



Les technologies quantiques des fondements de la mécanique quantique aux applications

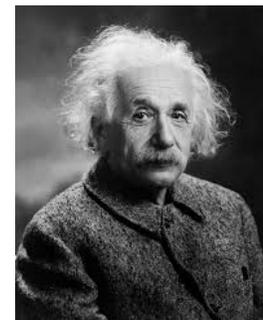
Isabelle Robert-Philip

CNRS – Université de Montpellier - Laboratoire Charles Coulomb



La mécanique quantique

- Une théorie née au début du XXème siècle toujours d'actualité
 - Pour expliquer le spectre du rayonnement d'un corps chauffé qui n'obéissait pas aux règles de la physique classique.



- Source de ruptures technologiques et d'innovation
 - Technologies quantiques 1.0

Le laser



Le transistor



L'IRM

Les technologies quantiques 2.0

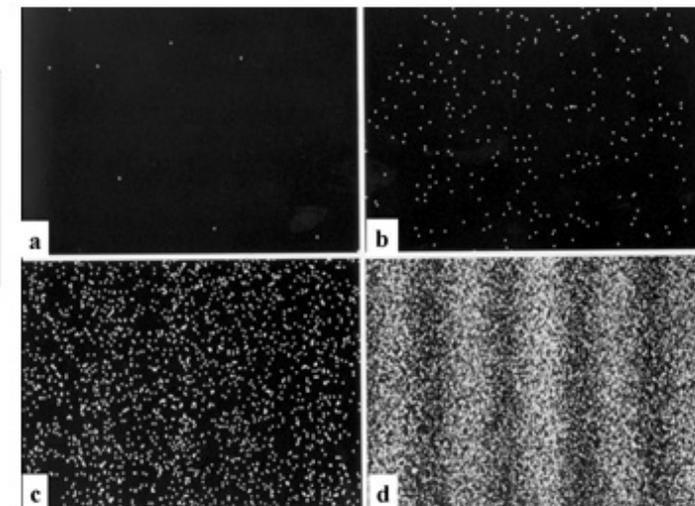
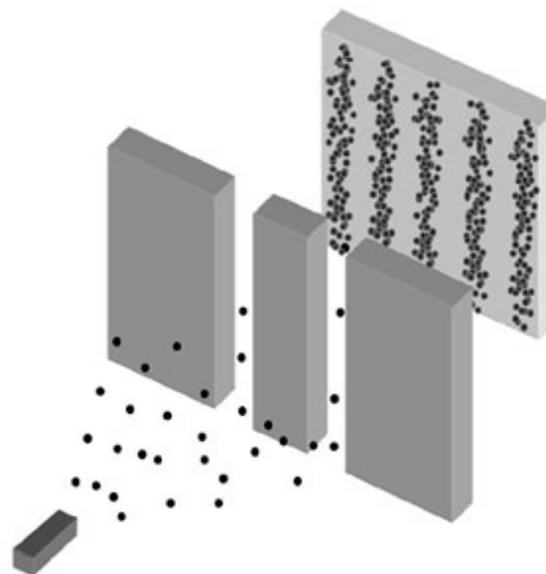
- Quelques piliers de la mécanique quantique
 - La dualité onde-corpuscule



Non-localisées - interférences



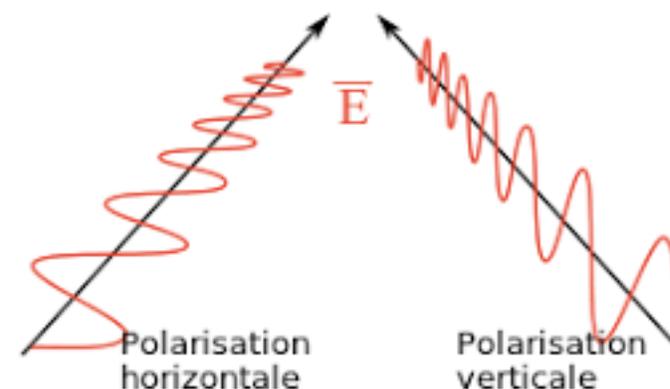
Localisées – pas d'interférences



American Journal of Physics **57**, 117 (1989)

Les technologies quantiques 2.0

- Quelques piliers de la mécanique quantique
 - La superposition d'état



$$\longleftrightarrow |H\rangle$$

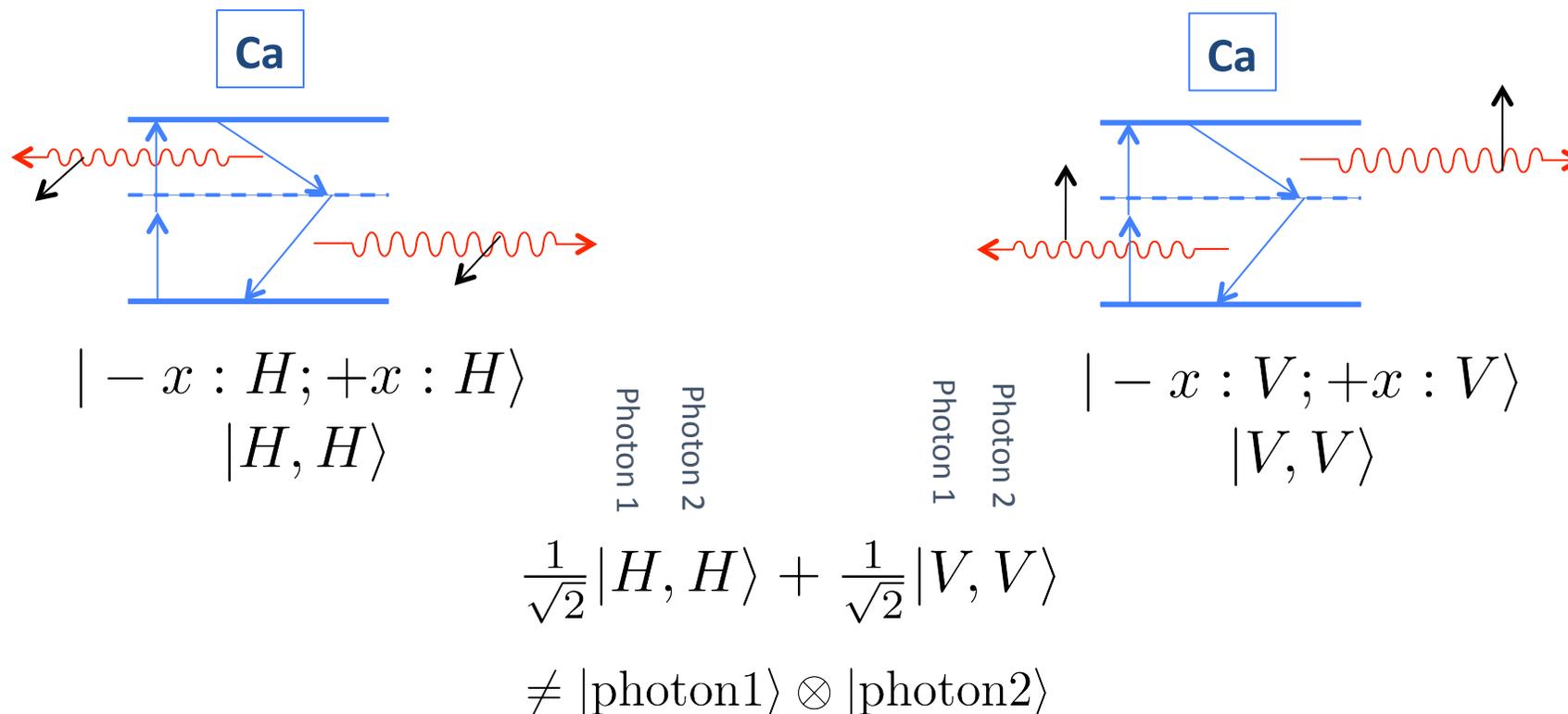
$$\nwarrow |A\rangle \propto |R\rangle - i|L\rangle$$

$$\updownarrow |V\rangle$$

$$\nearrow |D\rangle \propto |R\rangle + i|L\rangle$$

Les technologies quantiques 2.0

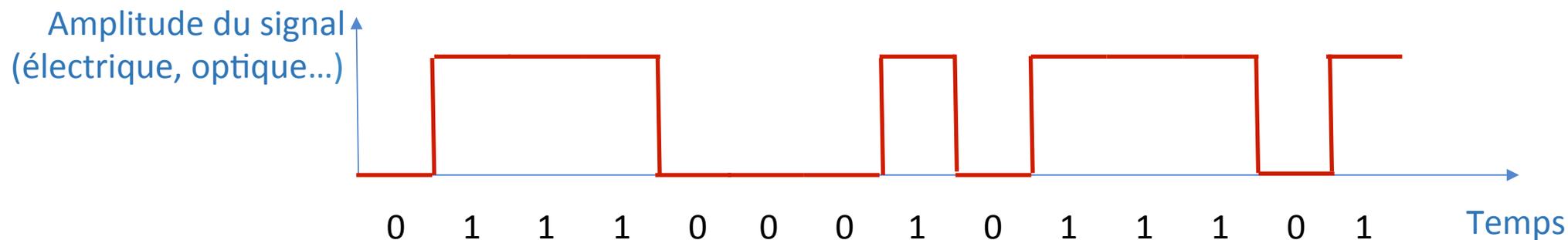
- Quelques piliers de la mécanique quantique
 - L'intrication : corrélations quantiques entre deux particules formant un système quantique unique



