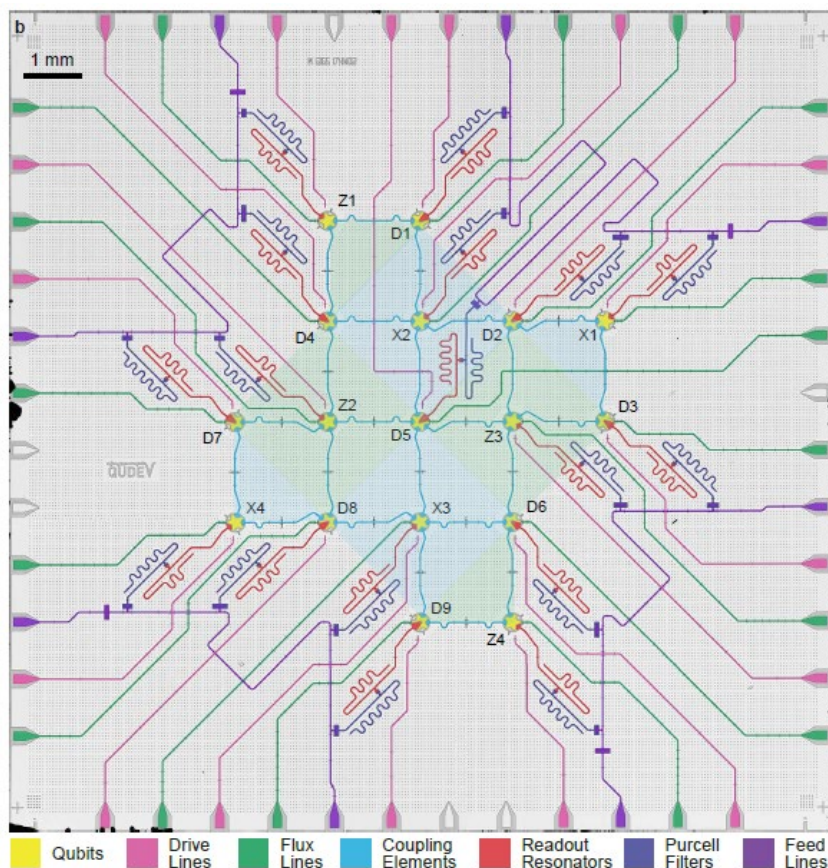
Qubits supraconducteurs : oscillation de Rabi



Qubits supraconducteurs : architecture des chips

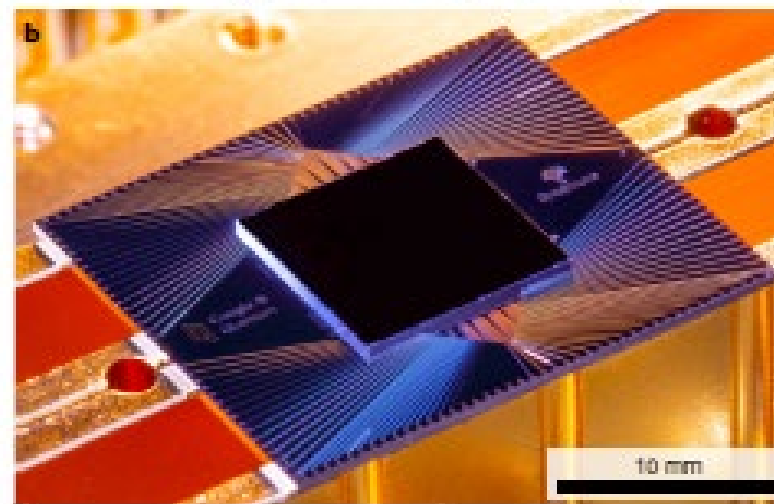
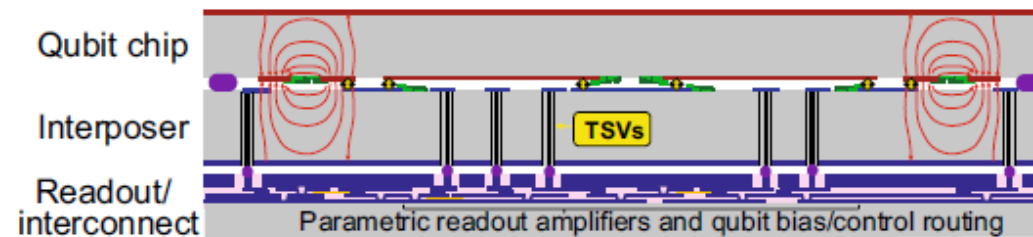
Connectivité : plus proches voisins. Bien adapté au Surface Code

2D chip : 17 qubits



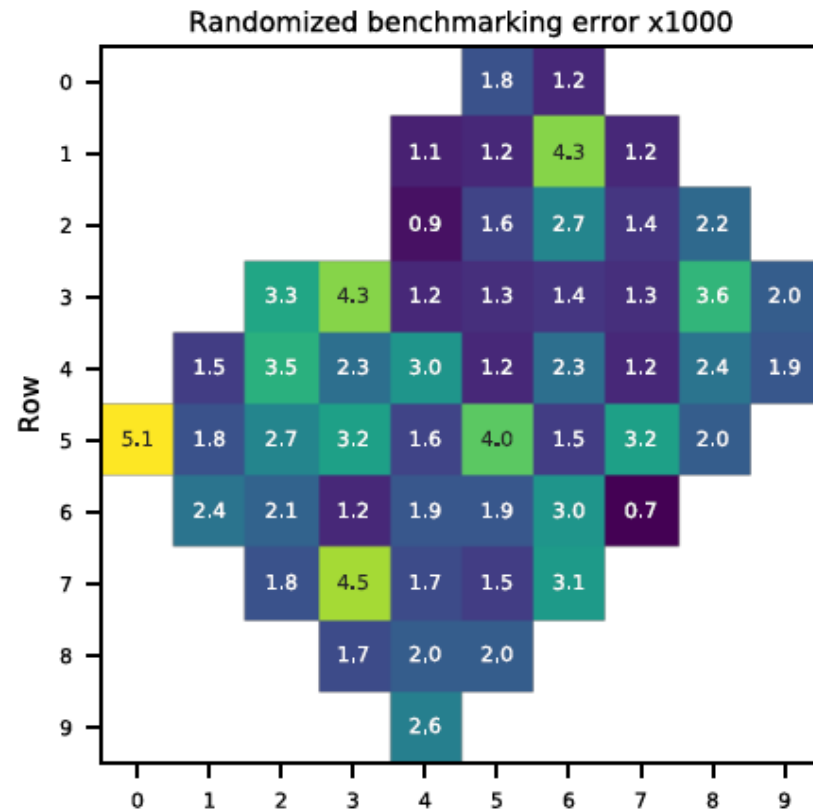
S. Krinner et al., arxiv (2021)
Wallraff group, ETHZ

