

Les technologies quantiques des fondements de la mécanique quantique aux applications

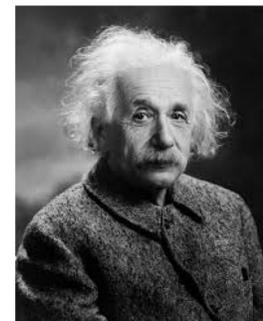
Isabelle Robert-Philip

CNRS – Université de Montpellier - Laboratoire Charles Coulomb



La mécanique quantique

- Une théorie née au début du XX^{ème} 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



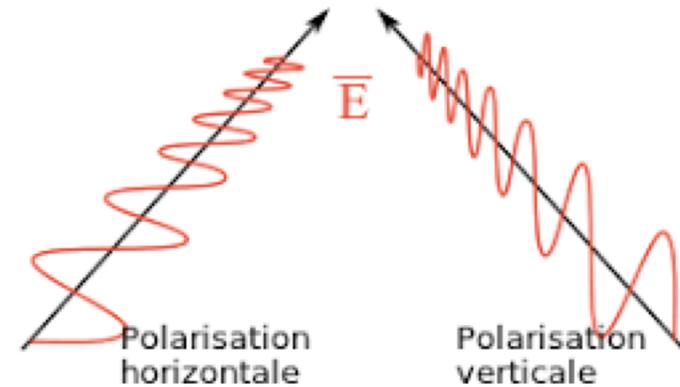
Le transistor



L'IRM

Les technologies quantiques 2.0

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



$$\longleftrightarrow |H\rangle$$

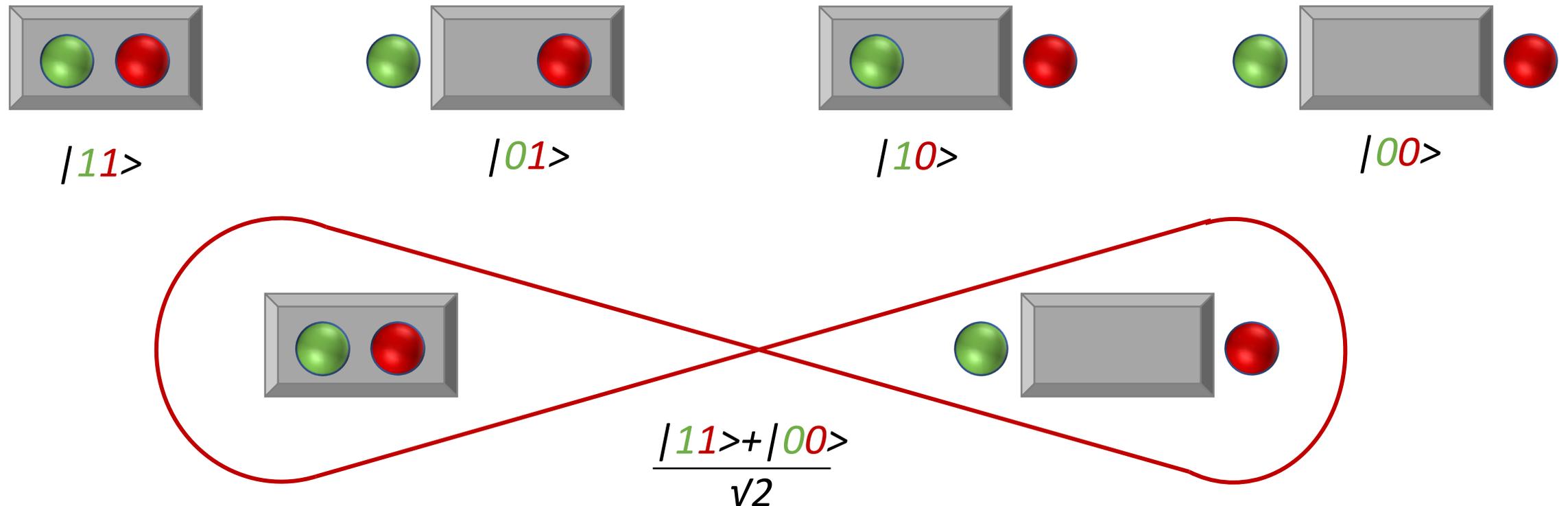
$$\nwarrow \nearrow |A\rangle \propto |R\rangle - i|L\rangle$$

$$\updownarrow |V\rangle$$

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

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

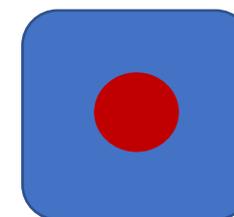
- Codage de l'information : le bit classique 0 ou 1

«quantique» : « 01110001 01110101 01100001 01101110 01110100 01101001 01110001 01110101 01100101 »

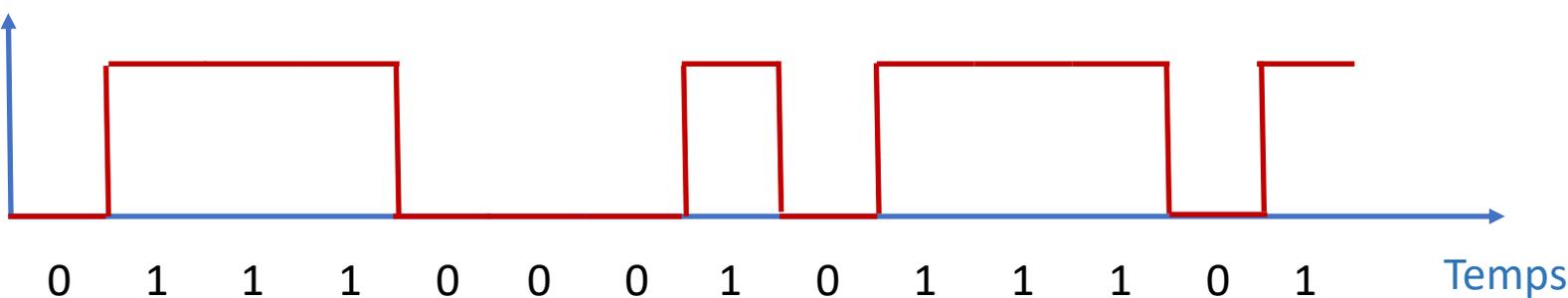
Bit 0



Bit 1



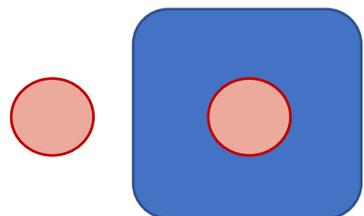
Amplitude du signal
(électrique, optique...)



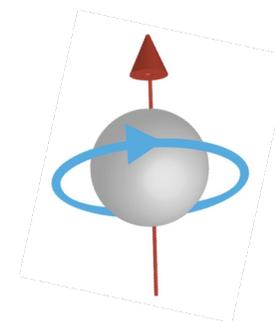
Les technologies quantiques 2.0

- Le bit quantique : superposition d'état!