Les technologies quantiques 2.0

- Codage de l'information : le bit classique 0 ou 1

«Occitanie» : « 010011110110001101100011011010010111010001100001011011100110100101100101 »



Les technologies quantiques 2.0

- Le bit quantique : superposition d'état!

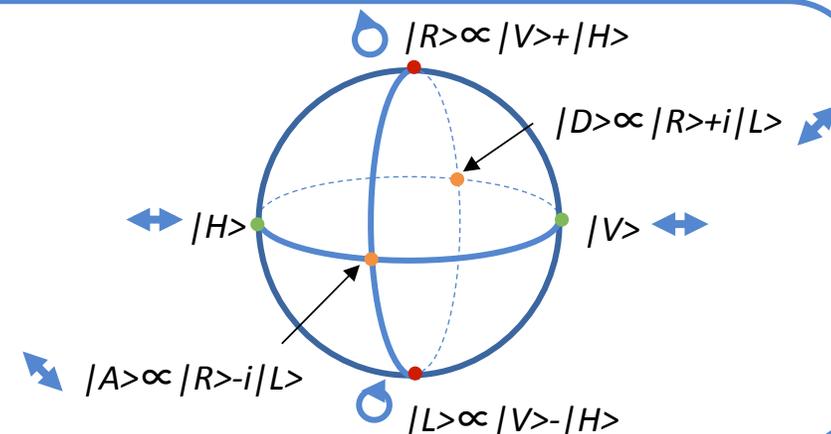
Bit classique

0 ou 1

Bit quantique

\longleftrightarrow $\leftrightarrow |0\rangle$
 \updownarrow $\leftrightarrow |1\rangle$
 $\leftrightarrow |0\rangle + |1\rangle$

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



- Une grande variété de supports quantiques

Une grande variété d'objets quantiques

Atomes

Ions

Circuits électroniques
quantiques

Molécules

Nanoressorts

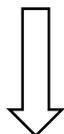
Electrons

Photons

Spins nucléaires

Les 4 piliers à finalité applicative

Communications quantiques

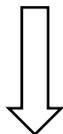
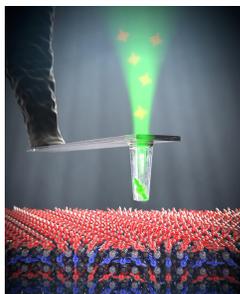


sécurité
absolue des
transmissions

1 à quelques
qubits



Capteurs quantiques

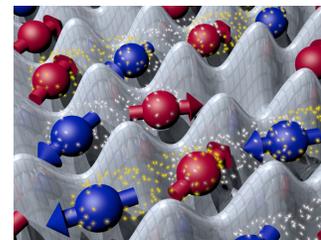


meilleures
sensibilité &
résolution

1 à quelques
qubits

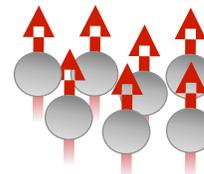


Simulation quantique

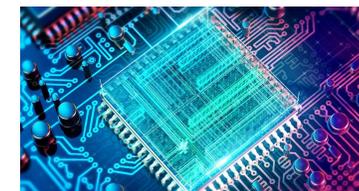


réactions
chimiques &
matériaux

Centaines
à milliers de
qubits



Calcul quantique



puissance de
calcul inégalée

Dizaines
à centaines de
qubits

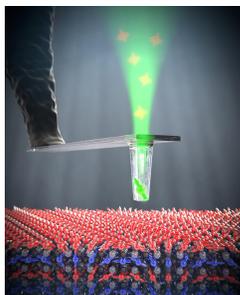


Les 4 piliers à finalité applicative

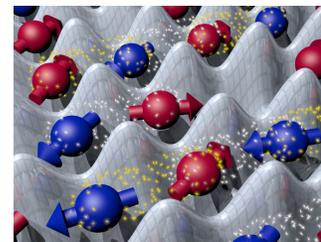
**Communications
quantiques**



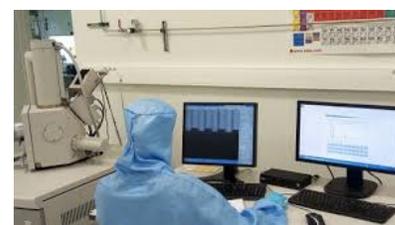
**Capteurs
quantiques**



**Simulation
quantique**



Ingénierie



transmissions

résolution

matériaux

L'ingénierie quantique

• Ingénierie science de la matière

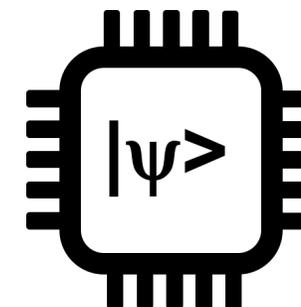
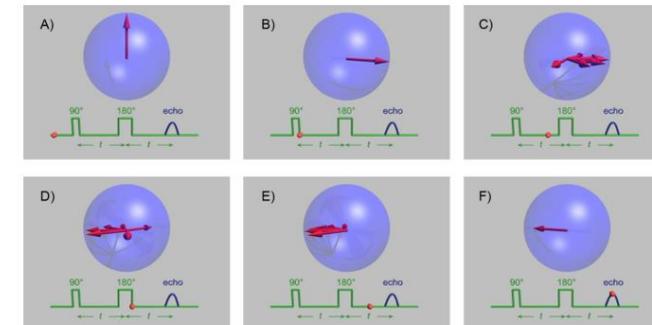
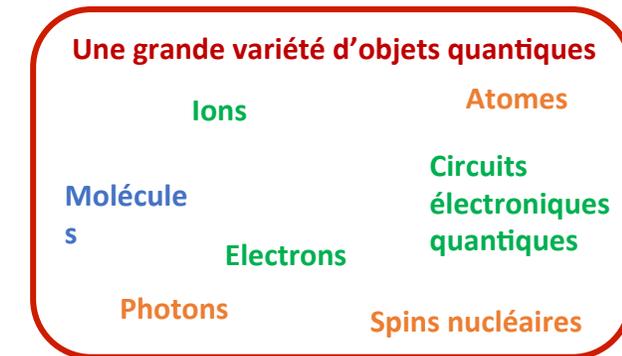
- Quel support au bit quantique?
- Initialisation, préparation, contrôle et lecture des états quantiques
- Interfaçage entre bits quantiques et contrôle des corrélations quantiques
- Extension à grande échelle
- Contrôle des processus de décohérence