3D integration : ~100 qubits démontrés

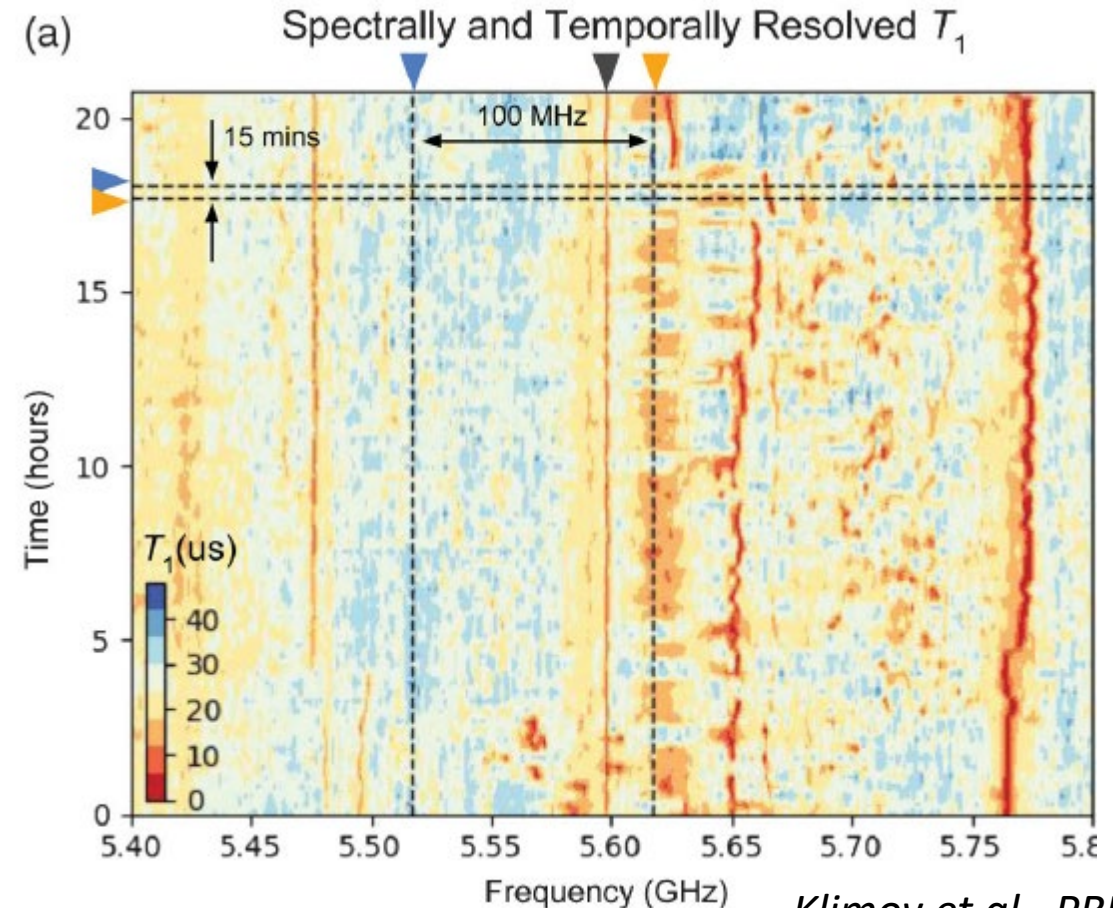


Rosenberg et al., NPJ (2017)
Arute et al., Nature (2019)

Qubits supraconducteurs : portes à 1 qubit



Arute et al., Nature (2019)

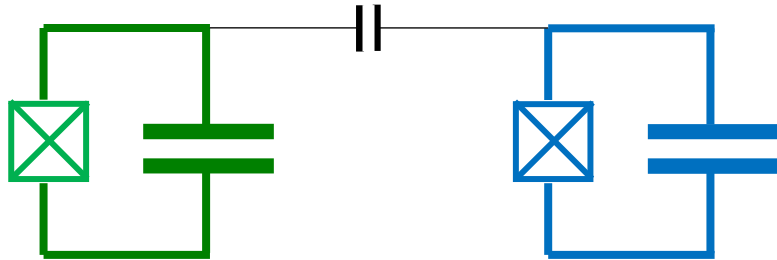


Klimov et al., PRL (2018)

- Principal obstacle : **Fluctuateurs à Deux Niveaux** (Two-Level Systems, TLS)
- Limitent le T_1 des qubits supraconducteurs jusqu'à maintenant à $T_1 \sim 100\mu s$
- 1-qubit erreur : $\sim 1 - 5 \cdot 10^{-3}$ pour durée de porte typique $\sim 10ns$

Qubits supraconducteurs : portes à 2 qubits

Couplage de 2 transmons
par interaction électrostatique



Acronym ^b	Layout ^c	First demonstration [Year]	Highest fidelity [Year]	Gate time
CZ (ad.)	T-T	DiCarlo et al. (72) [2009]	99.4% ^e Barends et al. (3) [2014]	40 ns
			99.7% ^e Kjaergaard et al. (73) [2020]	60 ns
\sqrt{i} SWAP	T-T	Neeley et al. (81) ^d [2010]	90% ^g Dewes et al. (74) [2014]	31 ns
CR	F-F	Chow et al. (75) ^h [2011]	99.1% ^e Sheldon et al. (5) [2016]	160 ns
\sqrt{b} SWAP	F-F	Poletto et al. (76) [2012]	86% ^g Poletto et al. (76) [2012]	800 ns
MAP	F-F	Chow et al. (77) [2013]	87.2% ^g Chow et al. (75) [2011]	510 ns
CZ (ad.)	T-(T)-T	Chen et al. (55) [2014]	99.0% ^e Chen et al. (55) [2014]	30 ns
RIP	3D F	Paik et al. (78) [2016]	98.5% ^e Paik et al. (78) [2016]	413 ns
\sqrt{i} SWAP	F-(T)-F	McKay et al. (79) [2016]	98.2% ^e McKay et al. (79) [2016]	183 ns
CZ (ad.)	T-F	Caldwell et al. (80) [2018]	99.2% ^e Hong et al. (6) [2019]	176 ns
CNOT _L	BEQ-BEQ	Rosenblum et al. (13) [2018]	~99% ^f Rosenblum et al. (13) [2018]	190 ns
CNOT _{T-L}	BEQ-BEQ	Chou et al. (82) [2018]	79% ^g Chou et al. (82) [2018]	4.6 μ s

*M. Kjaergaard, Annual Review of
Cond. Matt (2020)*

Portes à 2 qubits plus longues ($\sim 50 - 100$ ns) \longrightarrow erreur $\sim 10^{-2}$

