

# Technologies quantiques : promesses et réalité

Partie 1

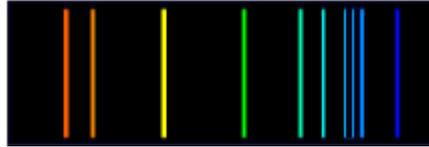
**Hervé Courtois**

Institut Néel, CNRS, Université Grenoble Alpes, Grenoble INP  
herve.courtois@neel.cnrs.fr

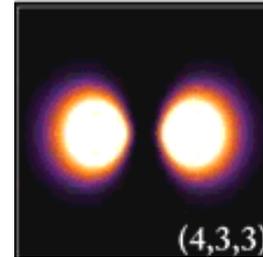
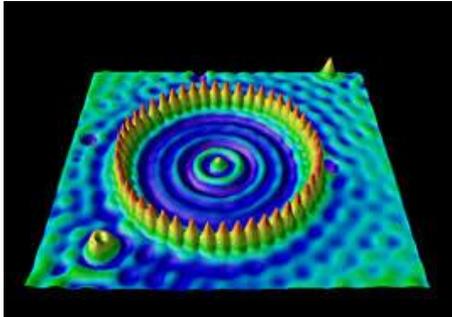
IN'Partners, 9 juin 2021

# La première révolution quantique

**Les quanta** : quantification des niveaux d'énergie et de la longueur de la lumière émise par un atome



Un objet quantique est décrit par une **fonction d'onde** : un électron n'est pas une bille mais un nuage.



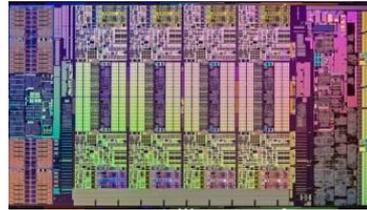
**Dualité onde-corpuscule** : un électron est une onde, la lumière est formée de photons.

# Les produits de la première révolution quantique

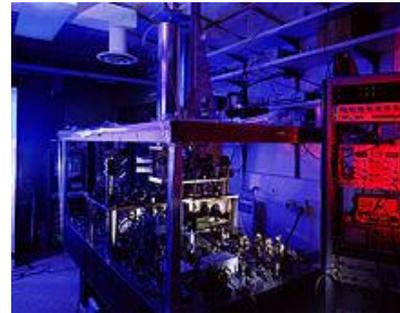
Le **LASER** : émission de lumière monochromatique cohérente



La physique du **transistor** :  
manipuler des états 0 et 1  
(bits classiques)



Le **GPS** basé sur des horloges atomiques



# La seconde révolution quantique

De nouveaux concepts :

- Un état quantique = un bit quantique
- Pas de clonage quantique
- Plus de principe de causalité, des probabilités
- Intrication

De nouvelles applications

Rapport parlementaire Forteza, 2020,  
Feuille de route quantique, 2020.

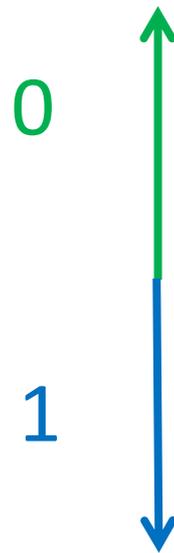


# Le bit classique

Une certaine quantité observable peut présenter deux valeurs pour un certain état.

- Tension
- Position d'un électron ici ou là,
- Spin : son aimant vers le haut ou le bas

Deux états classiques 0 et 1



# Le bit quantique

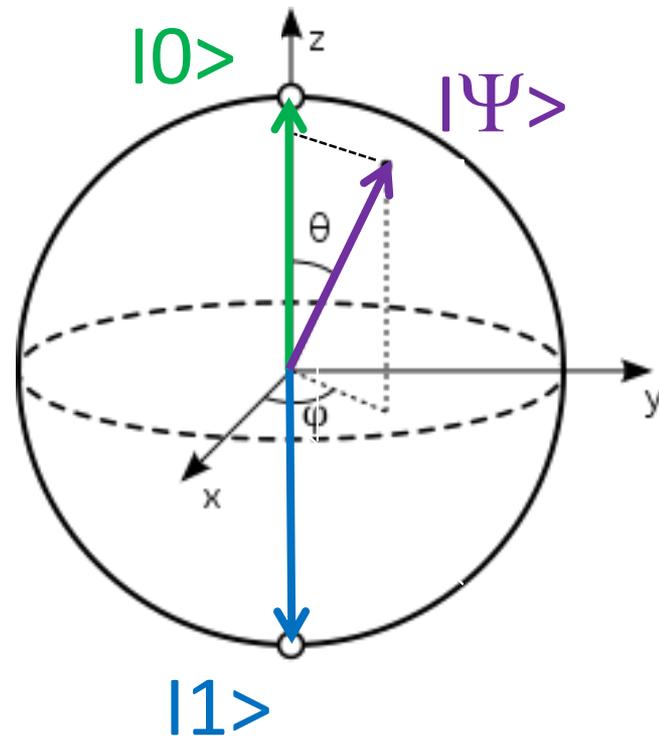
Une certaine quantité observable peut présenter deux valeurs pour un certain état.

- Position : électron ici ou là,
- Spin : son aimant vers le haut ou le bas

Deux états propres (classiques)  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$

Etat quantique :  $|\Psi\rangle = \cos\theta \cdot |0\rangle + \sin\theta \cdot e^{i\phi} \cdot |1\rangle$

Un point sur la sphère de Bloch qui se déplace au cours du temps, en évolution libre et suite à toute action.



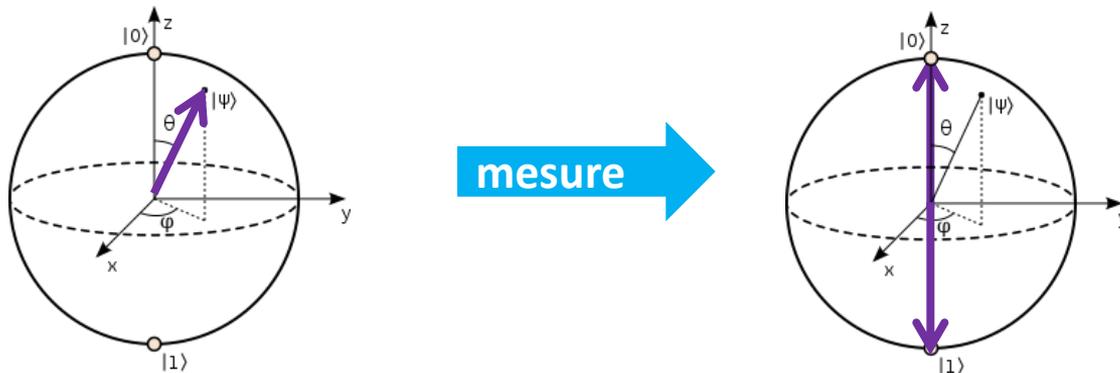
# Pas de clonage quantique

Toute mesure donnera 0 ou 1. Idem pour toute interaction forte avec l'extérieur.