• Ingénierie des états quantiques

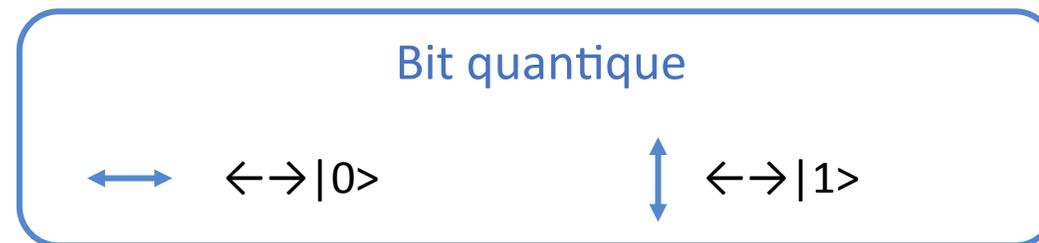
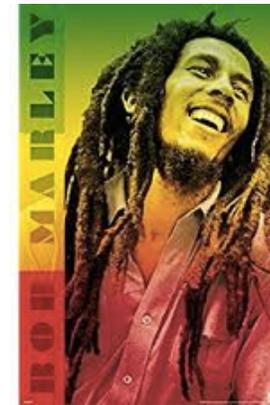
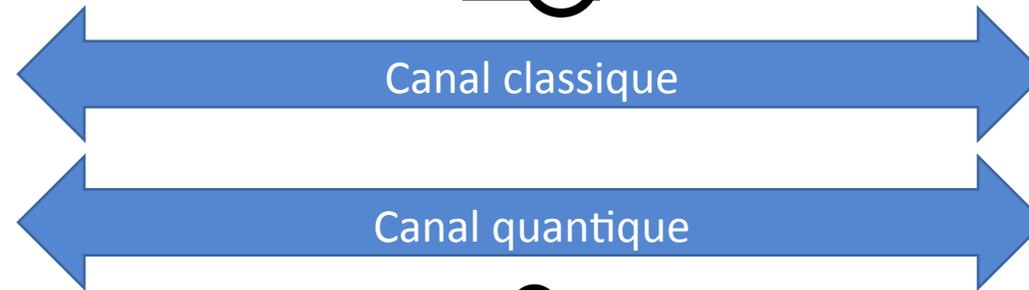
- Contrôle quantique (manipulation et protection des corrélations et cohérences)
- Théorie de l'information quantique: Algorithmique, Architectures, Code correcteur d'erreur, Intrication, Décohérence....

• Ingénierie des composants quantiques

- Technologie des composants, jusqu'au packaging
- Fiabilité
- Intégration et architectures
- Optique, mécanique et électronique de contrôle, cryogénie
- Software
-



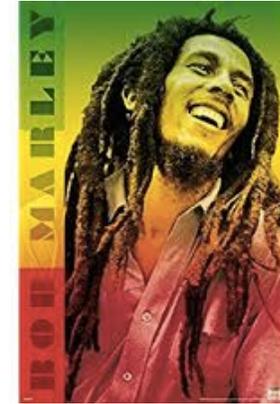
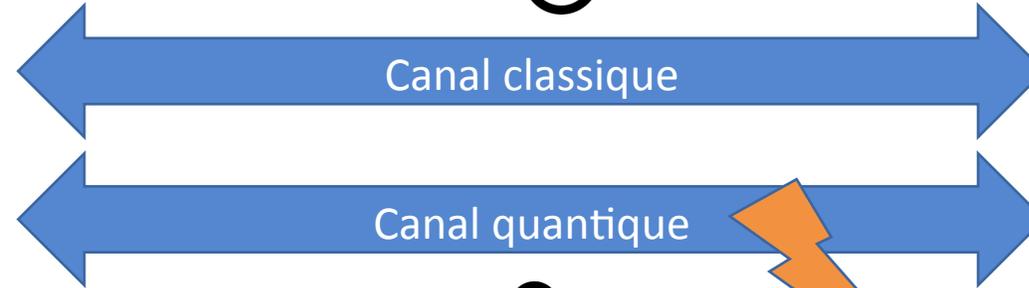
Les communications quantiques



$$\frac{|\leftrightarrow \leftrightarrow\rangle + |\updownarrow \updownarrow\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$



Les communications quantiques

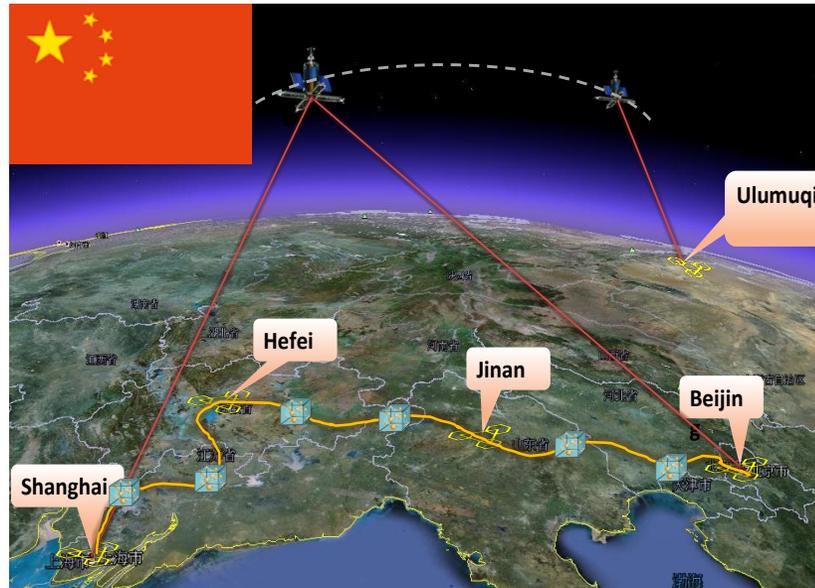


Sécurité absolue

Garantie par les lois de la mécanique quantique

(on ne peut prédire, connaître, manipuler ou dupliquer un état quantique aléatoire à sa guise)

Les communications quantiques



Septembre 2017 :

- démonstration de la 1^{ère} distribution de clé quantique satellite-Terre (719 km – 100 bits/s)
- démonstration de la 1^{ère} téléportation quantique entre la Terre et un satellite
- lancement du 1er réseau quantique terrestre (fibré) commercial

• Des enjeux scientifiques et technologiques

- Développement et certification des **composants et architectures** (sources, relais quantiques, mémoires quantiques et détecteurs)
- Protocoles pour les communications **longue distance et réseaux quantique intra / inter-cité**
- **Réseaux quantiques** interfaçant liens de communication, capteurs et processeurs
- Vers le **quantum internet**?

Les capteurs et l'imagerie quantiques

- Extrême sensibilité des objets quantiques aux perturbations extérieures

Champ magnétique, électrique

Atomes, ions,
défauts dans le
diamant ou silicium,
supraconducteurs,
électrons...

Temps, fréquence

Atomes, ions

Température, pression

défauts dans le
diamant

Rotation

Atomes, ions

Accélération

Atomes, résonateurs
mécaniques

Force

Ions, résonateurs
mécaniques

Déplacement, indice de réfraction

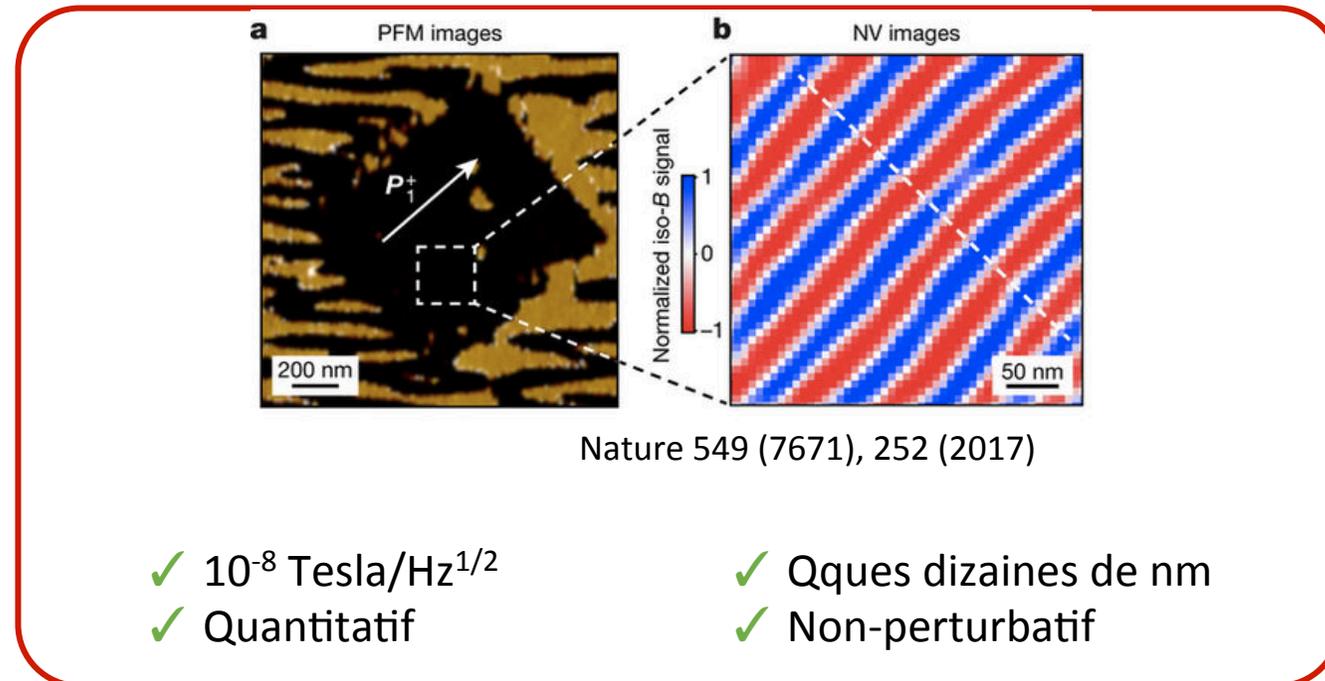
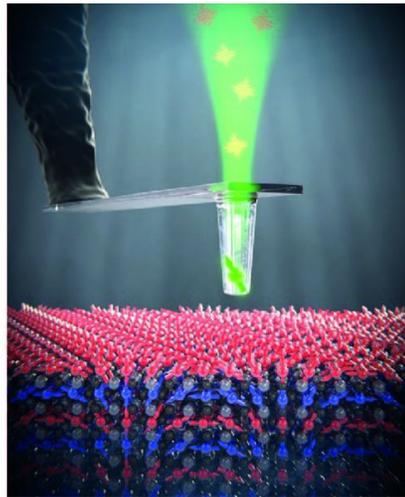
Photon