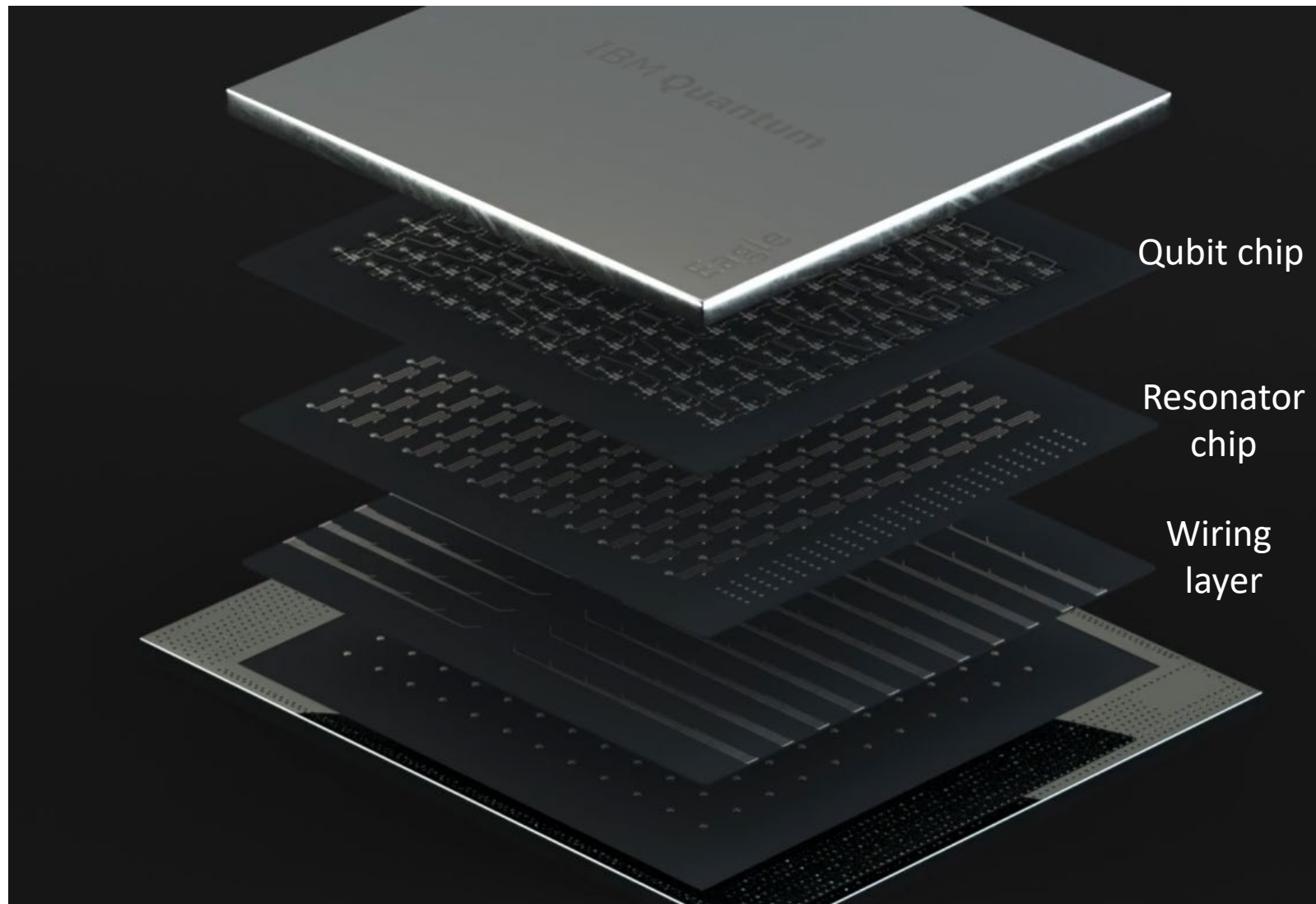
IBM

Google

rigetti

IQM

Qubits supraconducteurs : architecture des chips

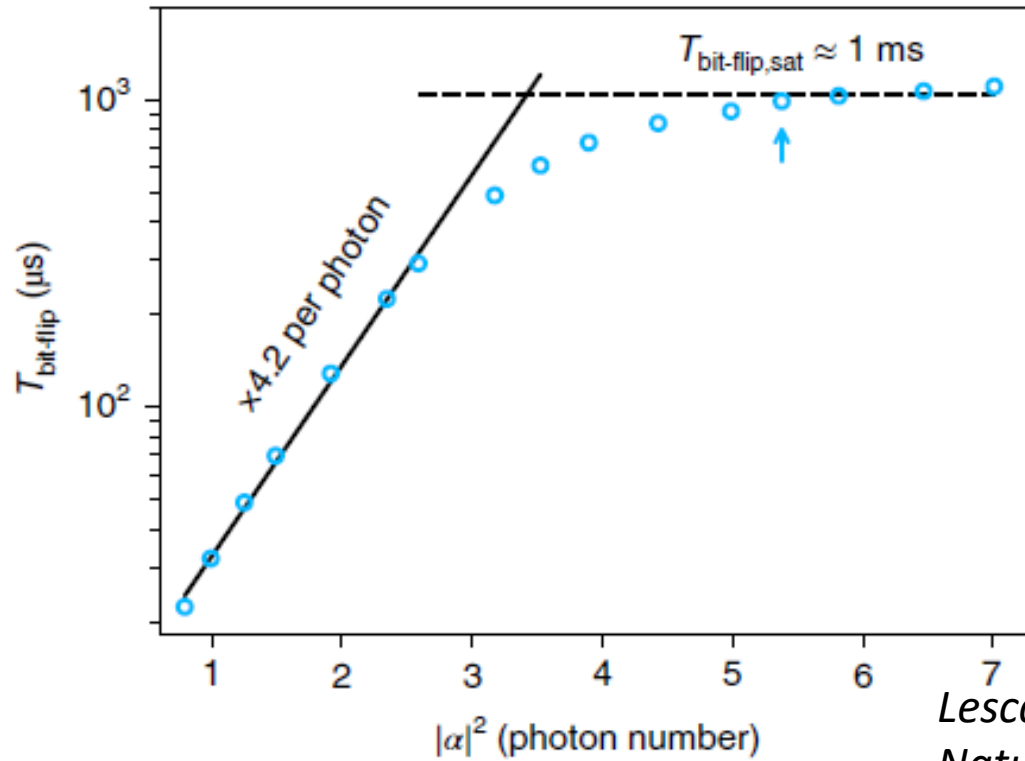
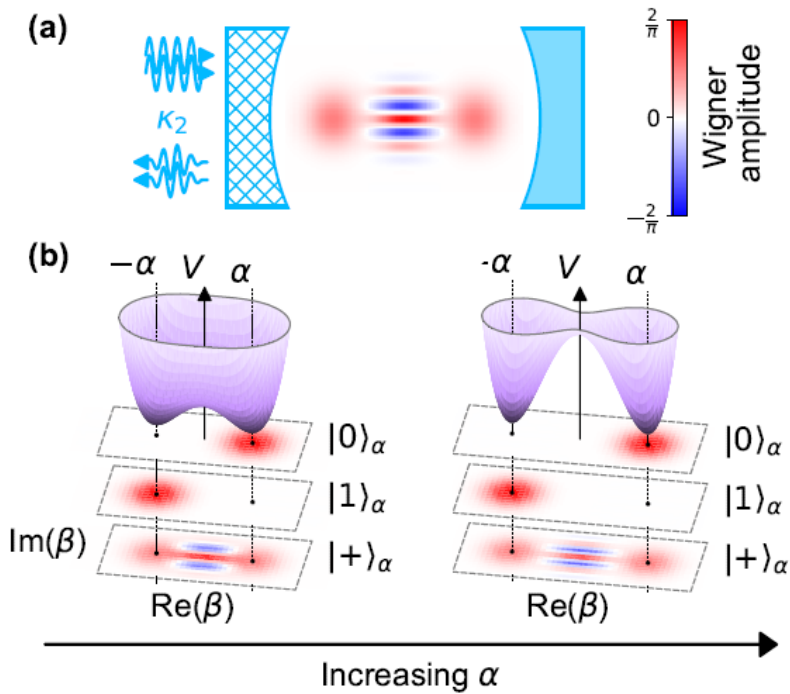


IBM Eagle
127 qubits

Temps de cohérence
 $\sim 200\mu s$

pour tous les qubits

Qubits supraconducteurs : Qubits de chat de Schrödinger



Lescanne et al.,
Nature Phys (2020)

- Qubit encodé par un état « chat de Schrödinger » dans un résonateur, généré par un qubit
- Propriété clé : insensible aux erreurs à 1 qubit de type X , seulement de type Z

➡ Correction d'erreurs plus aisée



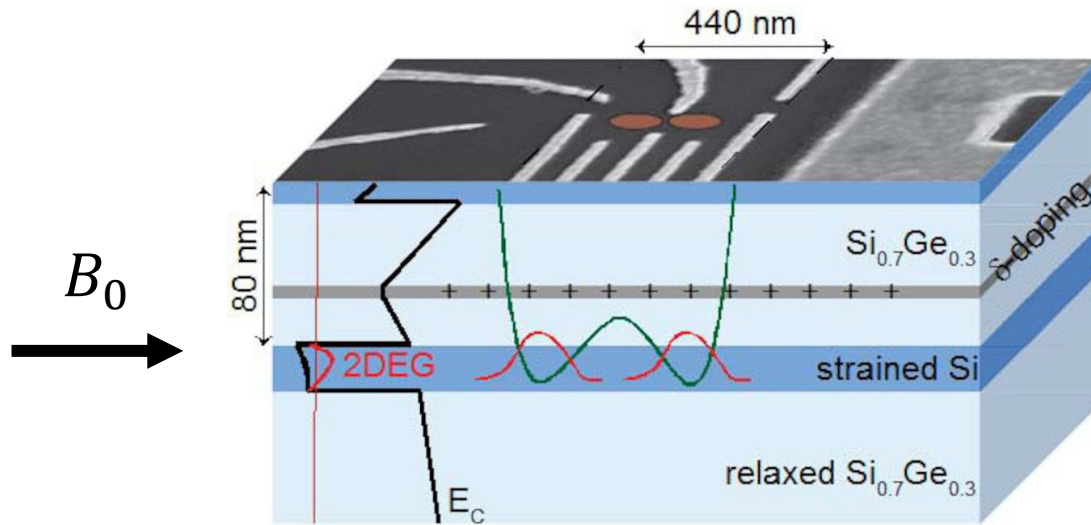
ALICE & BOB



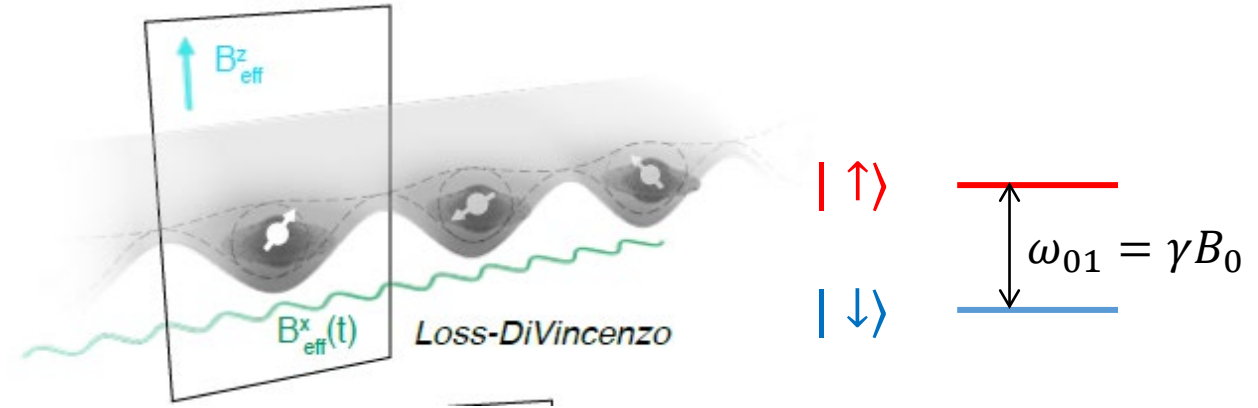
Qubits supraconducteurs : considérations (subjectives)