Il est impossible de reproduire un état quantique inconnu (no-cloning theorem)

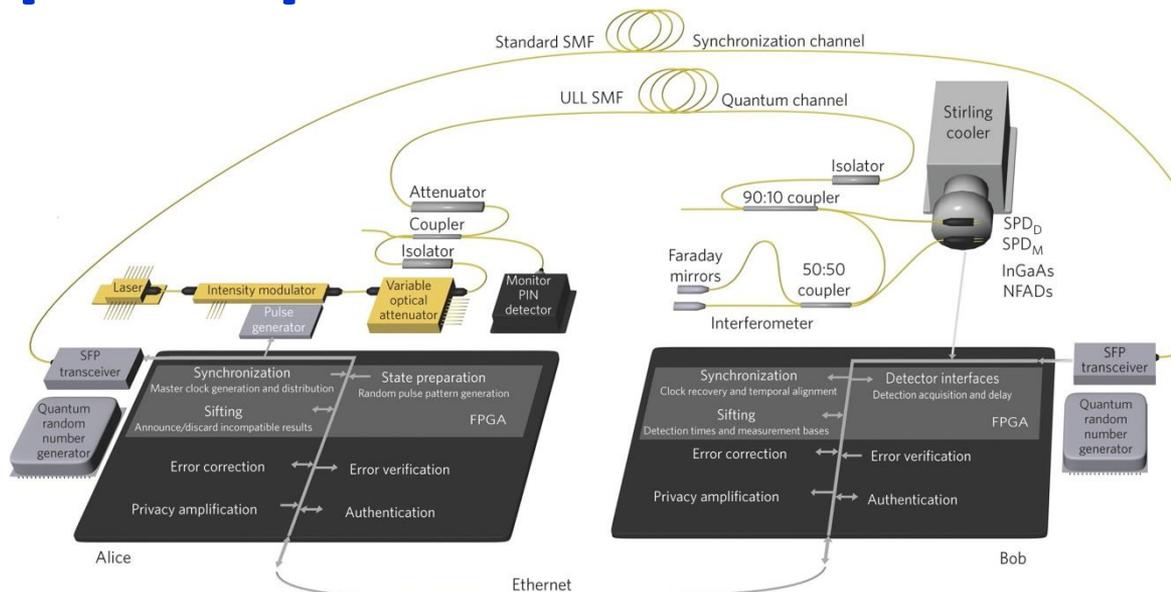
## Quantum key distribution :

une clé cryptographique (par ex. polarisation d'un photon) est transmise de A à B  
Si E intercepte le message alors il le modifie nécessairement, ce qui est détecté.



# Communication quantique

Protection inviolable de la communication quantique



Démonstration d'une QKD sur 307 km grâce à une fibre très faible perte (U. Genève, N. Gisin et al, 2015), Maintenant un produit commercial (IDQuantique).

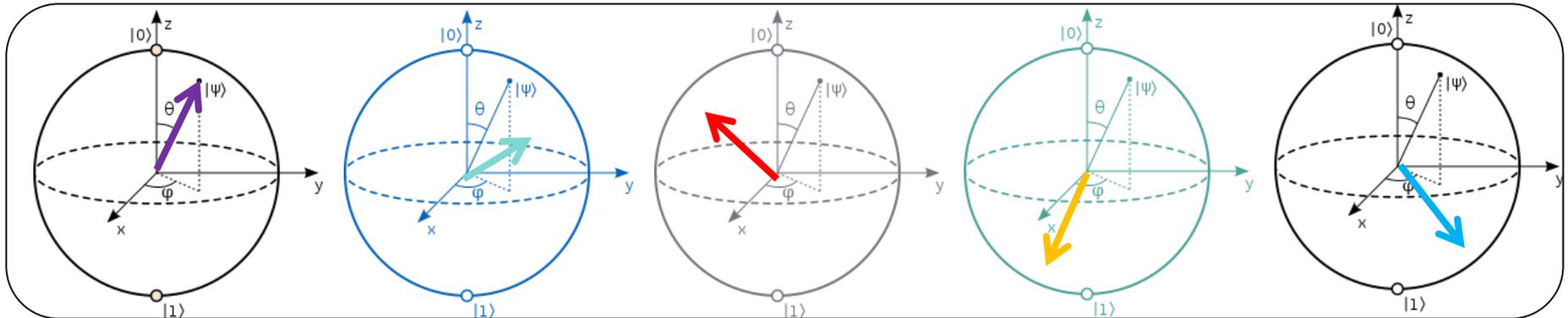
# Intrication

Deux particules sont dites dans un état intriqué lorsque leur état n'est pas décomposable en un produit (tensoriel) de deux états à une particule.

Par exemple, mesurer l'un va influencer l'autre.

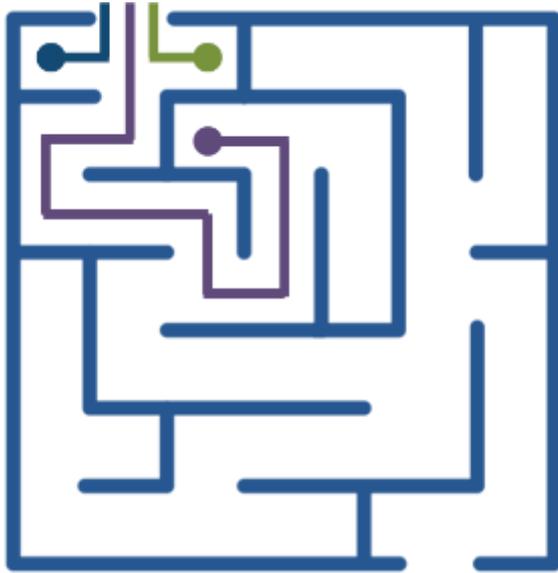
N qubits en interaction suivant les combinaisons linéaires de leurs états

**$2^N$  états purs impliqués** contre 1 à la fois pour des qubits classiques



# Parallélisme intrinsèque du calcul quantique

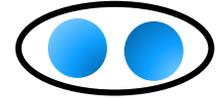
classical bit



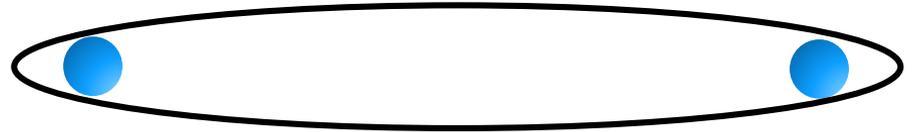
**TO PERFORM A CALCULATION,  
EACH ROUTE IS TESTED ONE BY ONE**

# Téléportation quantique

Deux photons (par exemple) créés dans un état intriqué,  
Par exemple leur polarisation est perpendiculaire l'une à l'autre



Ils sont séparés à grande distance



L'un est mesuré



L'autre est alors projeté dans l'état correspondant



Record 143 km

Transfert d'information à vitesse plus grande que celle de la lumière ???