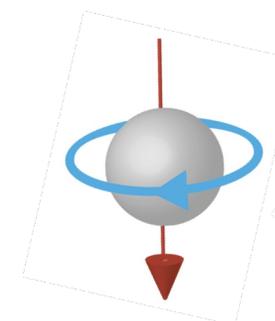
Bit : $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$



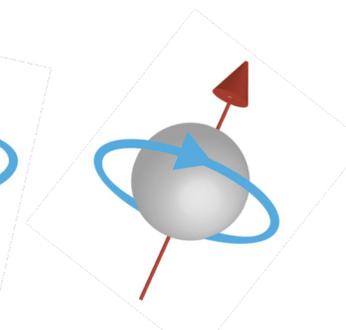
Spin de l'électron :



$|0\rangle$



$|1\rangle$



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

- Une grande variété de supports quantiques

Une grande variété d'objets quantiques

Atomes

Ions

Circuits électroniques
quantiques

Molécules

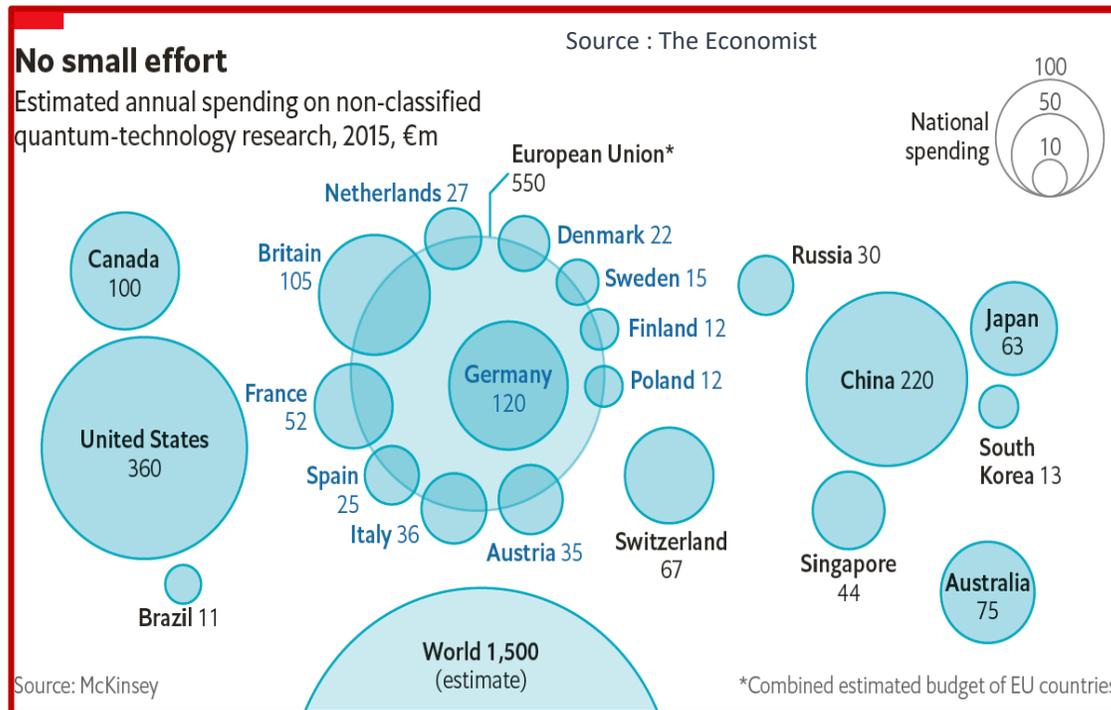
Nanoressorts

Electrons

Photons

Spins nucléaires

Les technologies quantiques



Des géants en lice

**QUANTUM
FLAGSHIP**
2018-2027

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

**Stratégie nationale
sur les technologies
quantiques**

Les technologies quantiques

Source : The Economist

100
50

No small effort

Estimated annual spending on non-classified quantum-te

Des géants en lice

Canad 100

United

Le Monde

Edition du 26/3/2019

TRIBUNE

Charles Beigbeder
Créateur de fonds d'investissement

Christophe Jurczak
Créateur de fonds d'investissement

« 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.

ibaba Group
阿里巴巴集团

d'un

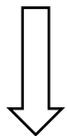
Source: McKin

sur les technologies
quantiques



Les 4 piliers à finalité applicative

Communications quantiques

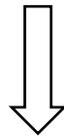
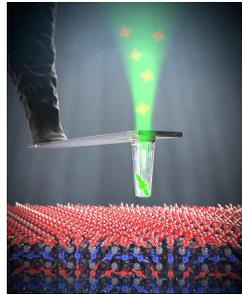


sécurité
absolue des
transmissions

1 à quelques
qubits



Capteurs quantiques

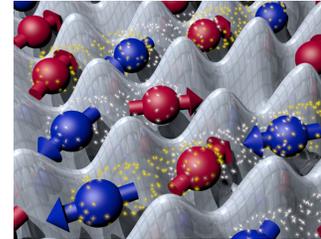


meilleures
sensibilité &
résolution

1 à quelques
qubits

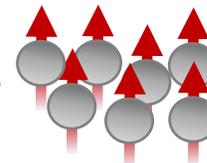


Simulation quantique

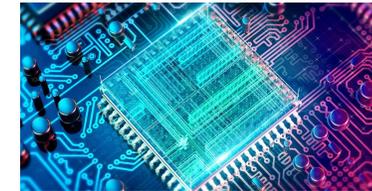


réactions
chimiques &
matériaux

Centaines
à milliers de
qubits



Calcul quantique



puissance de
calcul inégalée

Dizaines
à centaines de
qubits

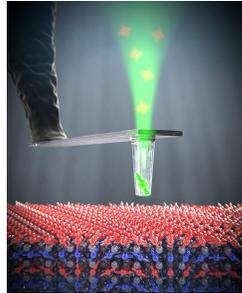


Les 4 piliers à finalité applicative

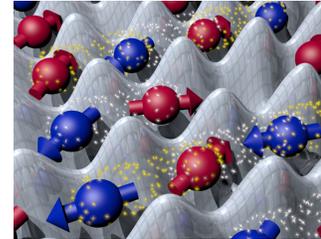
**Communications
quantiques**



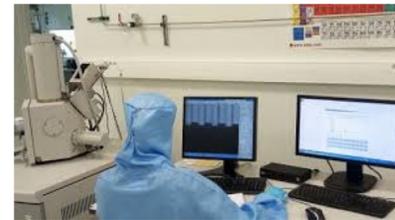
**Capteurs
quantiques**



**Simulation
quantique**



Ingénierie



transmissions

résolution

matériaux

L'ingénierie quantique

• Ingénierie science de la matière

- Quel support au bit quantique?
- Comment initialiser, contrôler et lire les bits quantiques ?
- Comment interfacier plusieurs bits quantiques et contrôler leurs interactions?
- Comment passer à grande échelle et contrôler les processus de décohérence?