Masse

Résonateurs
mécaniques

Les capteurs et l'imagerie quantiques

- Les nanomagnétomètres à défaut dans le diamant



Champ magnétique

10^{-8} Tesla/Hz^{1/2}

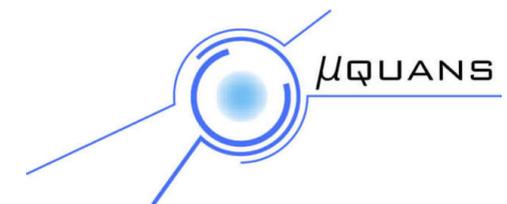


$\sim 10^{-5}$ Tesla



Les capteurs et l'imagerie quantiques

- Les enjeux aujourd'hui
 - Capteurs et systèmes d'imagerie exploitant la cohérence d'un bit quantique unique et dont les performances dépassent celles de leurs équivalents classiques
 - Intégration, prototypage et mise en place de standards métrologiques
 - Vers des capteurs exploitant l'intrication
 - Vers des produits commerciaux



La simulation quantique



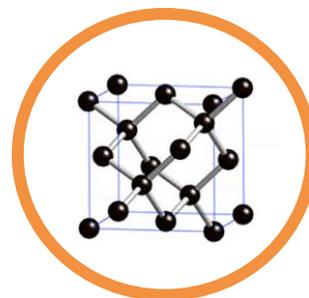
Simuler des problèmes physiques dont la complexité est telle qu'ils ne peuvent être résolus, y compris par nos ordinateurs les plus puissants



Astrophysique



Physique des hautes énergies



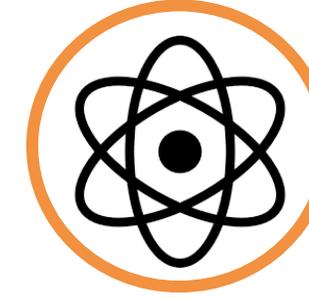
Matériaux



Chimie quantique



Biologie



Physique atomique

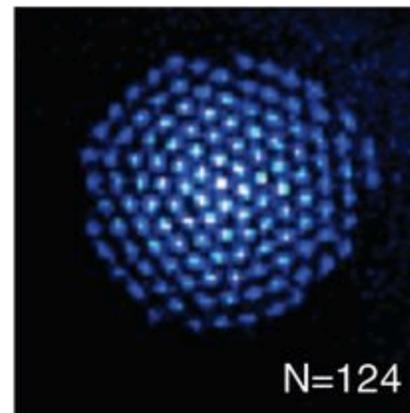
La simulation quantique



“Nature isn't classical, dammit, and **if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical.**” (1982)



Horloge astronomique de Prague



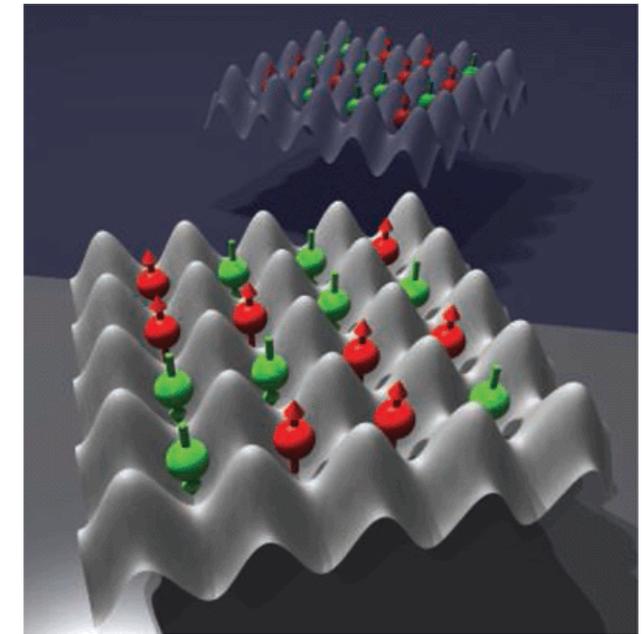
Science 352, 129 (2016) - NIST



Atomes,
ions,
photons,
bits supraconducteurs

La simulation quantique

- Les enjeux aujourd'hui
- Identifier des plateformes expérimentales montrant les bénéfices/potentiel de la simulation quantique et mettant en jeu plusieurs dizaines à quelques centaines de systèmes quantiques couplés
- Simulation de problèmes majeurs en science (ex : magnétisme quantique) et démonstration de l'optimisation quantique
- Prototype de simulateurs résolvant des problèmes inaccessibles aux capacités des supercalculateurs, incluant la chimie quantique, la conception de nouveaux matériaux et les problèmes d'optimisation

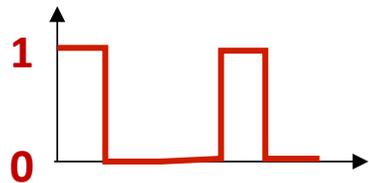


Science 05 Dec 2008:
Vol. 322, Issue 5907, pp. 1480-1481

L'ordinateur quantique

- La superposition d'état et l'intrication

La superposition d'état



Bit classique
0 ou 1

**N bits codent une valeur
parmi $N=2^n$**

\longleftrightarrow $\leftrightarrow |0\rangle$

Bit quantique
 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

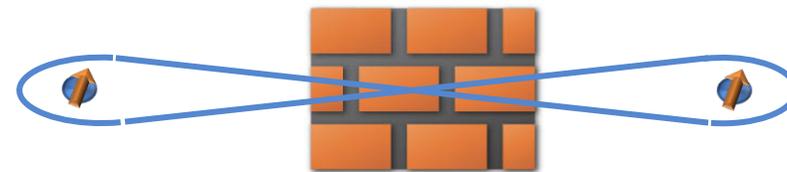
\updownarrow $\leftrightarrow |1\rangle$

**N bits codent une superposition
des $N=2^n$ valeurs**

\circlearrowleft $\leftrightarrow |0\rangle + |1\rangle$

2^n opérations en un seul cycle!!

L'intrication



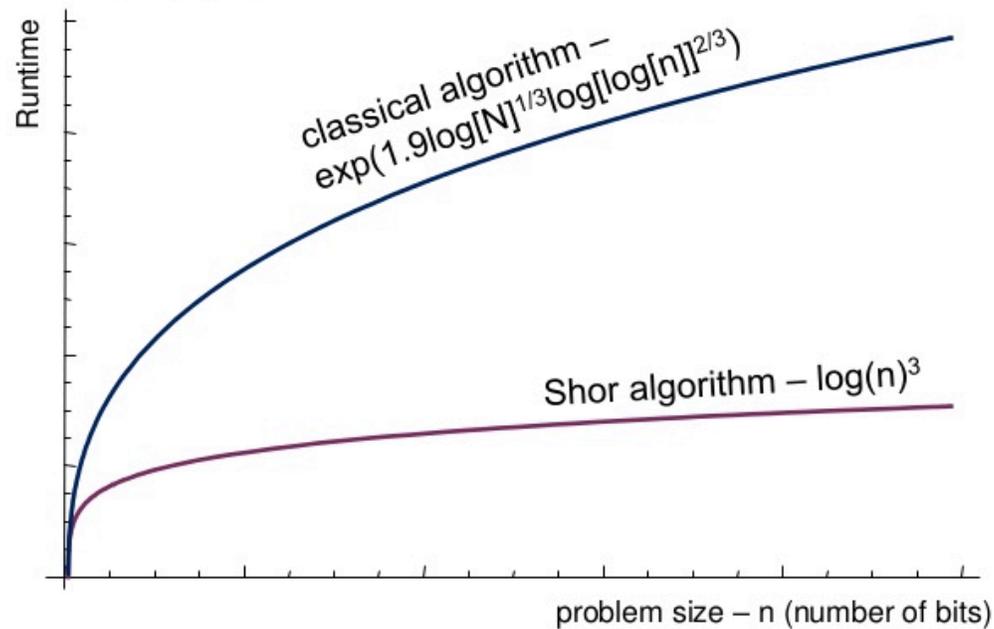
- **Parallélisme massif**
- **Grande puissance de calcul**
- **Résolution aisée de problèmes complexes**

L'ordinateur quantique

- Quels algorithmes?