# De premiers algorithmes quantiques ...



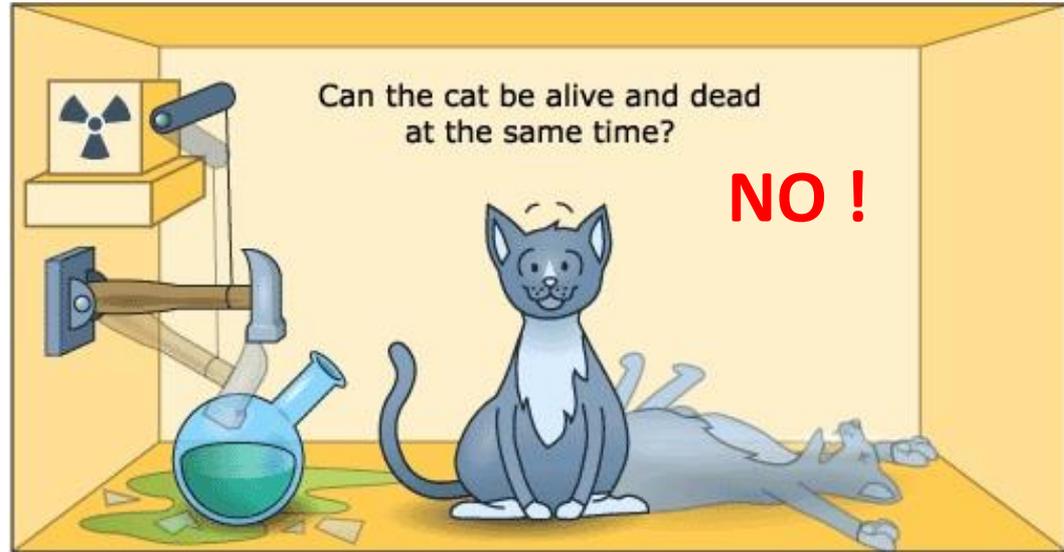
**Deutsch – Jozsa 1992** : le test d'équilibre d'une fonction passe de  $O(2^N)$  à  $O(N)$



**Shor 1994** : factorisation en nombres premiers passe de  $O(N^{1/2})$  à  $O(\log N)^3$

Clé RSA 2048 bits rompue avec 23M qubits avec 0.1 % d'erreur en 8 heures

# La vallée de la mort du calcul quantique



Durée de vie intrinsèque d'un qubit limitée par le couplage à son environnement et par le couplage entre qubits.

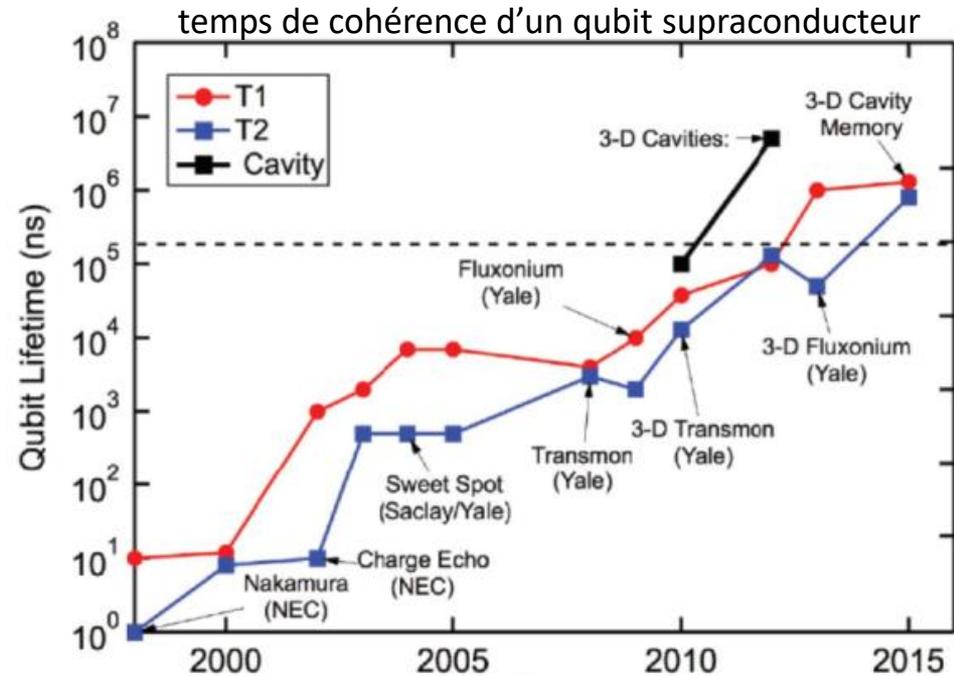
# De nouvelles promesses

**Amélioration des qubits** : des systèmes très découplés de leur environnement

## Quantum error correction

Shor code 1995, Steane code 1996, Surface code 2012 ...

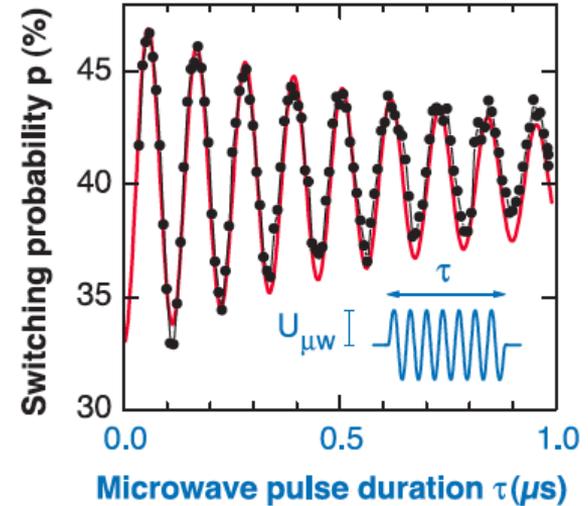
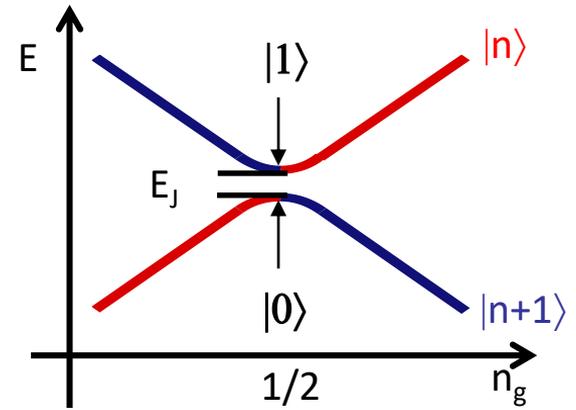
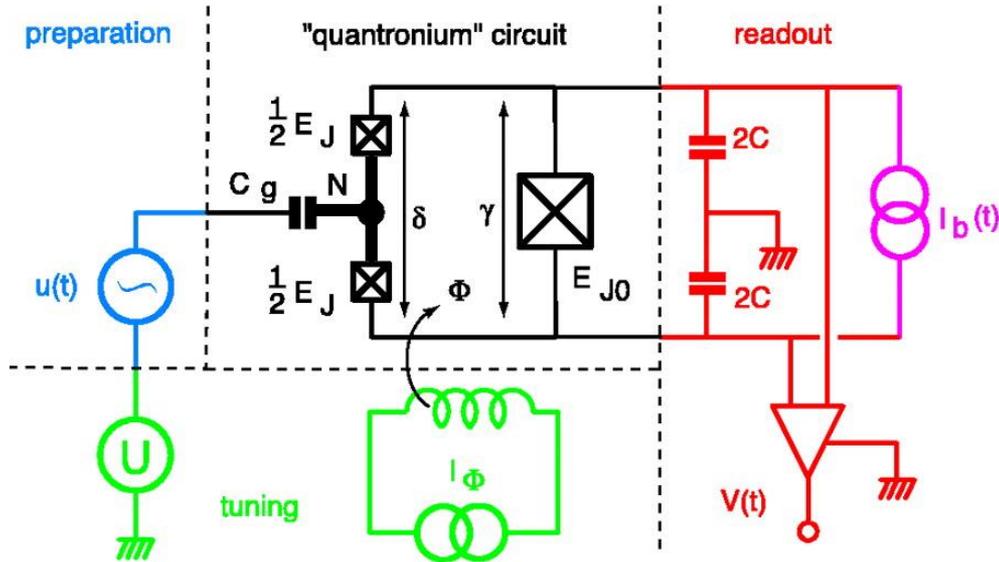
Un qubit logique = plusieurs qubits physiques + lecture + rétroaction corrective.