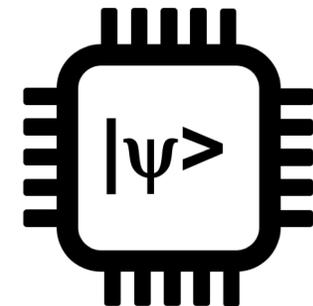
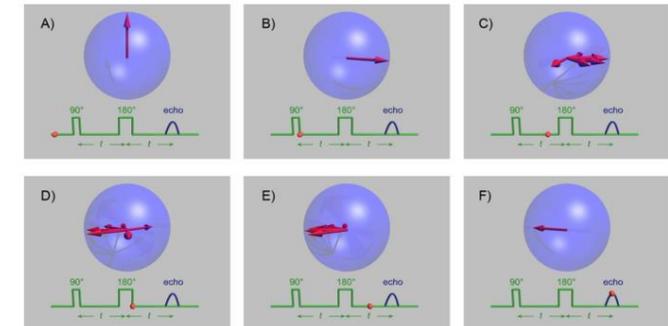
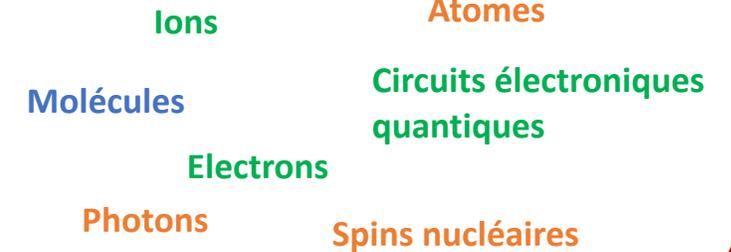
• Ingénierie des états quantiques

- Comment manipuler et contrôler les processus de décohérence?
- Théorie de l'information quantique: algorithmique, architectures, codes correcteur d'erreur,

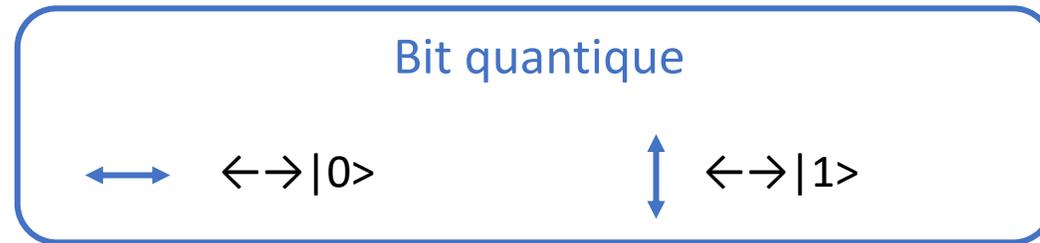
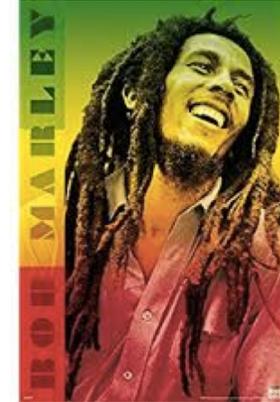
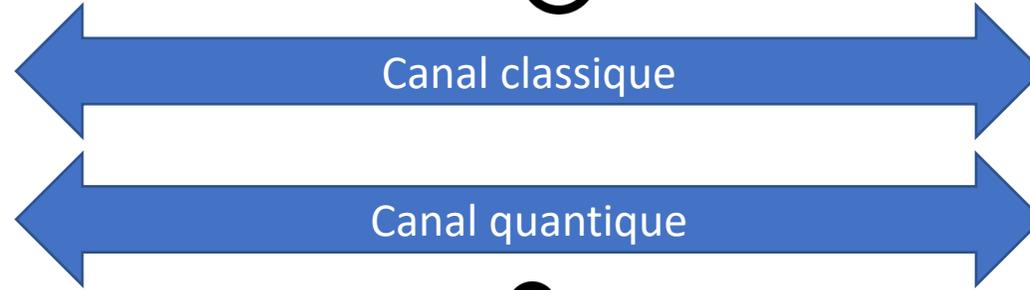
• Ingénierie des composants quantiques

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

Une grande variété d'objets quantiques



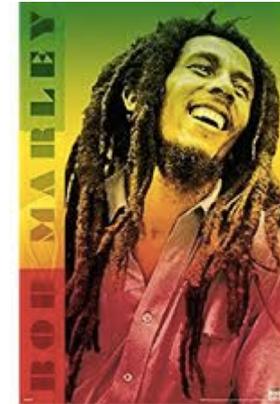
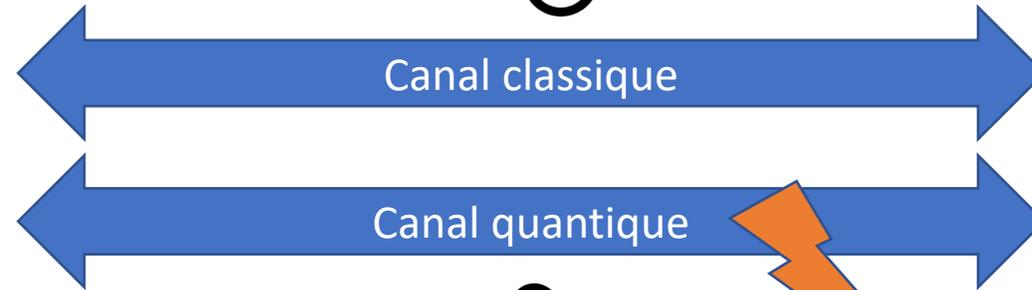
Les communications quantiques



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



Les communications quantiques

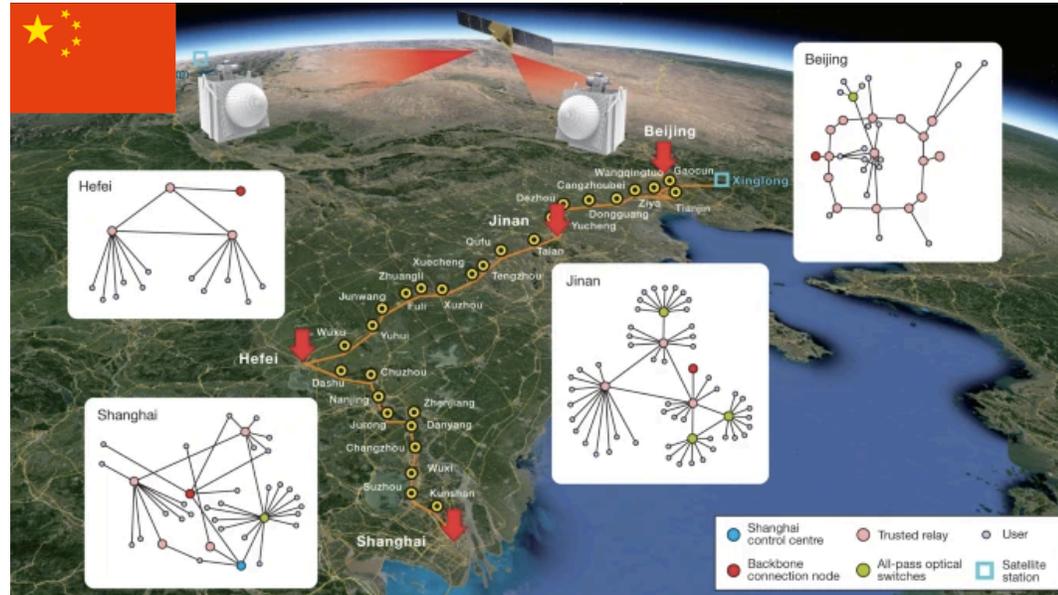


Sécurité absolue

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 (1200 km – kbits/s) (Nature 549, 43 (2017)).
- démonstration de la 1^{ère} téléportation quantique entre la Terre et un satellite (Nature 549, 70 (2017))