Number Factorization: Shor Alg.

$r = q \cdot s$; q, s prime numbers



Algorithme ad-hoc (fonction constante ou équilibrée)

Deutsch-Josza - 1992

Factorisation

Shor - 1994

Recherche dans une base de données non triée

Grover - 1996

Problème d'optimisation

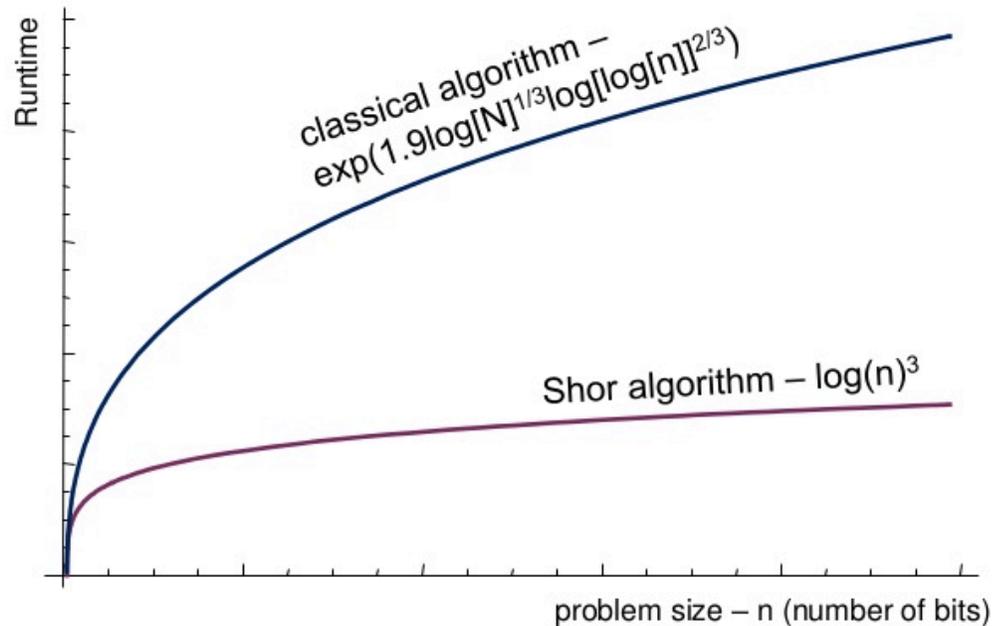
2003

L'ordinateur quantique

- Quels algorithmes ?

Number Factorization: Shor Alg.

$r = q \cdot s$; q, s prime numbers



Factorisation

Shor - 1994



10000000011 (= 1101 * 10111)

2012 : le nombre 21 a été factorisé par un ordinateur quantique !

Problème majeur :
« scalabilité » ???



L'ordinateur quantique

- Quelles réalisations?

Décohérence quantique!!

-> limitation dans l'augmentation du nombre de qubits (atomes, ions, supraconducteurs...)

Calculateur à usage restreint

« quantum annealing »

problèmes d'optimisation

2000 qubits

D:WAVE
The Quantum Computing Company™

Calculateur à usage ciblé

Simulation (Chimie quantique, matériaux...), échantillonnage, pbs d'optimisation...

Quelques dizaines qubits

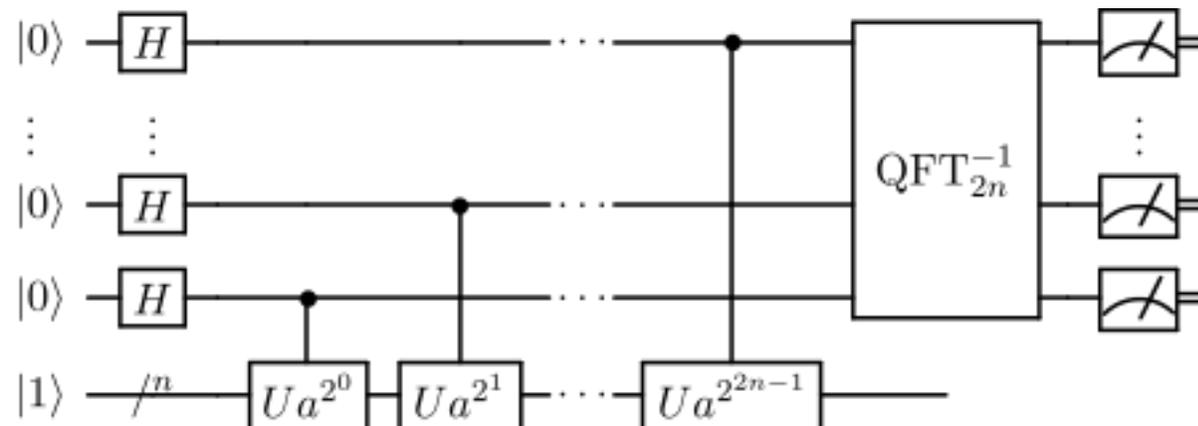
Ordinateur universel tolérant aux erreurs démontrant une accélération quantique

Cryptographie, recherche dans des bases, simulation (chimie quantique, matériaux,, sciences du vivant...), pbs d'optimisation, machine learning...

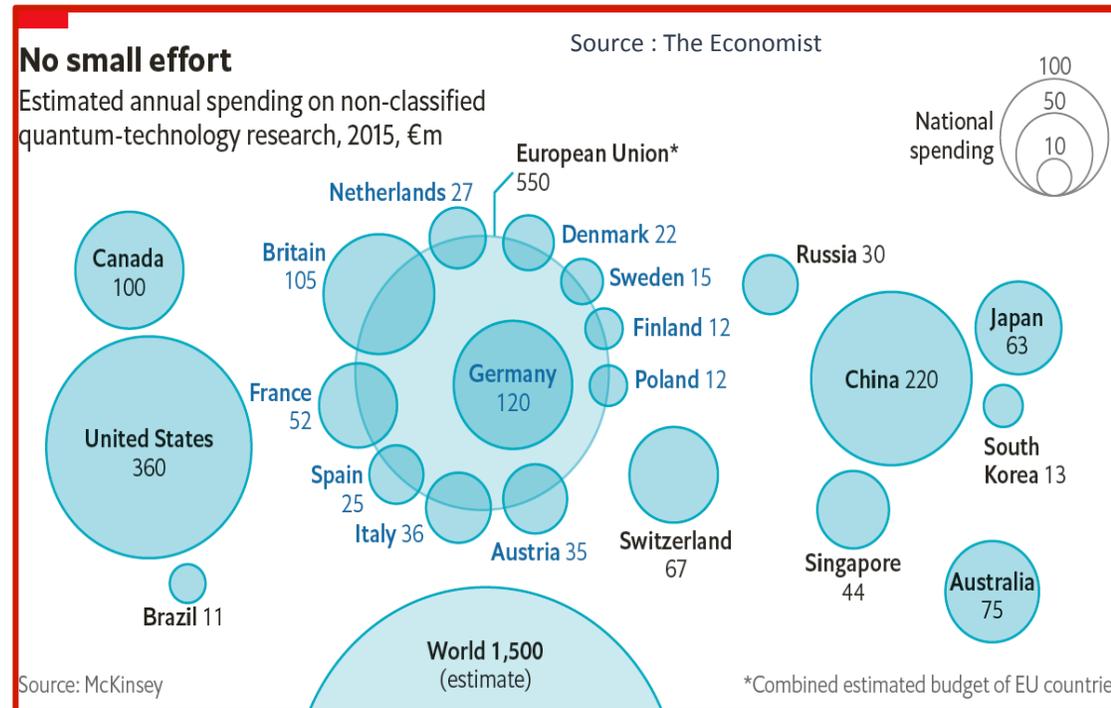
L'ordinateur quantique

- Les enjeux

- Protocoles de calcul tolérant aux erreurs sur des processeurs impliquant plus de 50 qubits
- Développement d'algorithmes de calcul prédisant une accélération quantique en regard de leurs équivalents classiques
- Vers un ordinateur quantique universel tolérant aux erreurs