# Qubit supraconducteur

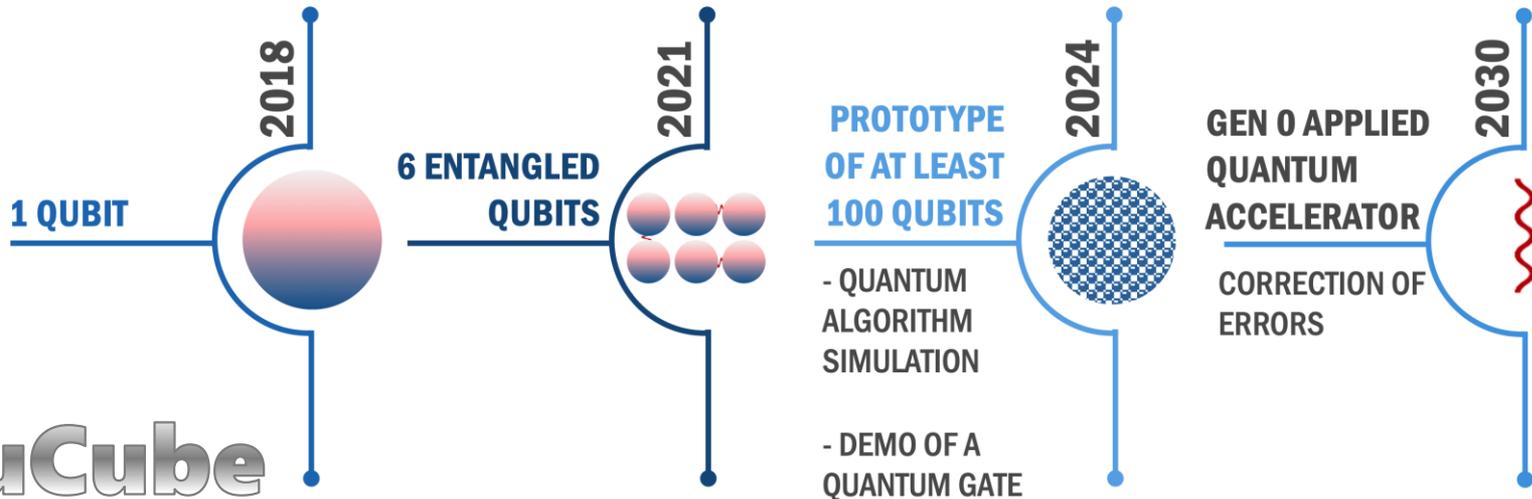
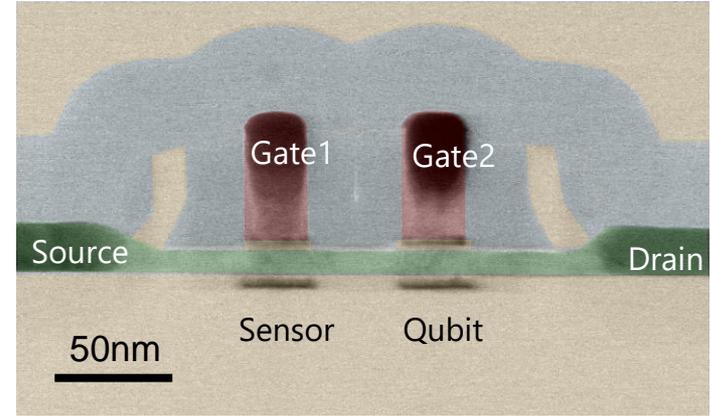
Charge quantifiée, pilotée par une grille, dans un îlot :  $N$  électrons.

Perturbation : énergie Josephson  $E_J$  de couplage à travers la barrière tunnel.



# Qubit de spin dans le Si

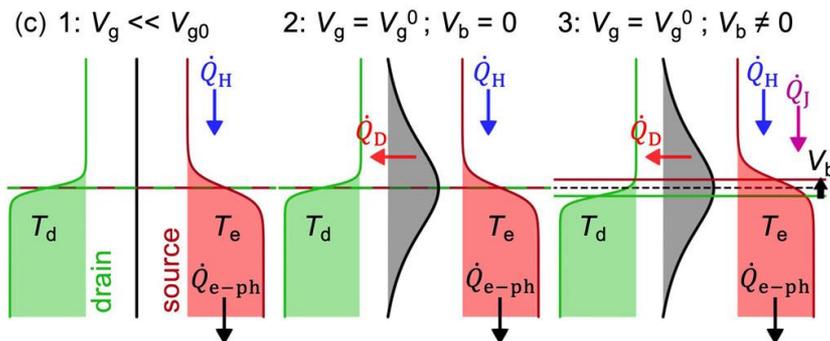
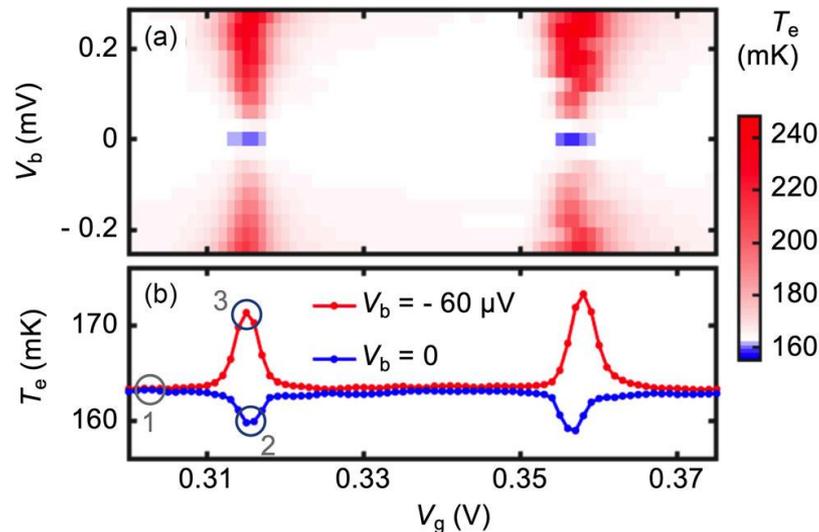
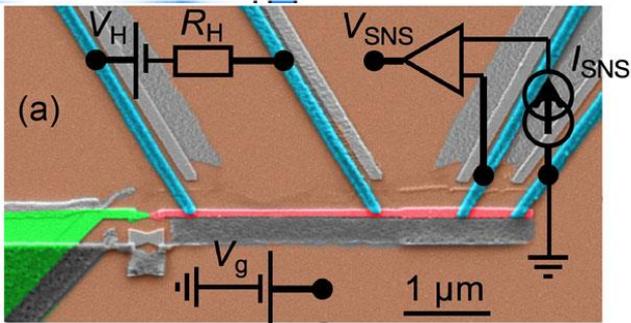
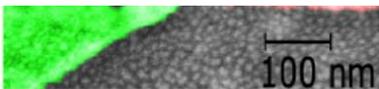
Un transistor MOSFET est un qubit de charge



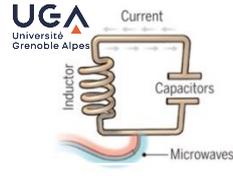
# Thermodynamique quantique

Quantification de l'énergie dans une boîte quantique : pas de transport thermique ?