Janvier 2021 :

- Réseau quantique intégré terre-satellite de 4600 km (Nature 589, 214 (2021))

• Des enjeux scientifiques et technologiques

- Développement et certification des **composants et architectures** (sources, relais quantiques, mémoires, 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** (interfaçage à distance, transport d'information quantique...)?
- Développement de protocoles de chiffrement résilient à l'algorithme de Shor (**cryptographie post-quantique**)

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
- ...



• Des solutions commerciales



(Suisse)



(Australie)



(Etats-Unis)



(Etats-Unis)



(Royaume-Uni)



(Royaume-Uni)



Post-Quantum

(Royaume-Uni)

• Des spin-offs

Sources de photons uniques



(Royaume-Uni)



(France)



(Allemagne)



(Pays-Bas)



(Russie)

Détecteurs de photons uniques

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**

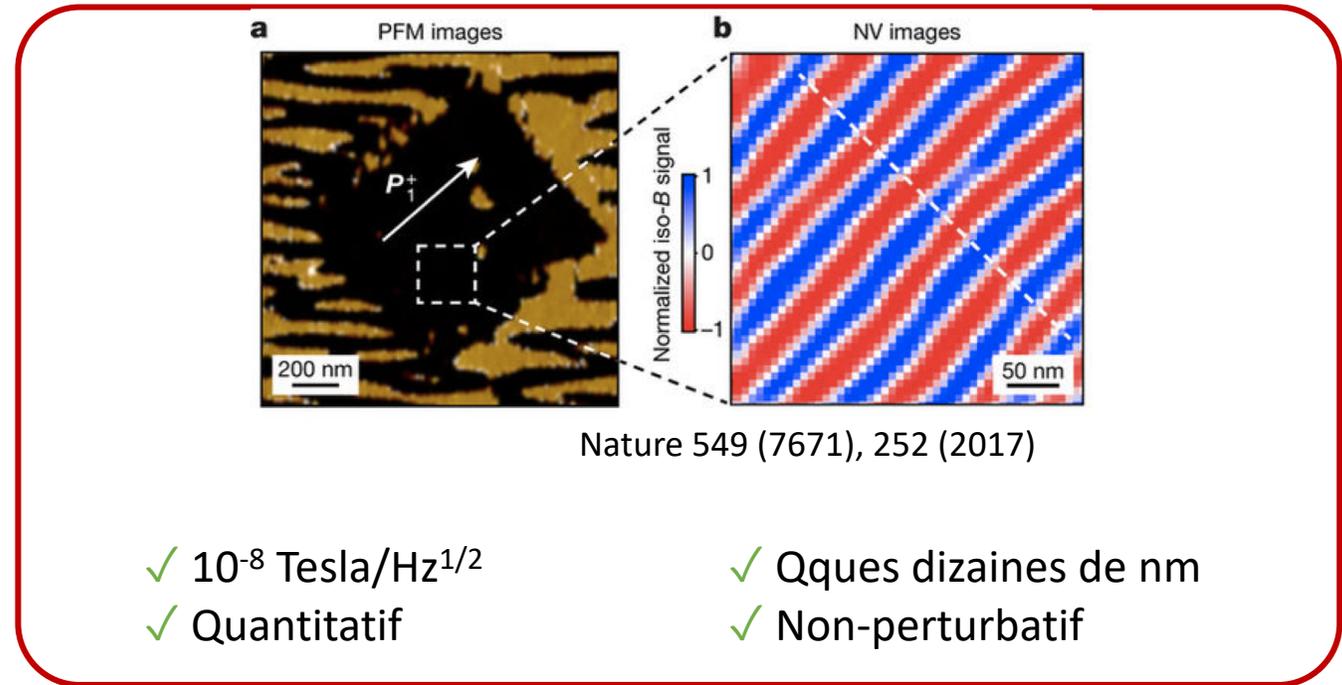
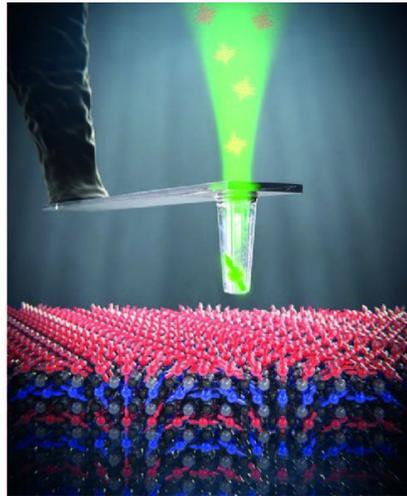
Photon

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 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

- Quels marchés?



aérospatial



défense & sécurité



navigation



diagnostic médical



Capteurs pour la chimie et biochimie



Capteurs pour les sciences des matériaux



Géophysique



Métrologie industrielle

La simulation quantique



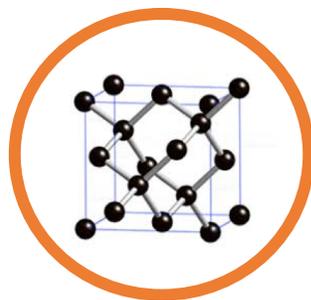
Simuler des problèmes physiques dont la complexité est telle qu'ils ne peuvent être résolus, y compris par nos ordinateurs les plus puissants



Astrophysique



Physique des hautes énergies



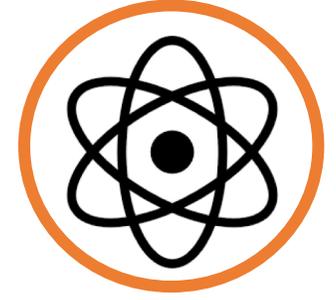
Matériaux



Chimie quantique



Biologie



Physique atomique

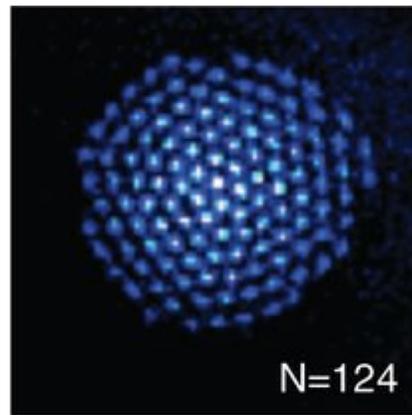
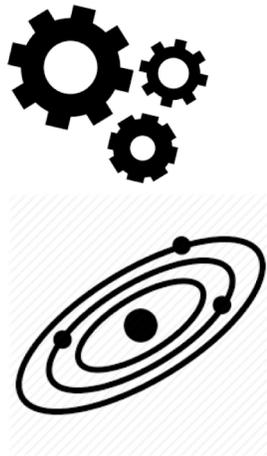
La simulation quantique