- « Techniques » : circuits supraconducteurs, cryogénie, micro-ondes ultra-bas-bruit
- Diminuer les taux d'erreur est impératif et nécessite des progrès sur la fabrication / les matériaux (Systèmes à Deux Niveaux). Aussi, questions fondamentales ouvertes : rayons cosmiques ? ...
- Recherche active pour développer des designs alternatifs au transmon
- Machines « NISQ » à 100 transmons disponibles / avenir proche. Utilité pour résoudre des problèmes non prouvée aujourd'hui, mais la qualité progresse.
- Premières démonstrations de correction d'erreur
- Enjeu futur lointain majeur : machine tolérante aux erreurs. Comment intégrer 10^6 qubits supras ? Personne ne le sait.

Spin dans les Boîtes Quantiques Semiconductrices : Physique



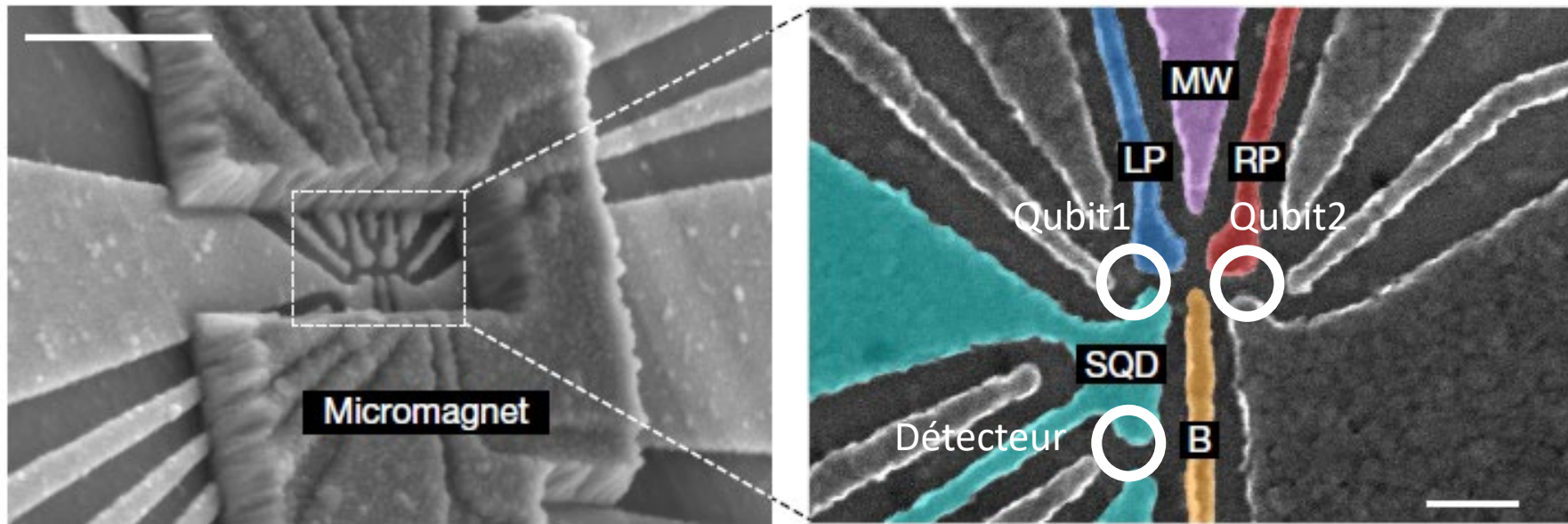
Groupe de H. Bluhm, Aachen



- Exemple de boîte quantique dans une hétérostructure de SiGe / Si / SiGe
- Un électron peut être piégé dans chaque dot en ajustant les potentiels de grille
- Le spin de cet électron peut être utilisé pour le calcul quantique
- $B_0 \sim 1T \longrightarrow$ Fréquence $\sim 10\text{GHz}$

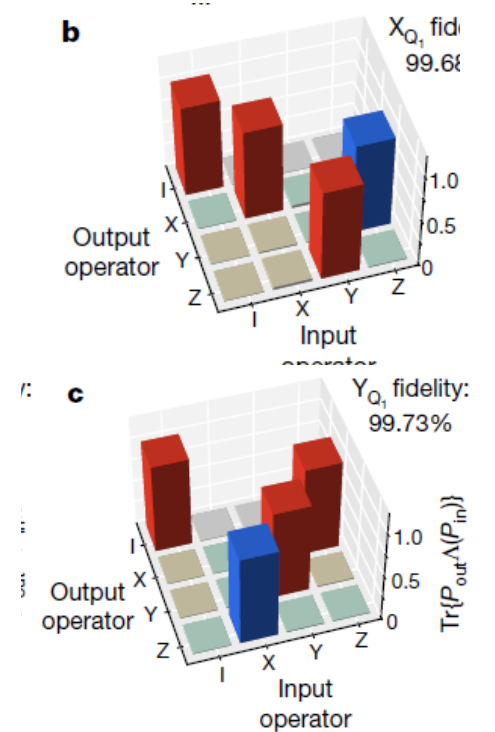
➡ Cryogénie nécessaire (température 10mK – 1K)

Spin dans les Boîtes Quantiques Semiconductrices : Opérations



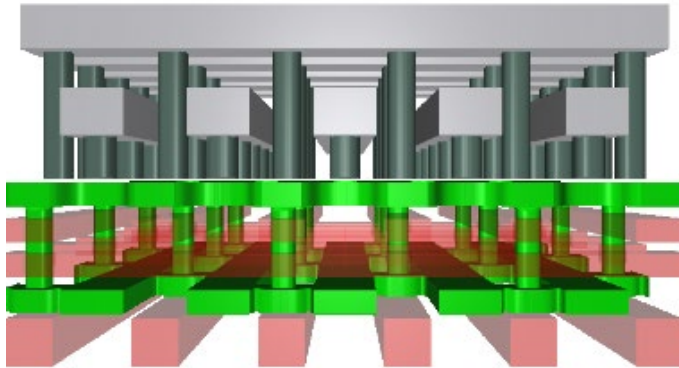
X. Xue, Nature (2021)

Groupe de L. Vandersypen, Delft

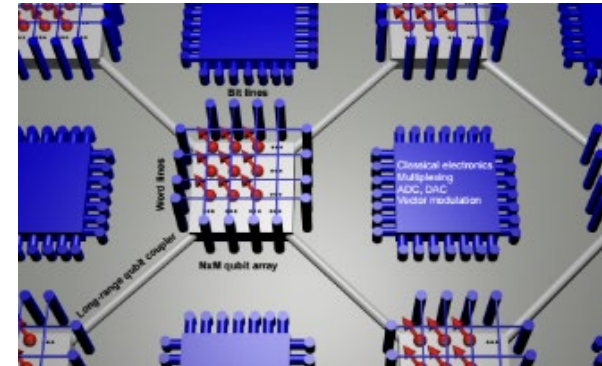


- Détection de l'état du qubit de spin par conversion spin \rightarrow charge suivie d'une mesure de charge
- Porte à 1 qubit par champ électrique oscillant en présence d'un micro-aimant
- Porte à 2 qubits par interaction d'échange contrôlée par une tension de grille
- Erreur/portes : $p \sim 0.3 - 1 \cdot 10^{-2}$; durée $\sim 10 - 100$ ns. Pour faible taux d'erreur : nécessaire de supprimer les spins nucléaires de ^{29}Si (abondance naturelle 4.7%) donc utiliser un substrat enrichi en ^{28}Si