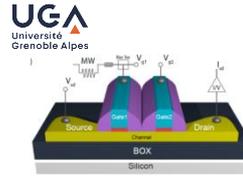
Le couplage permet ce transport.



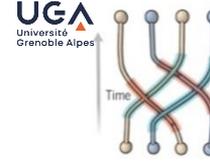
# electrons



**superconducting**



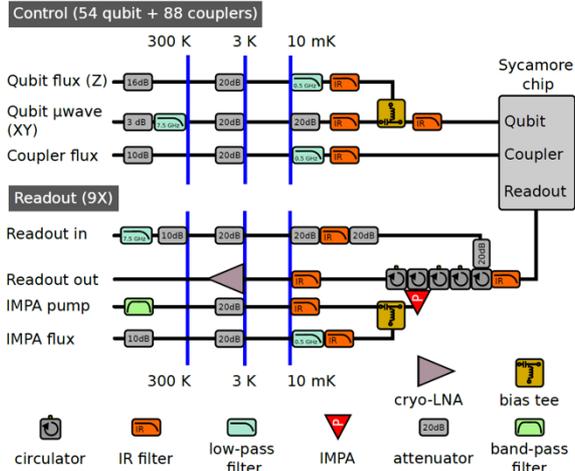
**silicon**



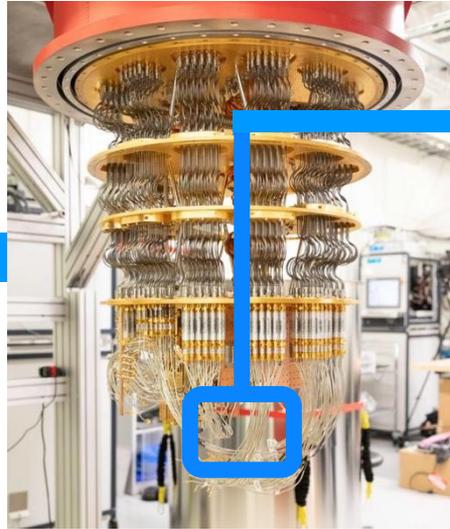
**topological**

qubit size	$(100 \mu\text{m})^2$	$(100 \text{nm})^2$	
two gates fidelities	99,4%	> 98%	
readout fidelity	95%	98%	
speed	250 ns	$\approx 5 \mu\text{s}$	
temperature	15 mK	1 K	15 mK
entangled qubits	53 (IBM et Google)	2 (UNSW)	
scalability	100s	millions	?

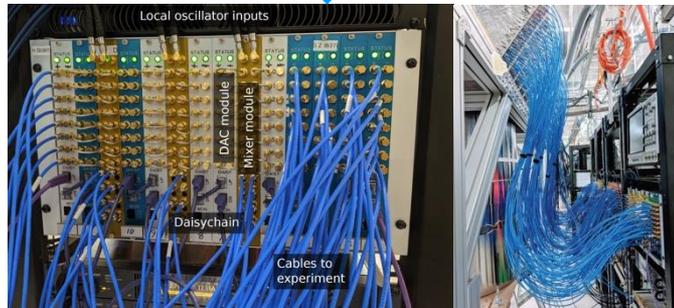
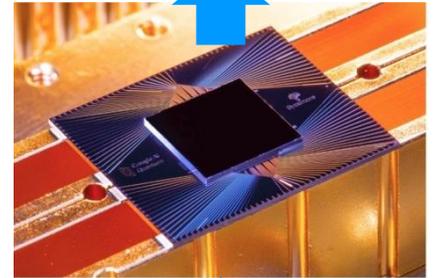
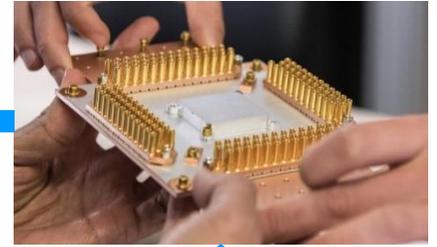
## active and passive control components