“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



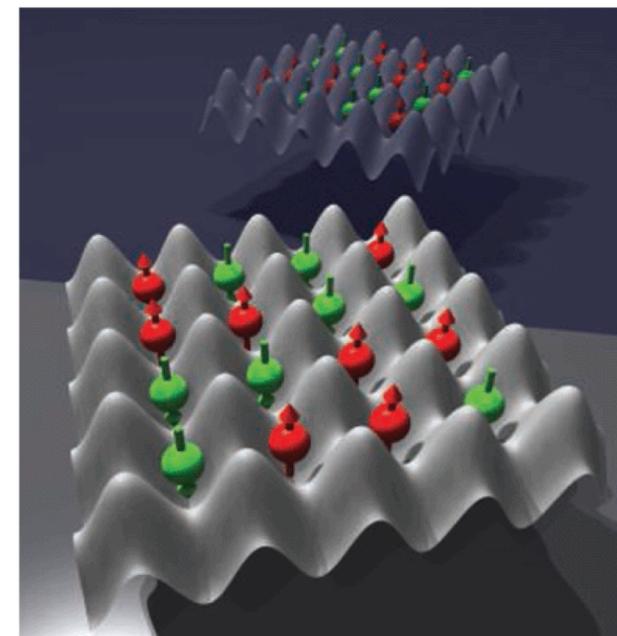
Science 352, 129 (2016) - NIST



Atomes,
ions,
photons,
bits supraconducteurs

La simulation quantique

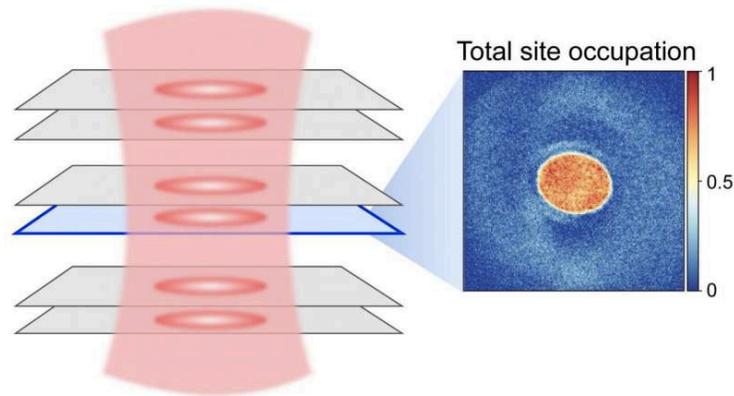
- Les enjeux aujourd'hui
- Identifier des plateformes expérimentales montrant les bénéfices/potentiel de la simulation quantique et mettant en jeu plusieurs dizaines à quelques centaines de systèmes quantiques couplés
- Simulation de problèmes majeurs en science (ex : magnétisme quantique)
- Prototype 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

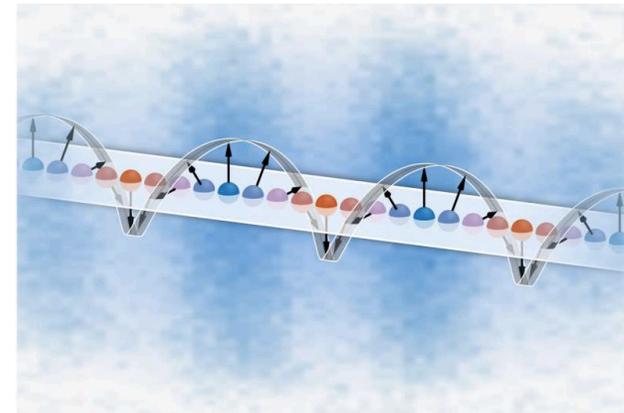
La simulation quantique

Modèle de Fermi-Hubbard pour des bicouches



Nature **589**, 40 (2021)
Illustration : phys.org

Modèle de Heisenberg décrivant les spins sur un réseau

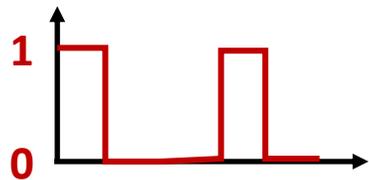


Nature **588**, 403 (2020)
Illustration : phys.org

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 $N=2^n$

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

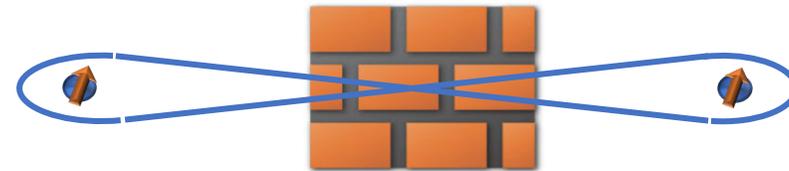
\longleftrightarrow $\leftrightarrow |0\rangle$

\updownarrow $\leftrightarrow |1\rangle$

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

N bits codent une superposition
des $N=2^n$ valeurs
 2^n opérations en un seul cycle!!