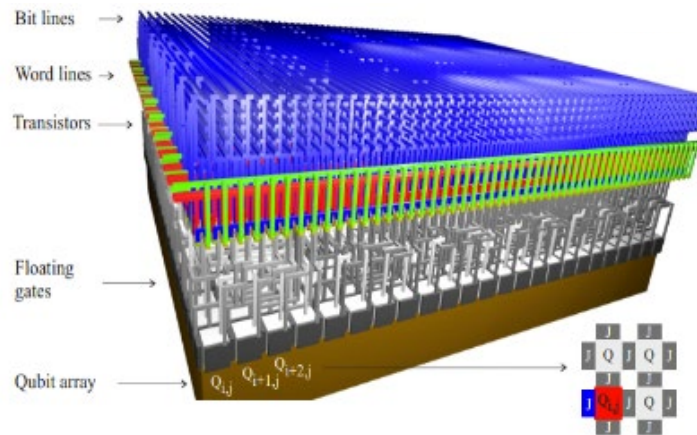
Spin dans les Boîtes Quantiques Semiconductrices : Architectures proposées



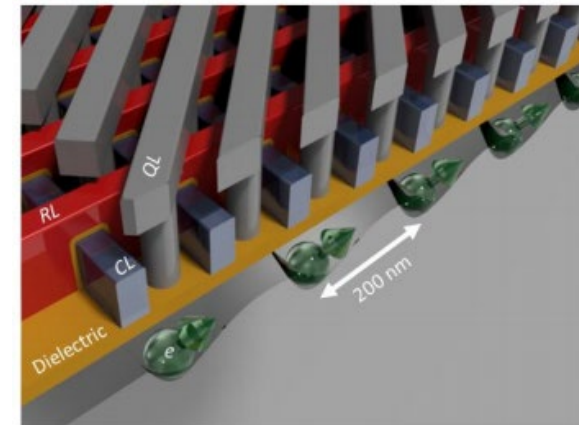
M. Vinet et al IEDM 2018



L.M.K. Vandersypen et al., npj Quant. Inf. (2017)



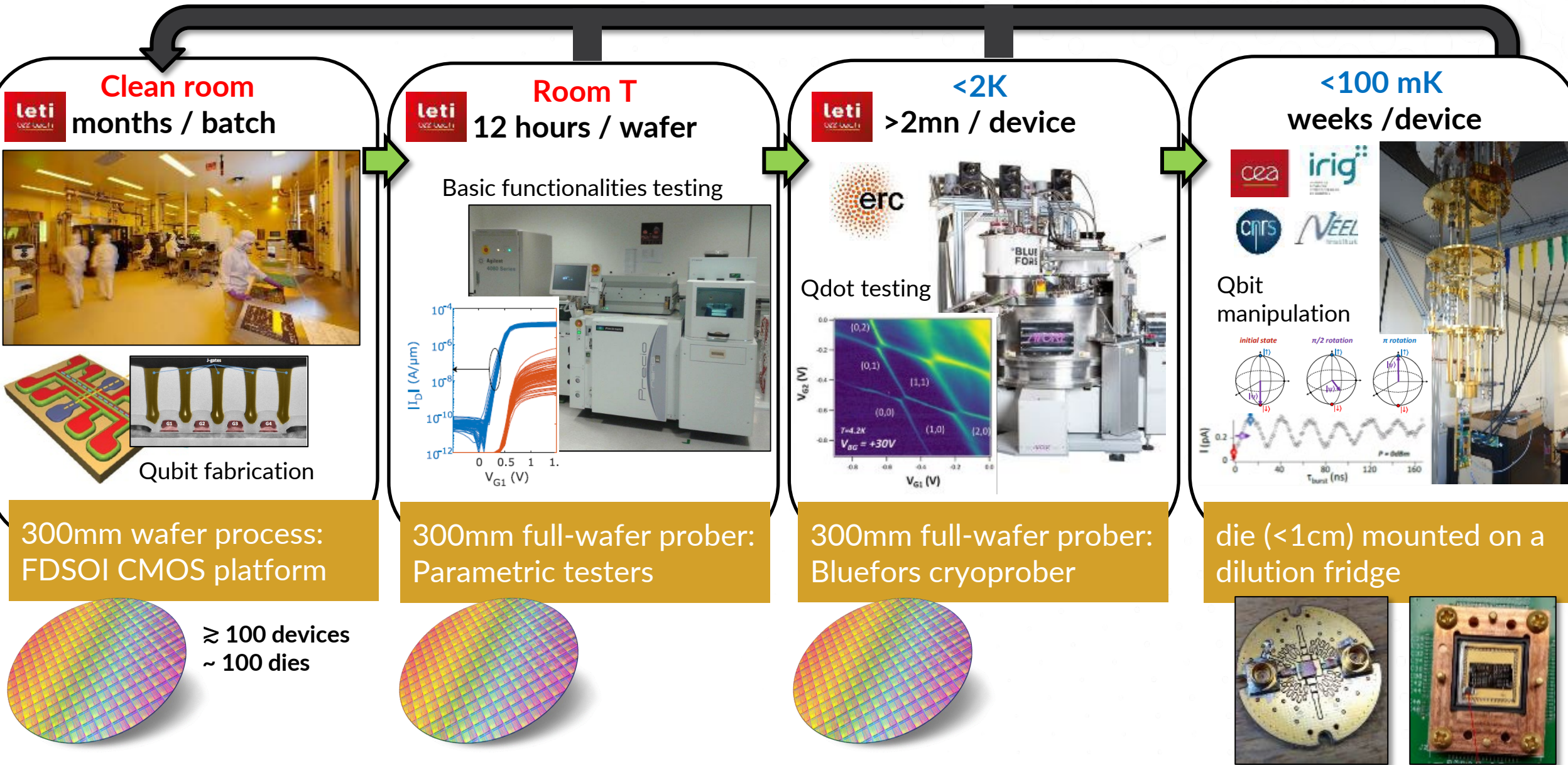
M. Veldhorst et al. (UNSW), Nature Comm. (2017)



R. Li et al., Science Express (2018)

Architectures planaires. Connectivité plus proches voisins, adaptée pour code de surface