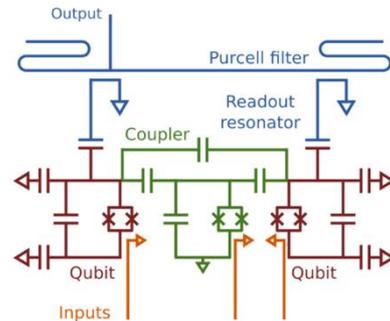
## cryogenic chamber



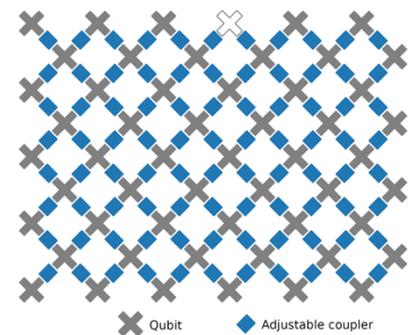
## packaging and chipset



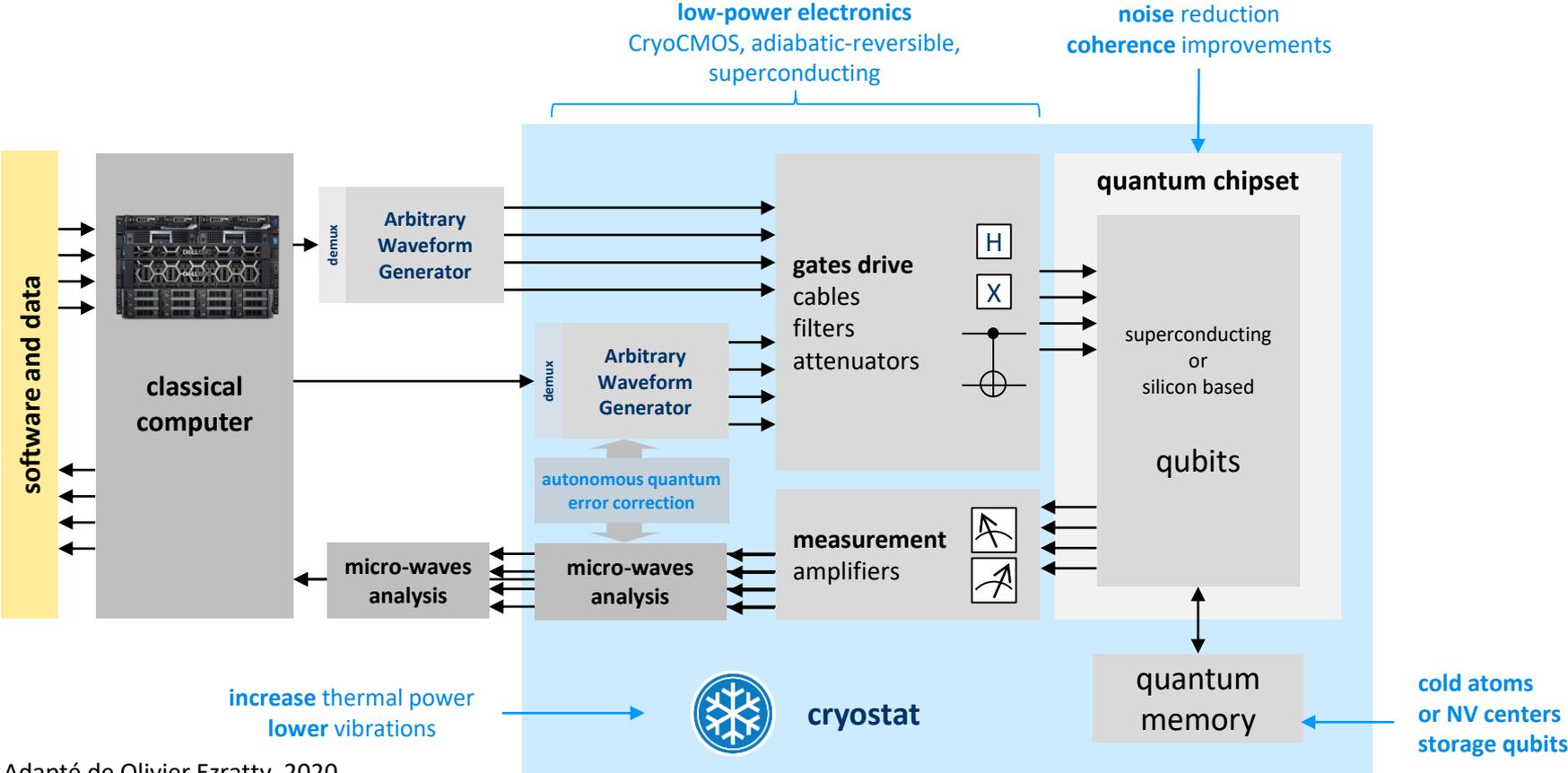
micro-wave sources and readout



qubits and couplers



# Quelques défis en technologies quantiques et habilitantes



Adapté de Olivier Ezratty, 2020

# Nouveaux paradigmes du calcul quantique

Le Graal **LSQC** : Large Scale Quantum Computer, d'utilisation "universelle".

Le défi : combiner un nombre suffisant de qubits fidèles.

Performances révolutionnaires pour certains types de calculs.

La première étape **NISQ** : Noisy Intermediate Scale Quantum computer.

Des algorithmes étudiés pour fonctionner avec des qubits bruités ou peu cohérents.

Déjà une innovation de rupture pour une sous-classe de problèmes.

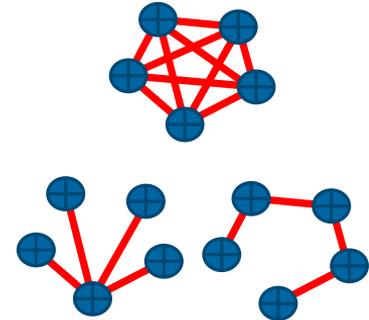
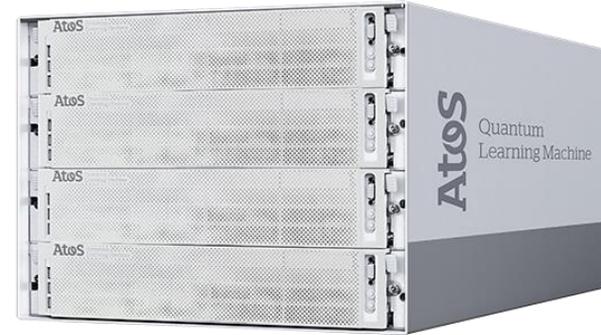
Du *quantum advantage* à la *quantum supremacy* !

Les premiers ordinateurs quantiques seront spécialisés.

# En attendant, l'émulateur quantique

Quantum learning machine de Atos, un simulateur de processeur quantique jusque 41 qubits agnostique en :

- type de qubit,
- connectivité,
- source de bruit, décohérence.



Développement  
d'algorithmes quantiques

# Le calcul quantique pour quoi faire ?

**Communications** cryptées avec protection ultime

**Santé** : Identifier rapidement le remède à un agent pathogène,

Protéines : repliement, interaction avec les toxines

Combattre une épidémie : simulation de diffusion virale

**Matériaux, chimie** :

Conception de nouveaux catalyseurs

Comprendre les supraconducteurs à haute température

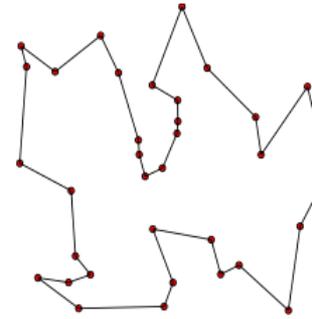
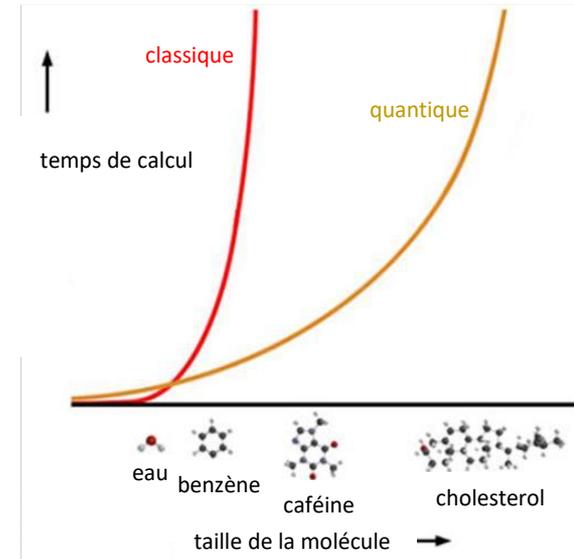
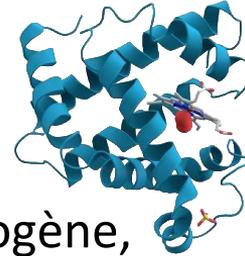
Conception de nouveaux matériaux

**Logistique** : le voyageur de commerce

14 villes =  $10^{11}$  routes possibles, 100 s (ordinateur 1 GHz)

22 villes =  $10^{19}$  routes possibles, 1600 ans

28 cités ... Plus que l'âge de l'univers



# Le hub quantique Grenoblois

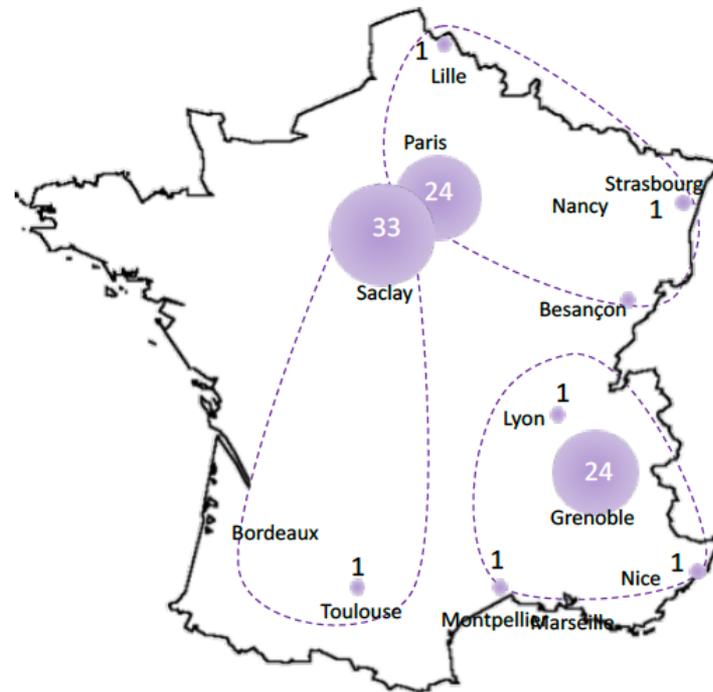
Un des trois hubs nationaux

Cross-disciplinary Program (CDP) de l'IdEx  
Univ. Grenoble Alpes : QuEnG



**Quantum Engineering**

Univ. Grenoble Alpes



Répartition géographique des 86 lauréats ERC  
des sciences et technologies quantiques