Les technologies quantiques



Des géants en lice

QUANTUM FLAGSHIP
 2018-2027

Un investissement Européen à hauteur d'un milliard d'euros

TRIBUNE

Charles Beigbeder
 Créateur de fonds d'investissement

Christophe Jurczak
 Créateur de fonds d'investissement

Edition du 26/3/2019

« Les technologies quantiques sont en passe de révolutionner des pans entiers de l'économie »

Créateurs d'un fonds d'investissement technologique, Charles Beigbeder et Christophe Jurczak plaident dans une tribune au « Monde » pour une politique publique de soutien aux « technologies de rupture » qu'offre l'ingénierie issue de la physique quantique

Publié le 26 mars 2019 à 18h40 - Mis à jour le 26 mars 2019 à 19h01 | Lecture 4 min.

TRIBUNE

Paul François Fournier
 Directeur exécutif de Bpifrance, en charge de l'innovation

Edition du 24/6/2019

« La France a tous les atouts pour devenir un leader économique et intellectuel dans le domaine des technologies quantiques »

Paul-François Fournier, directeur de Bpifrance, plaide dans une tribune au « Monde » pour un soutien public au développement de la recherche et de nouvelles entreprises dans le secteur stratégique des « technologies » issues de la physique quantique.

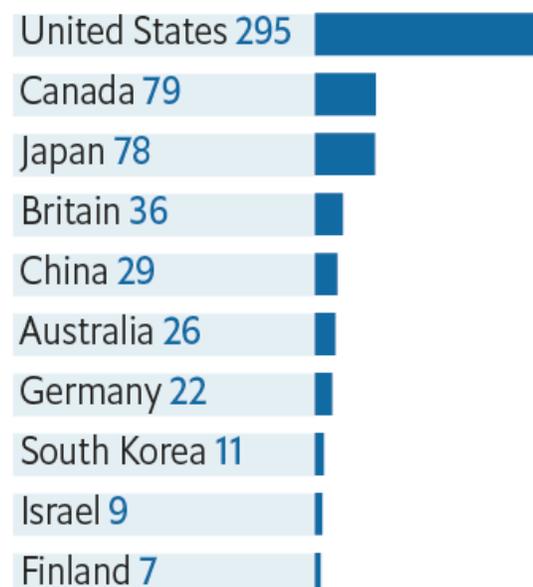


Quels acteurs? Quels investissements?

Excited states

Patent applications to 2015, in:

Quantum computing



Quantum cryptography

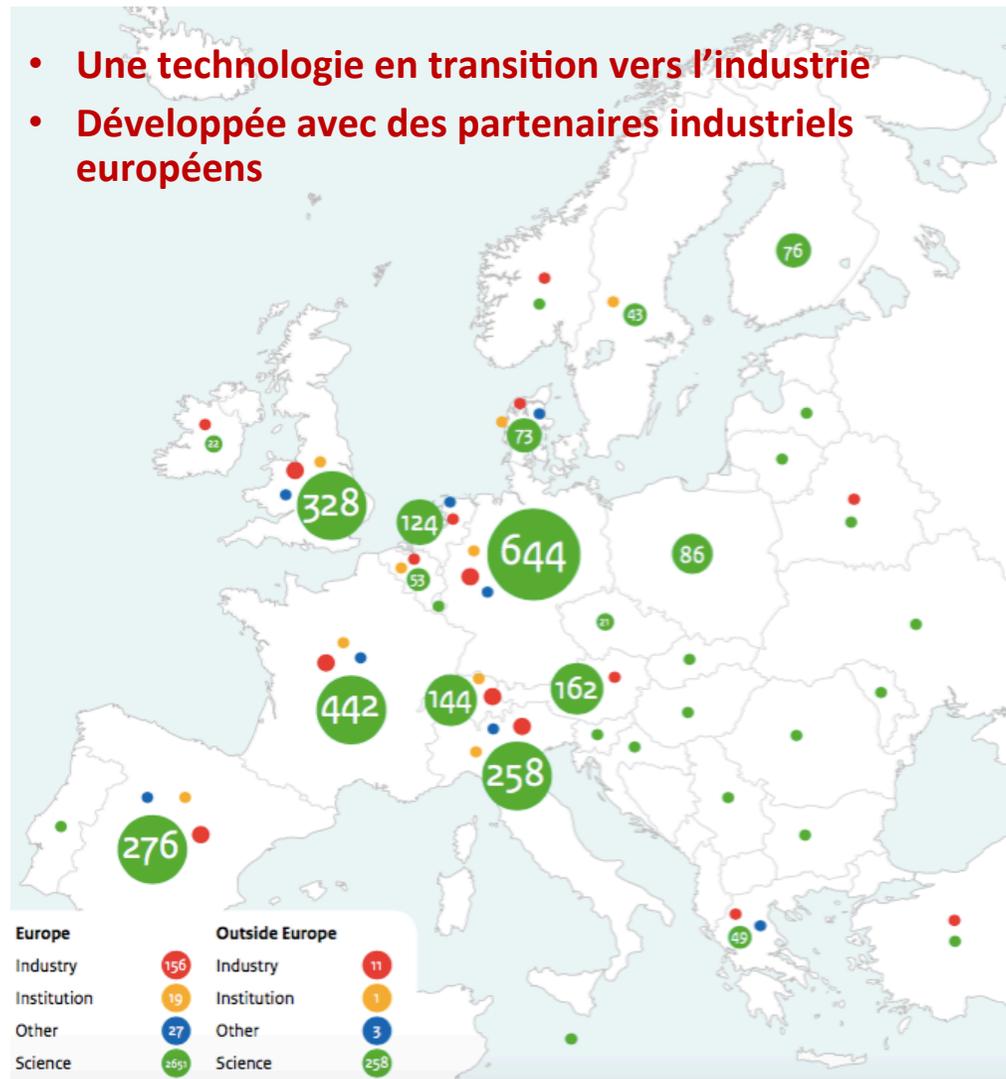


Quantum sensors

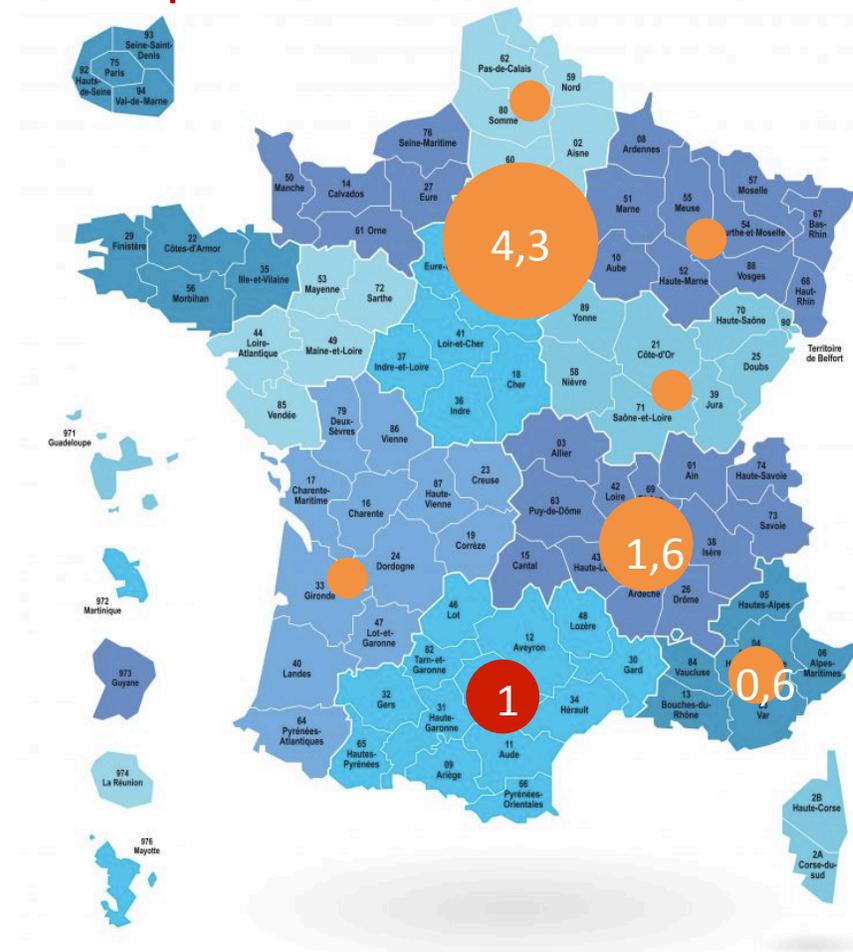


Quels acteurs en Europe? En France?