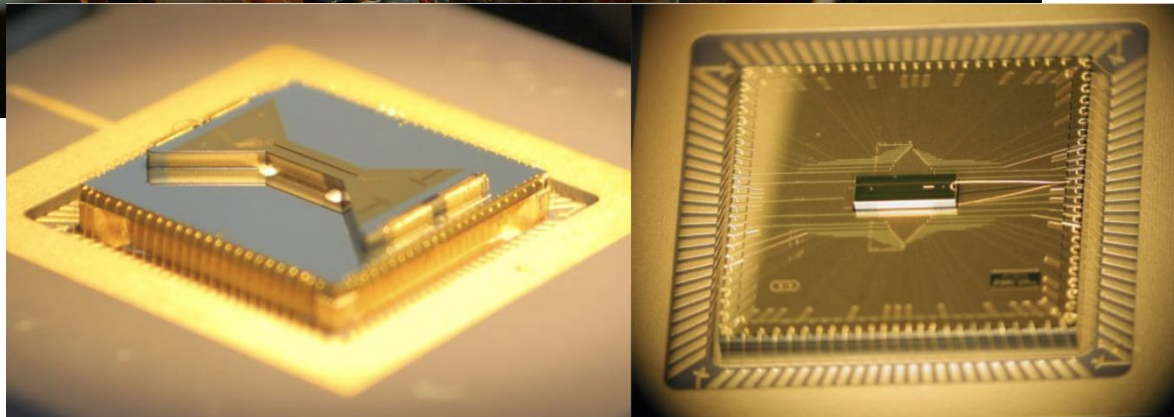
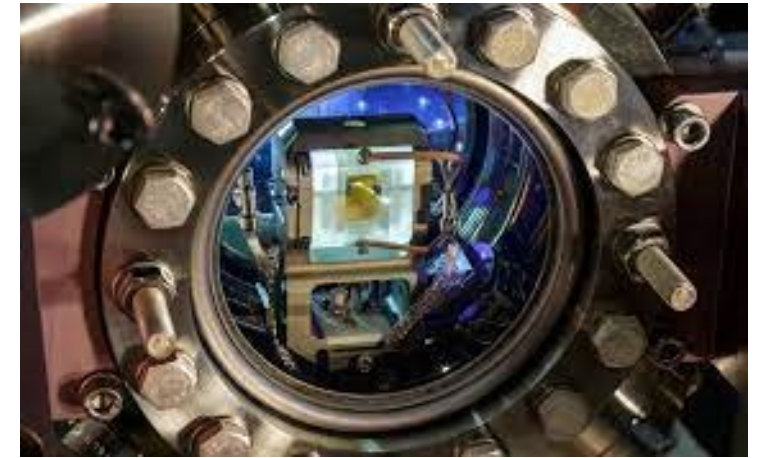
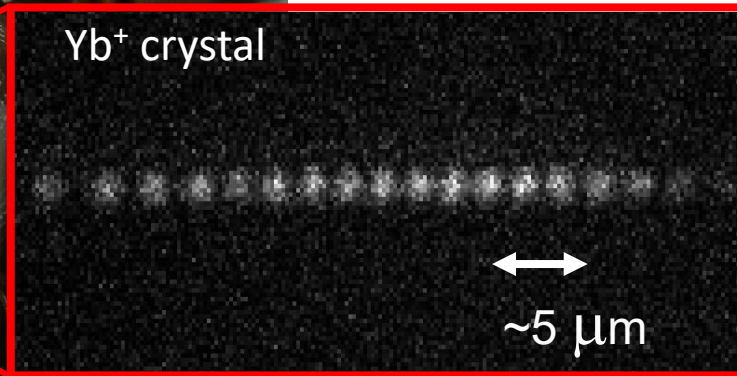
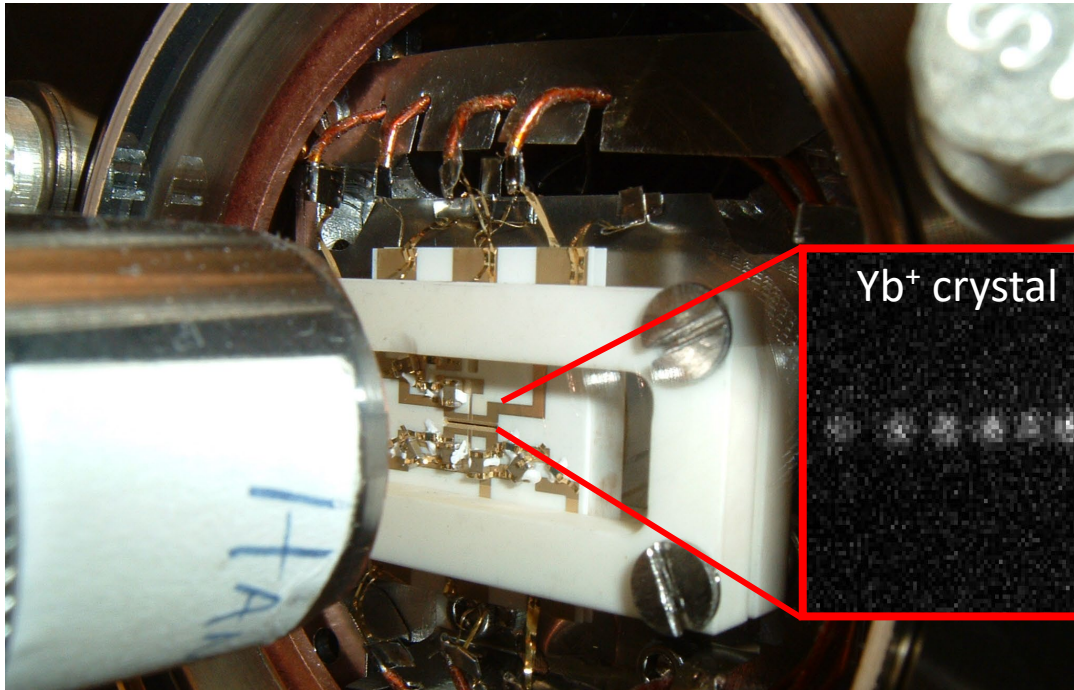
Spin dans les Boites quantiques semiconductrices : fabrication et test



Qubits de spin : considérations (subjectives)

- « Techniques » : semiconducteurs, cryogénie, micro-ondes ultra-bas-bruit
- Etat de l'art : 2-4 qubits physiques couplés. Loin des autres plateformes, mais un domaine de recherche actif et en progrès (Delft, Sydney, Tokyo, Princeton, Grenoble)
- Beaucoup de questions fondamentales intéressantes à résoudre (bruit de champ magnétique ? Bruit de charge ?). Temps de cohérence sont limités pour l'instant.
- La reproductibilité des boîtes quantiques en silicium est un problème important (fabrication difficile, désordre à l'échelle atomique)
Nouvelle plateforme prometteuse : le Germanium (Scapucci/Veldhorst à Delft)
- L'intégration de boîtes quantiques en un réseau fonctionnel de >10 qubits de spin reste un défi majeur à relever