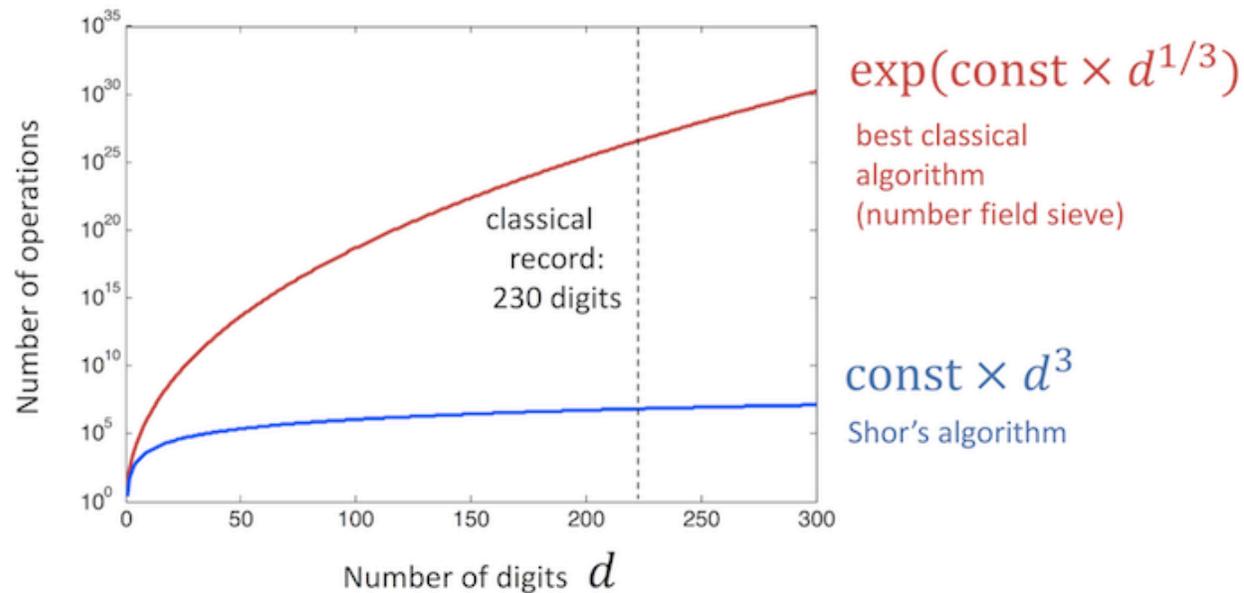
L'intrication



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

L'ordinateur quantique

- Quels algorithmes?



Source : <https://quantum-computing.ibm.com/docs/iqx/guide/shors-algorithm>

Algorithme ad-hoc (fonction constante ou équilibrée)
Deutsch-Josza - 1992

Factorisation
Shor - 1994

Recherche dans une base de données non triée
Grover - 1996

<https://math.nist.gov/quantum/zoo/>

L'ordinateur quantique

- Quels algorithmes?

Transformée de Fourier et problème de sous-groupe caché

Estimation de phase, factorisation, recherche de période, logarithme discret....

Recherche et optimisation

Recherche d'un élément dans une liste, comptage quantique, optimisation adiabatique...

Marches quantiques

Marches aléatoires dans des graphes, logiques booléennes...

Simulation

Hamiltoniens...

Algèbre linéaire

Résolution de systèmes linéaires...

<https://math.nist.gov/quantum/zoo/>

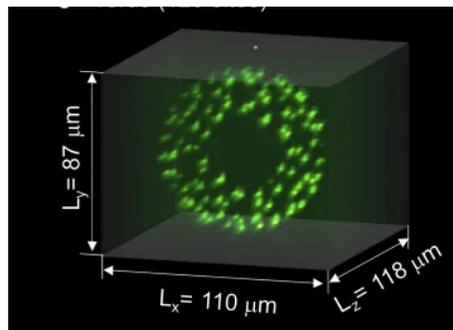
Source : njp Quant. Information **2**, 15023 (2016)

L'ordinateur quantique

- Quelles réalisations?

Calculateurs analogiques

Atomes Ions
 Molécules Electrons
 Photons Spins nucléaires
 Qubits supraconducteurs

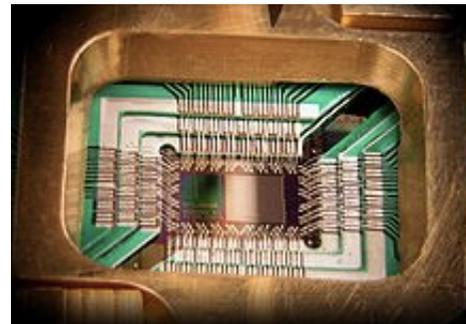


Nature 561, 79 (2018).

Simulation

Calculateur à recuit simulé

Qubits supraconducteurs
 (5000 qubits)



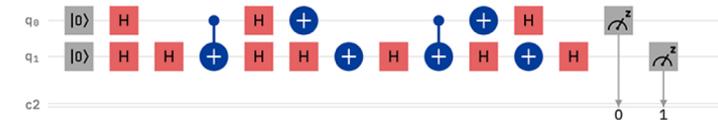
Source : D-Wave

Optimisation, simulation

Calculateur à circuits quantiques

Qubits supraconducteurs
 (50-100 qubits)

Ions (20-53 qubits) Circuits topologiques
 Qubits silicium Photons (qqes qubits)



Source : IBM

L'ordinateur quantique

- Quelles réalisations?

Calculateurs analogiques

OXFORD
IONICS

 PASQAL

ATOM
COMPUTING

IQEra

Calculateur à recuit simulé

D:wave
The Quantum Computing Company™

Calculateur à circuits quantiques

IBM **rigetti**
Google **intel**

 Microsoft

 **NTT**

 **IONQ** **Honeywell**

L'ordinateur quantique

- Quelles réalisations?

Calculateurs analogiques

Calculateur à
recuit simulé

Calculateur à
circuits quantiques

Emulateur quantique en supercalculateur



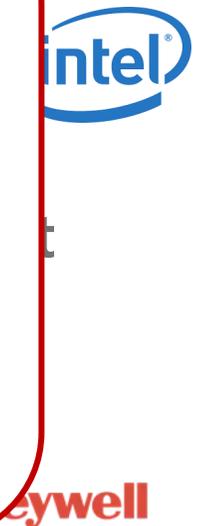
IBM

Google

Microsoft

Atos

FUJITSU



L'ordinateur quantique

- Quelles réalisations?

Décohérence quantique!!

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

Calculateur à usage restreint

« recuit quantique »
Optimisation, simulation

Calculateur à usage ciblé

« circuits et portes logiques quantiques »

Simulation (chimie, matériaux...),
échantillonnage, pbs d'optimisation...

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

- Quelles réalisations?

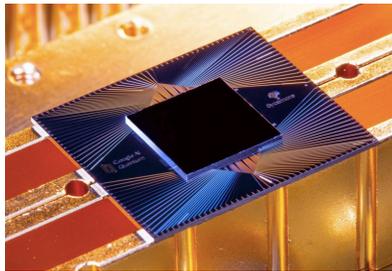
Suprématie quantique

(insoluble avec des supercalculateurs en temps « humain »)

versus

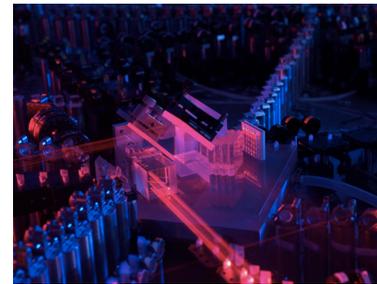
Avantage quantique

(plus rapide qu'avec des supercalculateurs)



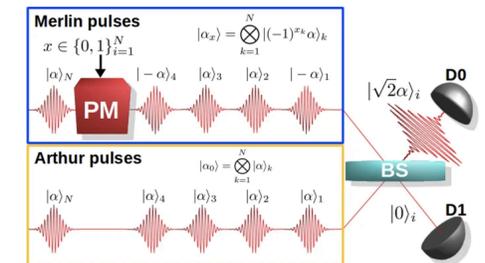
Qubits supraconducteurs

Nature **574**, 505 (2019) - échantillonnage de la sortie d'un circuit quantique pseudo-aléatoire



Photons

Science **370**, 1460 (2020) – boson sampling



Photons

Nat. Comm. **12**, 850 (2021) – Problème NP (non déterministe polynomial)

L'ordinateur quantique

- Les enjeux
- **Identification des plateformes** les plus prometteuses, en termes d'applications, coûts de développement et de déploiement... (recuit simulé quantique, calcul quantique analogique, circuits quantiques à portes logiques...)
- Développement et intégration de **codes correcteurs d'erreurs et de protocoles de calcul tolérant aux erreurs**
- Développement de nouveaux **algorithmes de calcul prédisant une accélération quantique** en regard de leurs équivalents classiques
- Vers un **ordinateur quantique universel tolérant aux erreurs**

L'ordinateur quantique

- Quels marchés?