- Une technologie en transition vers l'industrie
- Développée avec des partenaires industriels européens



- L'Occitanie : 3ème Région en termes de forces académiques



Les communications quantiques

- Des marchés

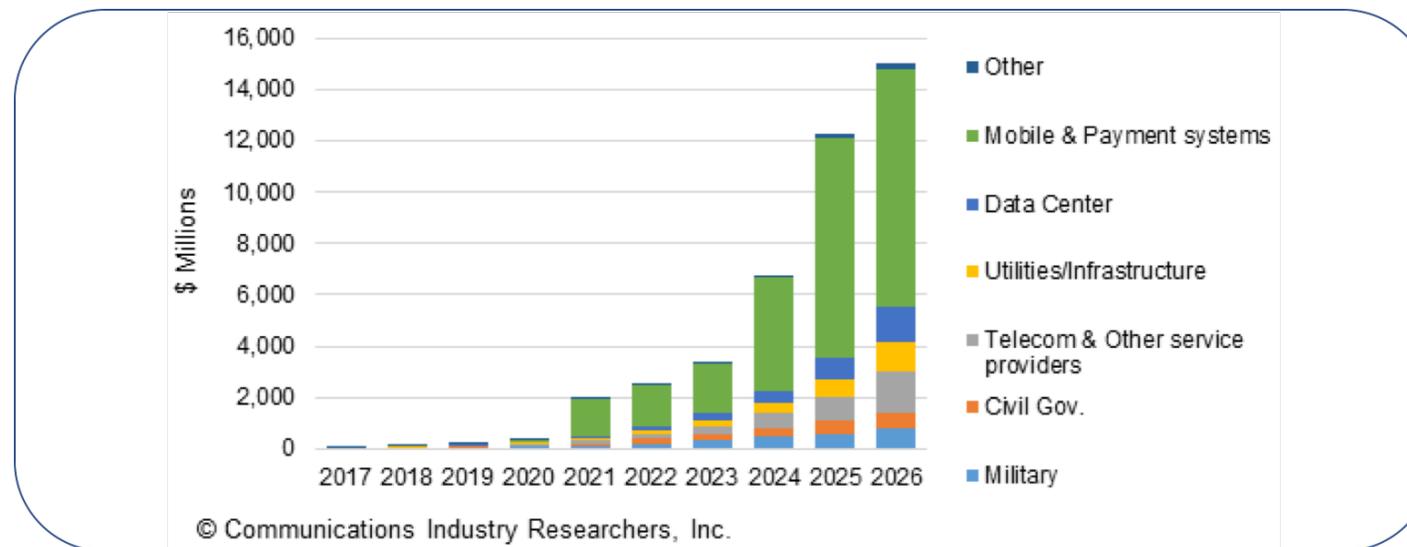
- Télécommunications sécurisées

- sécurité, défense...
- applications commerciales, transactions
- protection des données personnelles
- Authentification



- Génération et certification de nombres aléatoires

- cryptographie
- simulations informatiques
- jeux en ligne et casinos
- ...





Les communications quantiques

- Des solutions commerciales



(Suisse)



(Australie)



(Etats-Unis)



(Royaume-Uni)

- Des spin-offs

Sources de photons uniques



(Royaume-Uni)



(France)



Détecteurs de photons uniques



(Allemagne)



(Pays-Bas)



(Russie)

Les capteurs et l'imagerie quantiques

- Quels marchés?



aérospatial



défense & sécurité



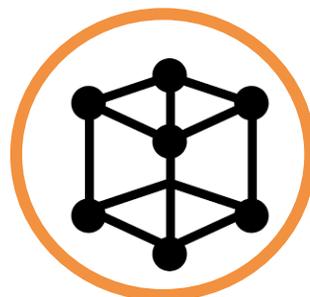
navigation



diagnostic médical



Capteurs pour la chimie et biochimie



Capteurs pour les sciences des matériaux



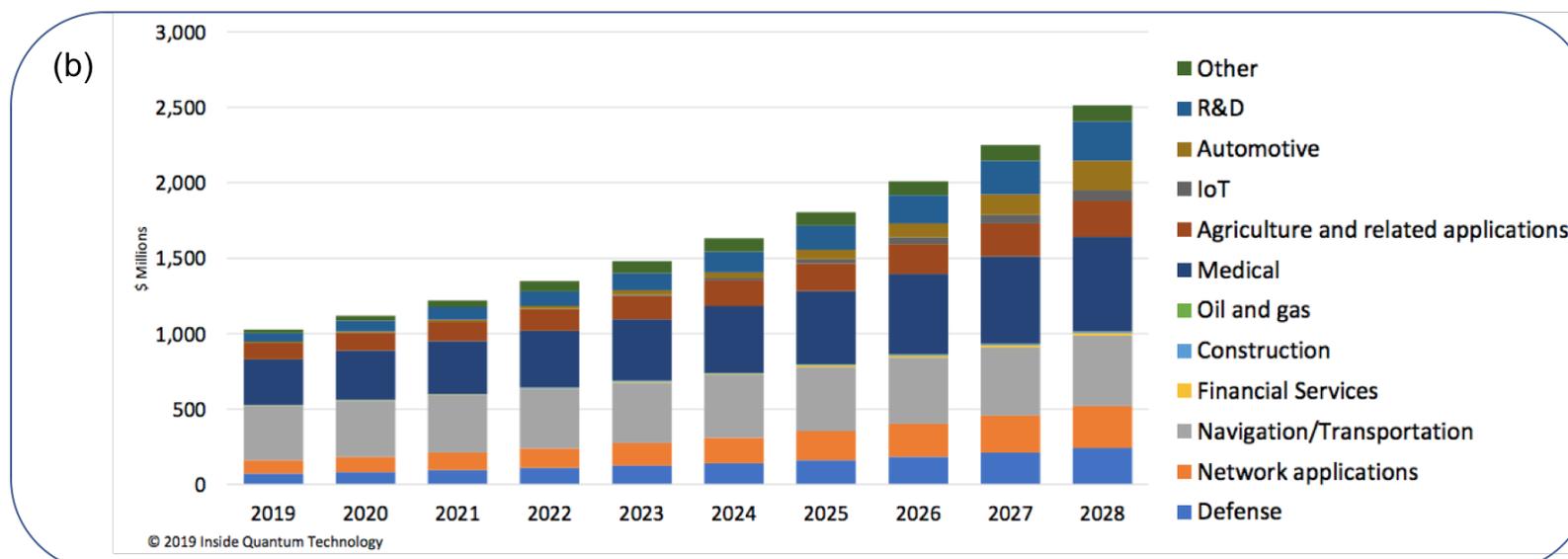
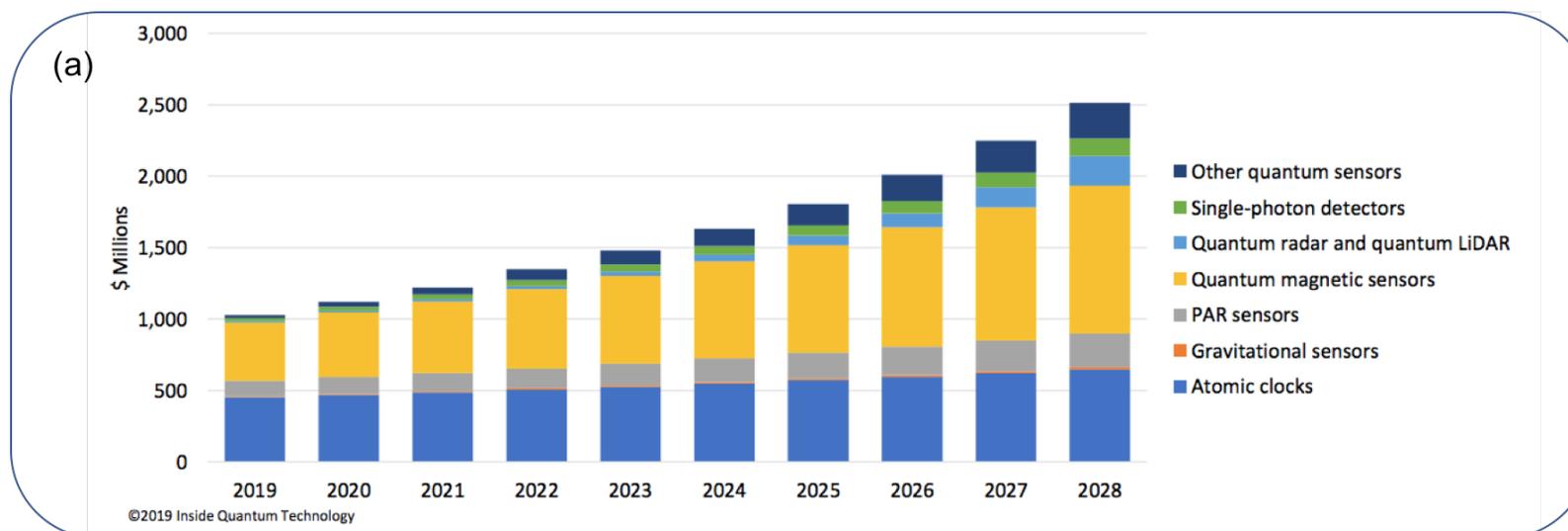
Géophysique