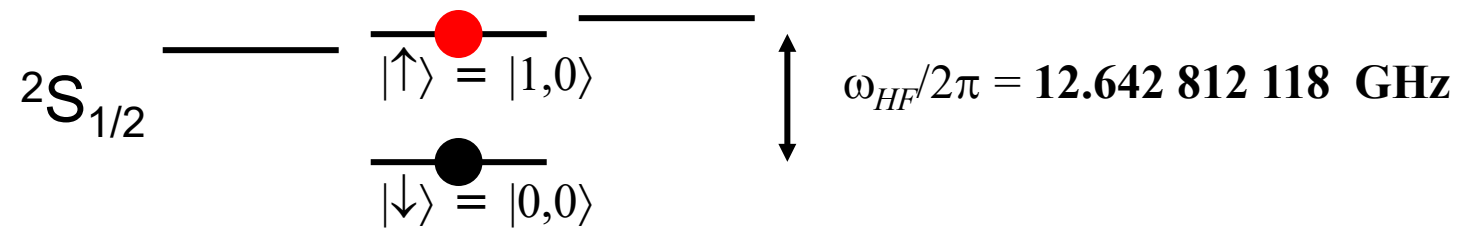
Ions piégés : Physique



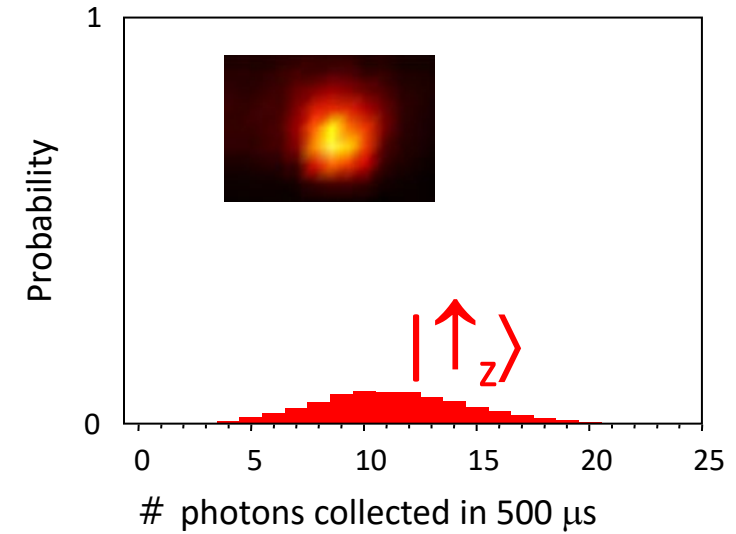
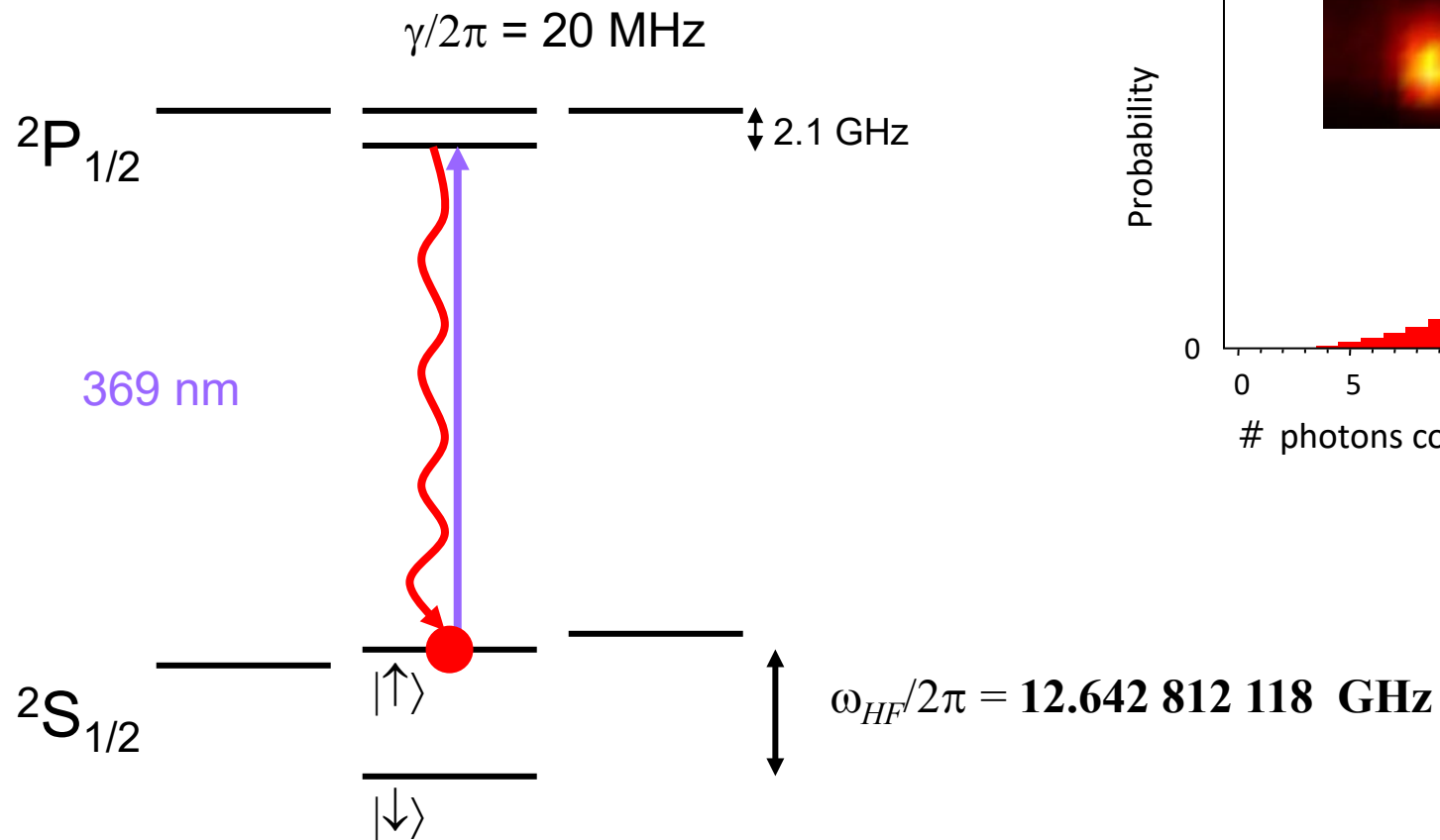
- Température ambiante, vide poussé
- Piégeage par champs RF et électriques
- Lasers de précision pour les portes logiques

C. Monroe group

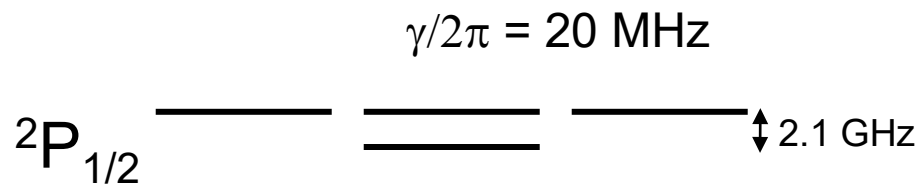
Ions piégés : Physique



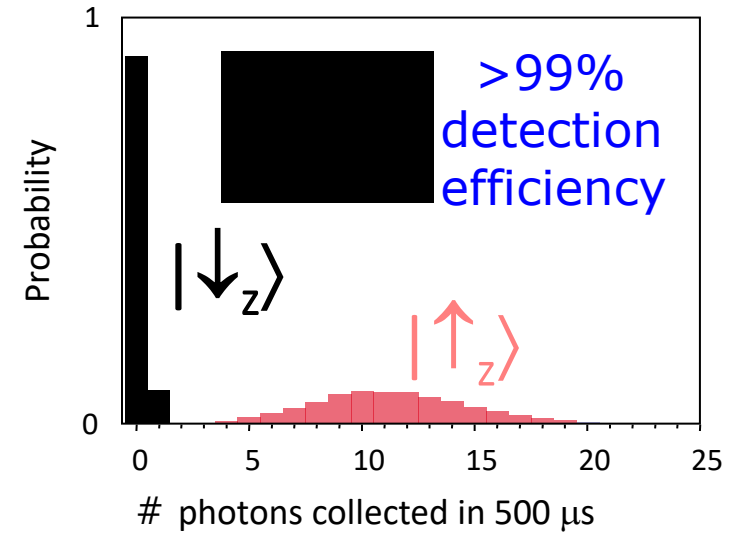
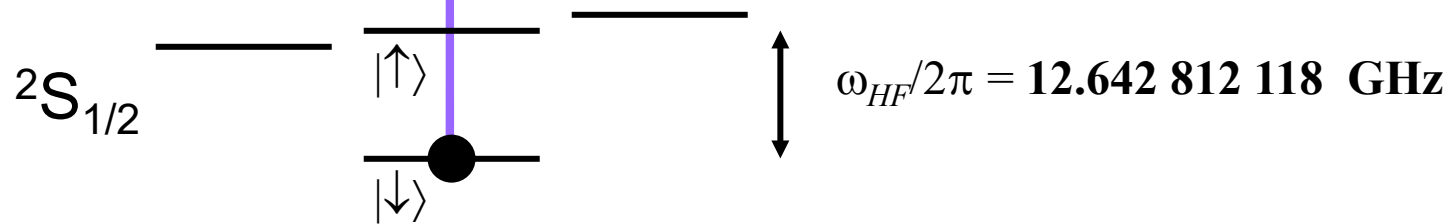
Ions piégés : Lecture