Données : CEA, CNRS, INRIA, SU, PSL, uniSTRA, UGA, UPSaclay, ...à compléter

# Conclusion, partie 1

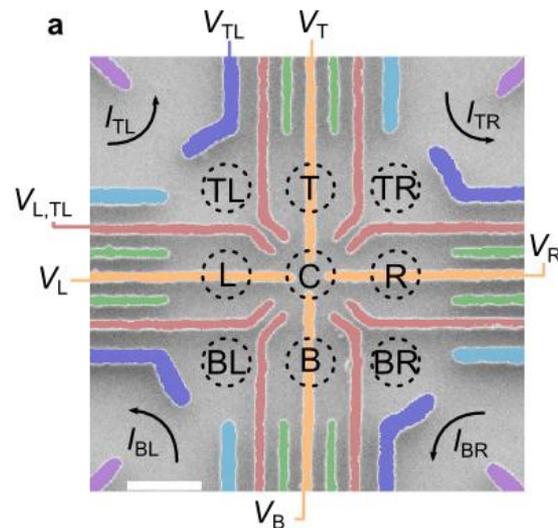
Une grande richesse de solutions pour créer un ordinateur quantique

Aussi des capteurs quantiques

Des technologies habilitantes

Un nouvel art de la programmation

Grenoble : un hub au tropisme électronique



# Remerciements, partie 1

Clemens Winkelmann, Institut Néel / Alexia Auffèves, QuEnG / Olivier Ezratty / Tristan Meunier, Maud Vinet, Silvano de Franceschi, QuCube



# **MINALOGIC**

**Pôle de Compétitivité  
des Technologies Numériques  
en Auvergne Rhône-Alpes**

**Développer l'innovation  
Accélérer la croissance  
des entreprises**



**Hervé RIBOT, Directeur Technique micro nano électronique**

**[Hervé.ribot@minalogic.com](mailto:Hervé.ribot@minalogic.com)**

# La 1ère force de Minalogic ... la communauté Minalogic !!

15

Institutions  
financières

385

Entreprises

450

Membres

30

Institutions  
publiques

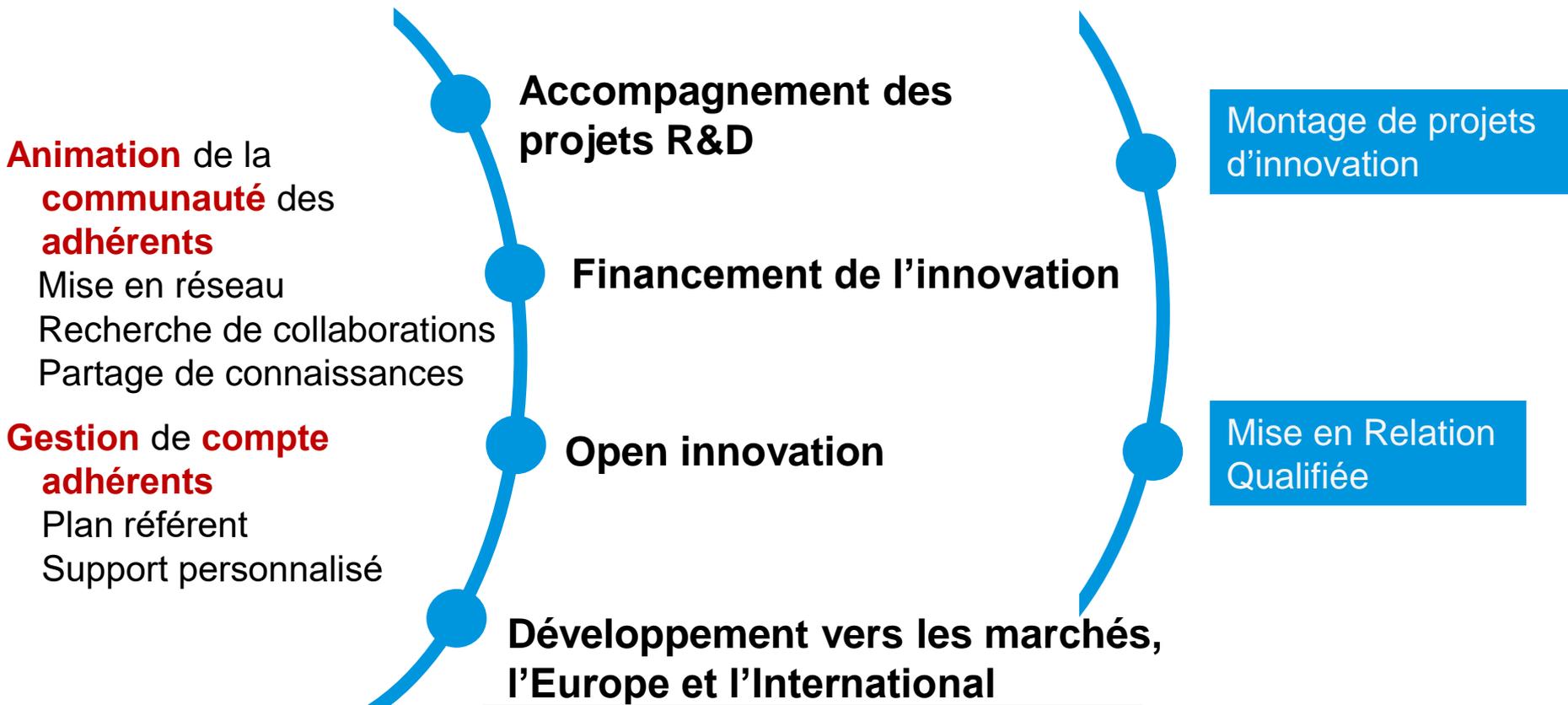
20

Organismes de  
Recherche



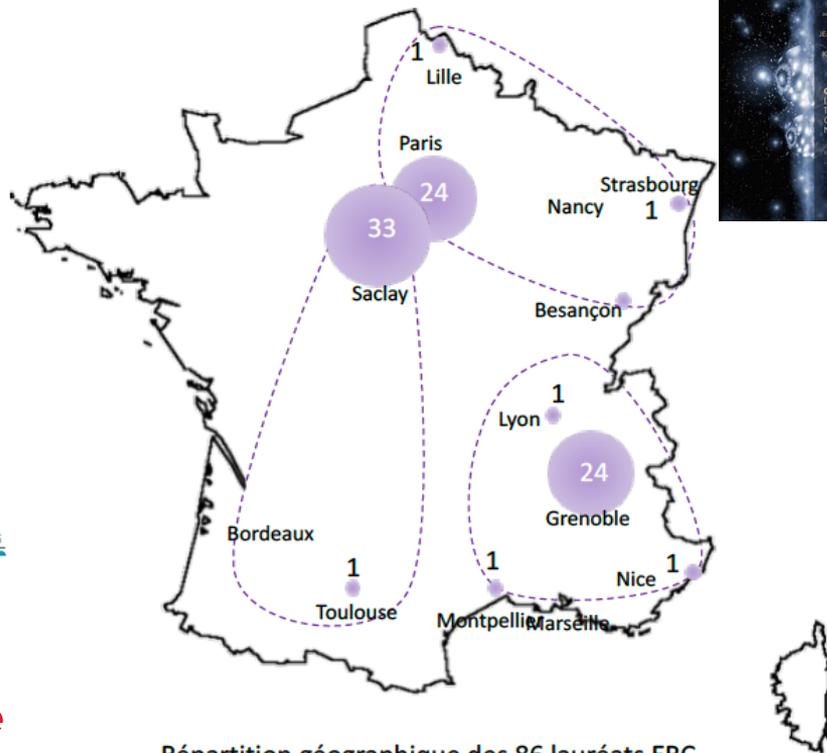
# Nos métiers pour innover pour la croissance