Métrologie industrielle

Les capteurs et l'imagerie quantiques

- Quels marchés?



L'ordinateur quantique

- Quels marchés?



Défense & aérospatial



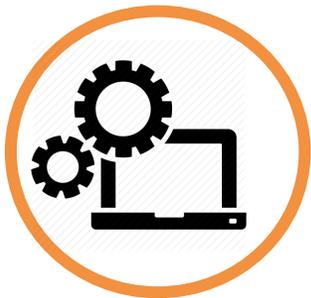
Finance



Pharmaceutique & matériaux



Santé



Technologies de l'information



Energie



Transport



R&D

Les technologies quantiques en Occitanie

- Quels acteurs?





Les technologies quantiques en Occitanie

- Quels acteurs?

Des acteurs académiques









Plus de **1300** chercheurs/mois par an



Plus de **500** publications par an



Plus de **4 M€** de financement contractuel par an

Un écosystème industriel






Les technologies quantiques en Occitanie

• Se rassembler pour...



Agence de Développement Économique



2018

- **Mars/Juin** : Journée « Calcul quantique » à IBM - Montpellier et au CERFACS - Toulouse
- **Juin** : Atelier « Technologies quantiques » lors des journées Digital Place - Toulouse
- **Septembre**: Groupe de Travail « Technologies quantiques » - SRI
- **Novembre**: Réunion annuelle du GdR IQFA – Montpellier
- **Décembre** : Séminaire au CNES



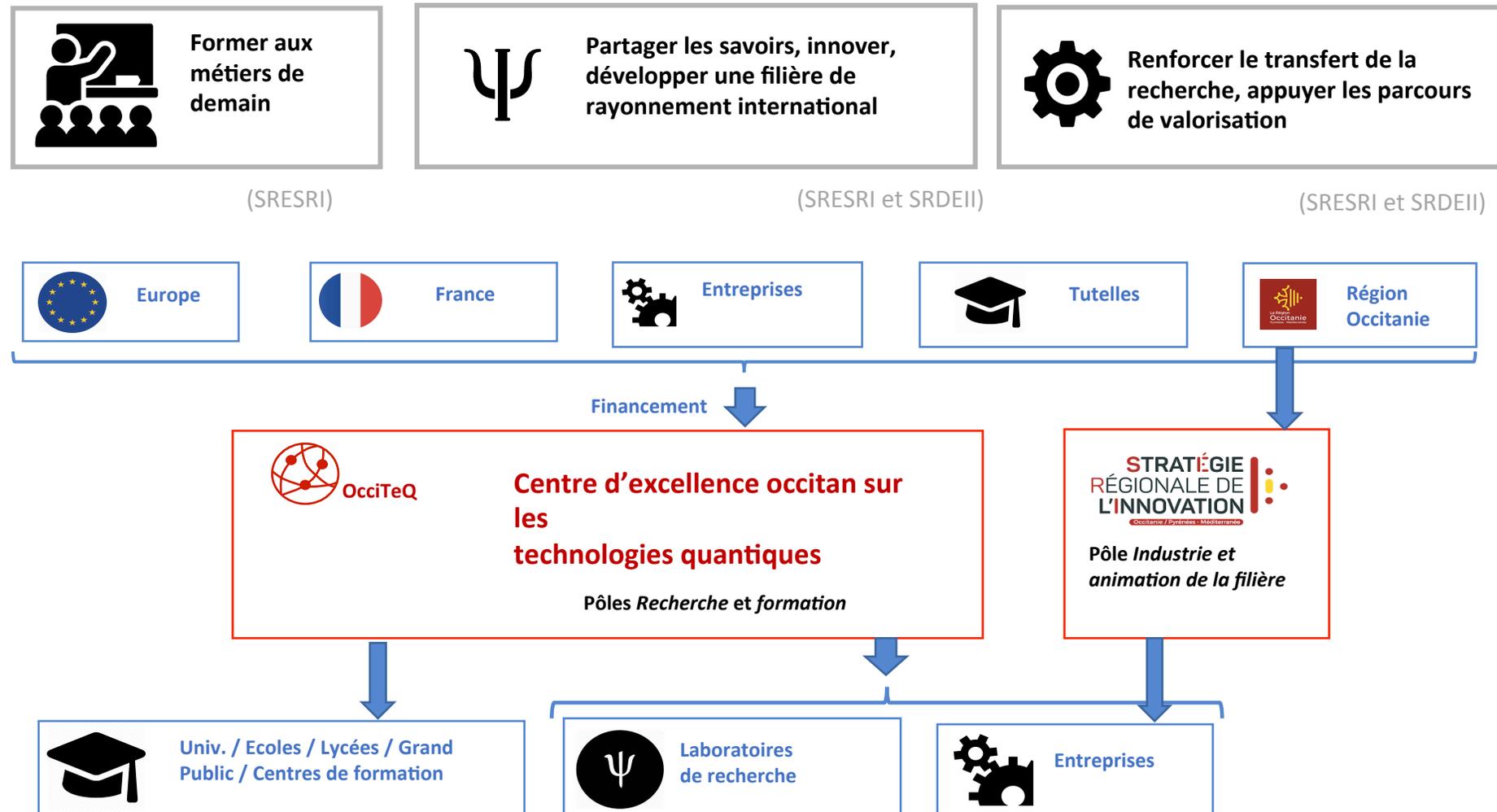
2019

- **Avril** : séminaire au CCRRDT
- **Mai** : séminaire pour les Services de la Région
- **Septembre** : Journée « Capteurs et imagerie quantiques » - Toulouse
- **Juin / Octobre** : Formation calcul quantique avec le CINES – Montpellier



Les technologies quantiques en Occitanie

- Quels acteurs?



Les technologies quantiques en Occitanie

- Un accompagnement de la Région

- Projet QuantUM



Favoriser l'émergence en Région Occitanie d'un réseau de partenaires publics et privés travaillant sur les sujets du calcul quantique, ainsi que le développement de compétences quantiques



Préparer aux métiers de demain sur le calcul quantique en développant une offre de formation de qualité de la L3 au doctorat et étendre cette offre vers la formation professionnelle

- Six thèses cofinancées sur les technologies quantiques



Pour plus de détails



La communauté : <http://quope.eu/>

Les minutes : <http://quope.eu/h2020/qtflagship/qtflagshipcommunityconsultationworkshop>

Quantum manifesto : http://quope.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf

Perspectives industrielles : <http://qcit.committees.comsoc.org/files/2017/05/Industry-perspectives-of-Quantum-Technologies.pdf>

Les technologies quantiques en Occitanie

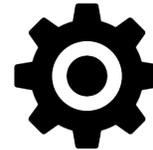


OcciTeQ

**Centre d'excellence occitan sur
les
technologies quantiques**



Plus de 1300 chercheurs.mois par an
Plus de 500 publications par an
1 recherche d'excellence



En présence d'**un écosystème industriel**



En soutien à une **filière d'innovation d'actualité**



Vers une **offre large de formation**