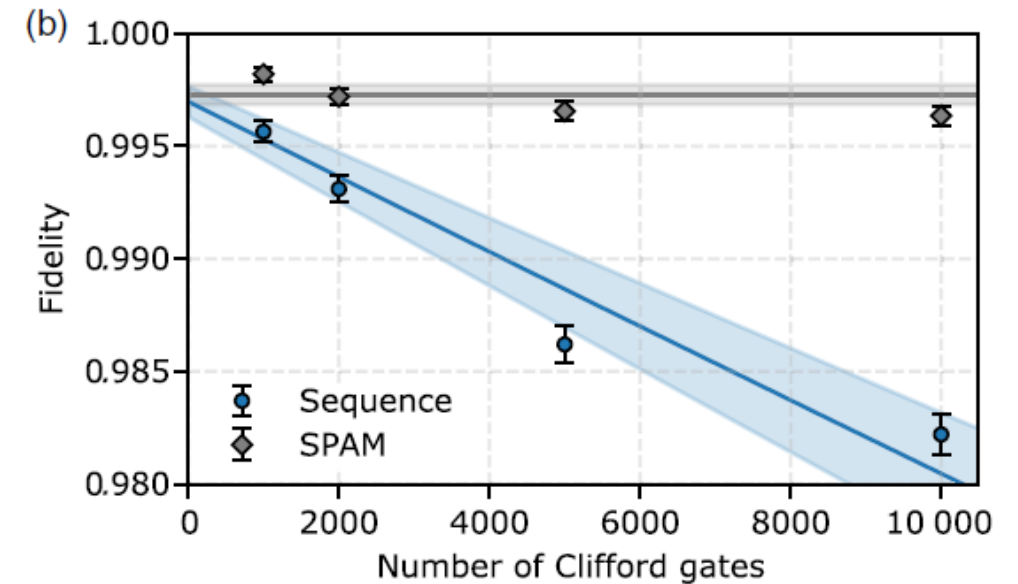
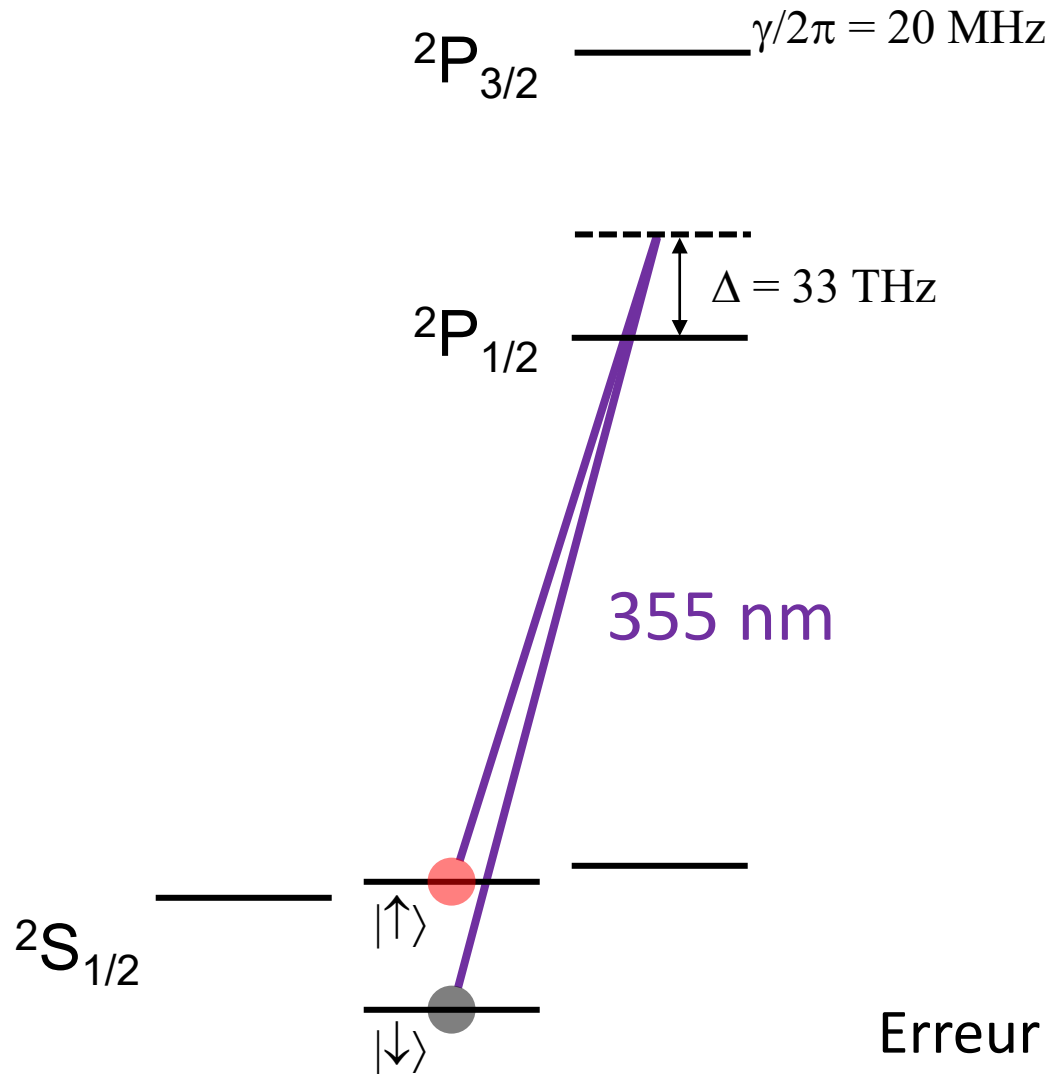
Ions piégés : Lecture



369 nm



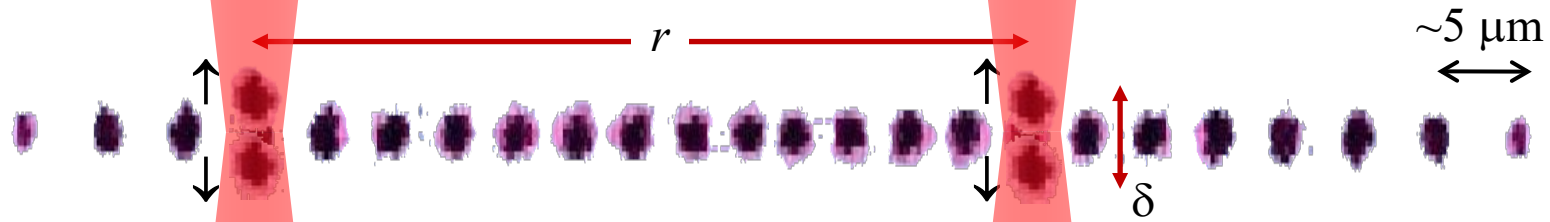
Ions piégés : porte à 1 qubit



Sepiol et al., PRL (2019)
Oxford group

Erreur par porte à 1 qubit : $p \sim 10^{-6} - 10^{-4}$
Durée de la porte $\sim 10\mu s$

Ions piégés : porte à 2 qubits



$$|\downarrow\downarrow\rangle \rightarrow |\downarrow\downarrow\rangle$$

$$|\downarrow\uparrow\rangle \rightarrow e^{-i\varphi} |\downarrow\uparrow\rangle$$

$$|\uparrow\downarrow\rangle \rightarrow e^{-i\varphi} |\uparrow\downarrow\rangle$$

$$|\uparrow\uparrow\rangle \rightarrow |\uparrow\uparrow\rangle$$

Erreur typique : $p_2 \sim 10^{-3} - 10^{-2}$

Ions piégés : machines commercialisées

Honeywell



Physical Qubits	10
Typical Limiting Fidelity	99.5%
Coherence Time (T_1)	$> 10^6$ s
Coherence Time (T_2)	~3 s
Full Connectivity	✓
Mid-circuit Measurement	✓
High-resolution Rotations	✓

Qubits
Single-qubit gates on
79 Qubits
Two-qubit gates on all pairs up to
11 Qubits

Average Fidelity
Single-qubit gates
>99%
Two-qubit gates
>98%*

Best Fidelity
Single-qubit gates
>99.97%
Two-qubit gates
>99.3%*

Minimum Fidelity
Single-qubit gates
>99%
Two-qubit gates
>96%*

Coming Soon: 32 Qubits
We are currently gathering detailed data on our latest system, which features a capacity of 32 fully-connected qubits and world-leading algorithmic performance.
[more about our latest breakthrough →](#)

Qubits à ions piégés : considérations (subjectives)

- « Techniques » : vide ultra-poussé, lasers ultra-stables, fabrication des pièges à ions
- Les ions piégés ont les temps de cohérence les plus longs ($>1s$) et les taux d'erreur les plus bas.
Parfaitement reproductibles car identiques
Ce sont les « meilleurs qubits » aujourd'hui
- Difficile de piéger plus de 10 ions ensemble, donc besoin de progrès dans la manipulation des ions.
Ces développements sont en cours
- Vitesse des portes est relativement lente. Développements nécessaires
- Premières démonstrations de correction d'erreur

Comparaison subjective entre plate-formes

Maud Vinet, Grenoble

	Superconductor	Si spin	Trapped ions	Photons	NV centers	Neutral atoms
Size	$(100\mu\text{m})^2$	$(100\text{nm})^2$	$(1\text{mm})^2$	$\sim(100\mu\text{m})^2$	$\sim(100\mu\text{m})^2$	$(1\mu\text{m})^2$
Fidelity	$\sim 99.3\%$	$\sim 99.6\%$	$\sim 99.9\%$	50% (mesure) 98% (portes)	98% (probabilistic)	95%
Speed	100 ns	$\sim 1\ \mu\text{s}$	100 μs	1 ms	100ms	1 ms
Manufacturing						
Qubit Variability	3%	0.1%-0.5%	0.0001%	0.5%	0.001%	0.0001%
Operation T°	50mK	10mK-1K	300K	4K	4K	300K
Connectivity	4	4	10	2	5	10
Entangled qubits	53	6	20	18	20	192

Conclusion

- Le hardware est le point faible du calcul quantique.

Les erreurs sur qubits physiques sont inévitables, de par le principe de l'ordinateur quantique

- Des machines NISQ à ~ 100 qubits imparfaits existent sur qubits supras, ions piégés, photons, atomes neutres

Leur utilité pour effectuer des calculs est une question ouverte de recherche

- L'ordinateur quantique tolérant aux erreurs est aujourd'hui lointain, quelle que soit la plateforme ($\sim 10^6$ qubits physiques et $10^6 - 10^{10}$ portes logiques nécessaires)

- Des progrès majeurs nécessaires dans la recherche fondamentale sur chacun des plateformes