La force du réseau d'adhérents, la compétence d'une équipe reconnue,



# En s'appuyant sur le hub quantique Grenoblois ...

Quantum Engineering  
Univ. Grenoble Alpes



Répartition géographique des 86 lauréats ERC  
des sciences et technologies quantiques

Données : CEA, CNRS, INRIA, SU, PSL, uniSTRA, UGA, UPSaclay, ...à compléter

# Aider chaque entreprise à répondre à quelques questions simples ...

- ◆ Suis-je concerné par l'informatique quantique et les technologies associées ?
  - Comme utilisateur ?
  - Comme fournisseur de technologies et solutions ?
- ◆ Quelle opportunité économique pour mon entreprise ?
- ◆ A partir de quand ?
- ◆ Avec quelle intensité dois-je m'impliquer?
- ◆ Avec quels partenaires, clients, fournisseurs ?

# Les faits marquants de la Journée thématique 2020

- ◆ Un secteur industriel déjà très impliqué:
  - Des grands groupes à la manœuvre: ATOS, IBM France, TOTAL, EDF, Air Liquide, ...
  - Des PME déjà lancées sur le sujet :
    - Absolut System (cryogénie)
  - Des start-ups créées, en lien étroit avec des laboratoires académiques:
    - Qubit Pharmaceutical / Sorbonne : Nouveaux médicaments par HPC + algorithme quantique (Atlas)
    - Pasqal / institut d'optique : Simulateur quantique à base d'atomes
    - Alice et Bob / ENS-PSL: Ordinateur quantique sans erreur!
    - C12 / LPENS: Qubits à base de nanotubes de carbone



# Les faits marquants de la Journée thématique 2020

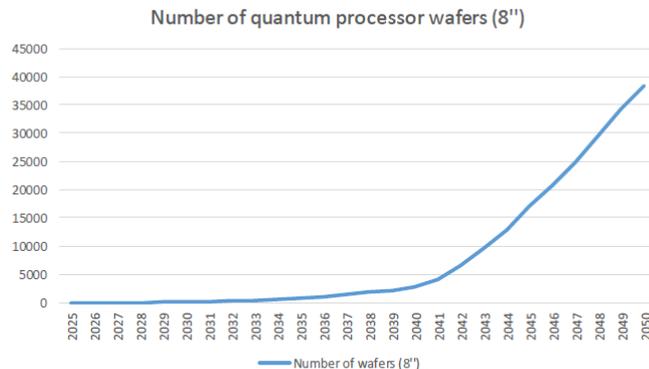
- ◆ Un nouvel art de la programmation ...
  - Et donc, une opportunité pour les éditeurs de logiciels
  - Mais une nécessité de se former ...
- ◆ Beaucoup de secteurs applicatif en veille:
  - Des gains énormes attendus en vitesse et précision de simulation
  - Pharmacologie, énergie ..., énergie, chimie, finance

# Les faits marquants de la Journée thématique 2020

- ◆ Ça ne sera vraisemblablement pas le nouvel Eldorado pour les fabricants de composants Si ...

## 2050 assumptions:

- 300 quantum computers worldwide
- 1 computer = 1M physical qubits (1,000 logical qubits)
- A Si-based quantum processor chip will be  $10 \times 10 \text{mm}^2$ , handling 50 qubits each  $\rightarrow$   $1\text{M}/50 = 2\text{k}$  quantum processors
- Assuming a manufacturing yield of 50%, it will require a maximum of about **40k 8" wafers to be processed.**



By courtesy of



The total volume of wafers for QC is a few wafers a year!

Not interesting for large foundry (although Intel showed interest years ago): it is more a business for specialized foundries!

# Les faits marquants de la Journée thématique 2020

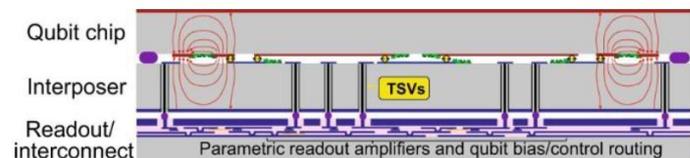
- ◆ Mais une carte à jouer dans les technologies habilitantes :
  - Matériaux : Si28 ultra haute pureté
  - Cryogénie multi-étages
  - Mécanique, câbles et connectique RF
  - Électronique et RF pour adresser les Qbits et faire le traitement du signal

# Les faits marquants de la Journée thématique 2020

- ◆ Le goulet d'étranglement ne sera pas la fourniture d'Hélium 3, mais la disponibilité des techniciens et ingénieurs :
  - La formation des techniciens et ingénieurs au cœur du sujet :
    - Programme thématique de la Graduate School de l'UGA ; filières Master QIQE, Nanotech, filières Ingénieur Grenoble INP Ensimag et Phelma
    - Attractivité vis-à-vis des étudiants –français et étrangers- au niveau doctoral et post doctoral
    - Accompagnement par les entreprises à structurer:
      - Quelles entreprises ? Sous quelle forme ? Alternance, stages, thèses Cifre, chaires ?

# Les faits marquants de la Journée thématique 2020

- ◆ L'écosystème a des contributions sur la plupart des technologies de Qubit : photonique, supra conducteur, Qubit Si, atomes froids
- ◆ L'écosystème a les infrastructures et les procédés pour fabriquer ses prototypes (salles blanches, moyens cryogéniques, électronique....)



3D integration of superconducting qubits, MIT 2020

**Une ambition: Devenir l'écosystème où les concepteurs viennent donner vie à leurs idées**

# Les options pour une entreprise :

- ◆ Information : Evènements, publications ...
- ◆ Formation :
  - Formations en ligne, formation continue : Ex : <https://qiskit.org/learn/>
  - Accès à des plateformes d'évaluation gratuites: <https://quantum-computing.ibm.com/>
- ◆ Action :
  - Evaluation sur des simulateurs performants ou plateformes payantes : ATOS Quantum Learning Machine, IBM quantum for business
  - Fourniture de composants SW ou HW à l'écosystème du quantique
  - Montage de projets de R&D individuels ou collaboratifs

# ... Merci de votre attention !

Retrouvons-nous lors de l'évènement

**Journée Thématique**

**« informatique quantique »**

le 14 octobre 2021

pour découvrir les avancées de ce  
passionnant sujet !



*L'équipe Minalogic*