Défense &
aérospatial



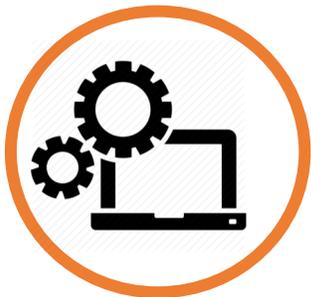
Finance
& Assurance



Pharmaceutique
& matériaux



Santé



Technologies de
l'information



Energie



Transport
& logistique



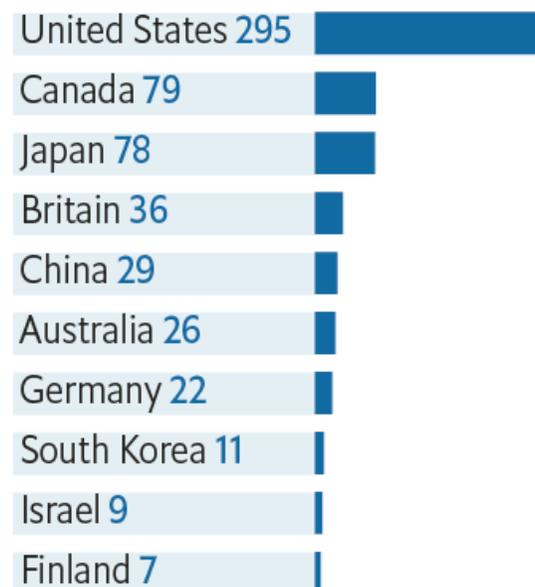
R&D

Quels acteurs? Quels investissements?

Excited states

Patent applications to 2015, in:

Quantum computing



Quantum cryptography

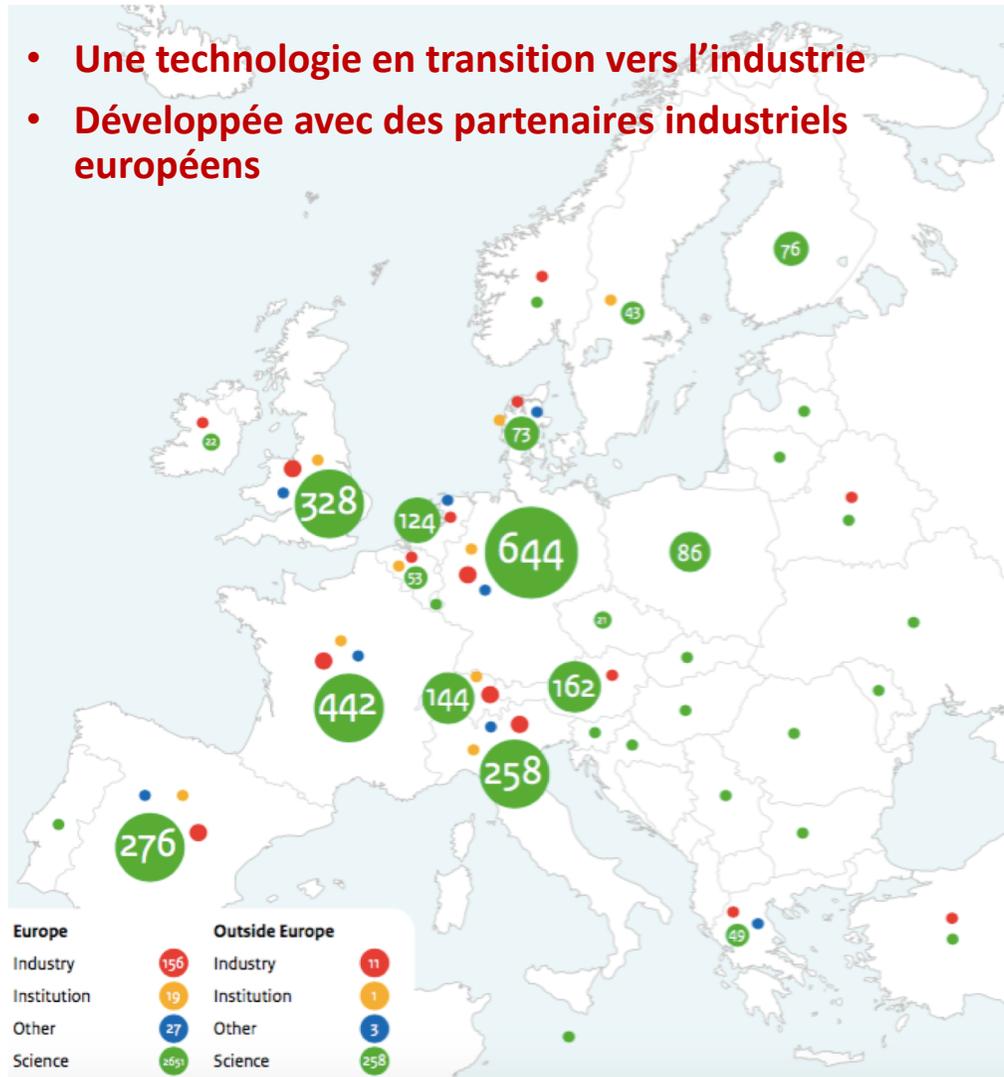


Quantum sensors

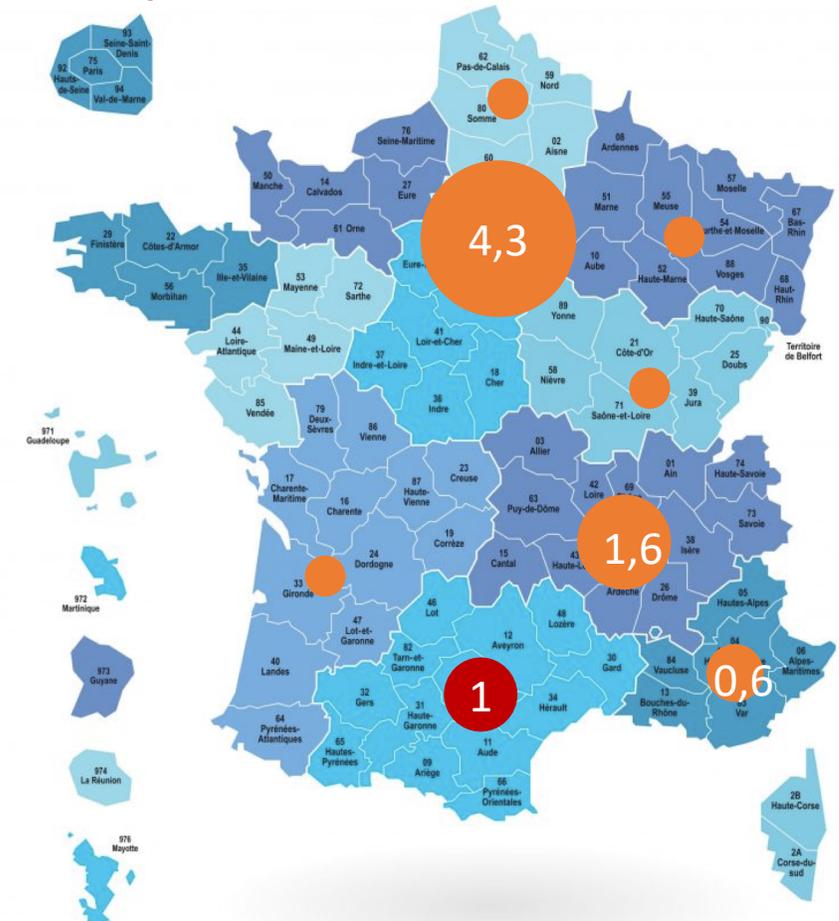


Quels acteurs en Europe? En France?

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

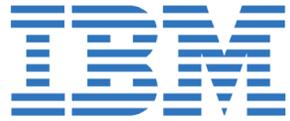


- L'Occitanie : 3ème Région en termes de forces académiques



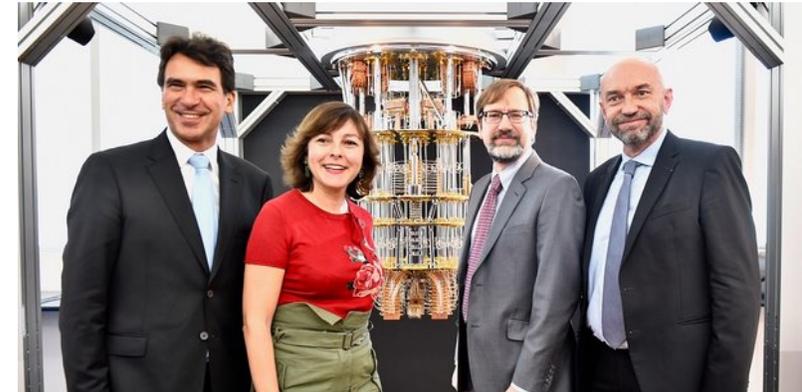
Le calcul quantique en Occitanie

- Une dynamique soutenue en lien avec des industriels occitans



2018

Inauguration du hub quantique IBM français à Montpellier et lancement du projet QuantUM



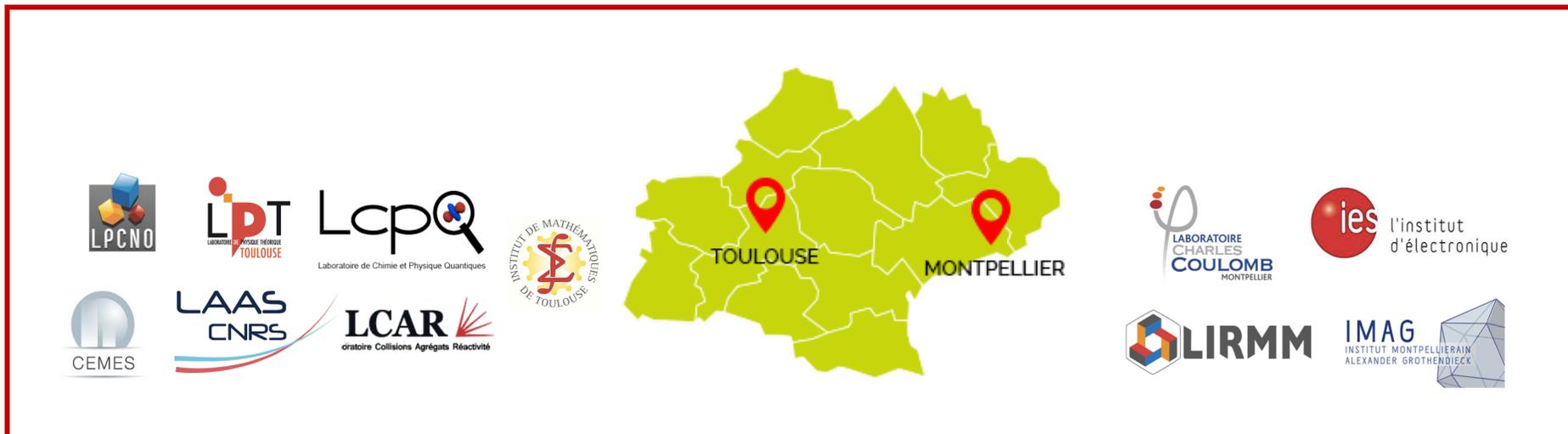
Favoriser l'émergence en Région Occitanie d'un réseau de partenaires publics et privés travaillant sur les sujets du calcul quantique, ainsi que le développement de compétences quantiques



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

Les technologies quantiques en Occitanie

- Une recherche académique et une formation d'excellence



- Un écosystème industriel



Les technologies quantiques en Occitanie

- L'institut quantique occitan



Se rassembler pour mieux



**Former aux
métiers de demain**

(SRESRI)



**Partager les savoirs, innover,
développer une filière de
rayonnement international**

(SRESRI et SRDEII)



**Renforcer le transfert de
la recherche, appuyer les
parcours de valorisation**

(SRESRI et SRDEII)

Autour du défi clé Technologies quantiques

Les technologies quantiques en Occitanie

- L'institut quantique occitan



(SRESRI)



Vers les étudiants de Master

- Des écoles prédoctorales internationales
- Des pratiques partagées et modules bi-site



Vers les lycéens

- Des interventions en lycée
- Des visites de laboratoire



Vers les entrepreneurs et ingénieurs

- Formation continue et séminaires de veille
- En lien avec la cité de l'économie et des métiers de demain

Les technologies quantiques en Occitanie

- L'institut quantique occitan



Renforcer le transfert de la recherche, appuyer les parcours de valorisation

(SRESRI et SRDEII)



Créer et animer une filière



Animation technologique /prospective, organisation de B to B...



Evangelisation et formation continue aux nouveaux métiers du "quantique"



Porto-folio d'applications potentielles



Transferts technologiques académie vers industrie
Collaborations académie-industrie



Développement/création de start-ups / Développements entrepris par les industriels - Soutien aux projets de R&D



Accompagnement dans la recherche de financement Européen

Les technologies quantiques en Occitanie

- L'institut quantique occitan



Partager les savoirs, innover,
développer une filière de
rayonnement international

(SRESRI et SRDEII)



Renforcer l'excellence, accroître le rayonnement et soutenir l'innovation au travers de collaborations

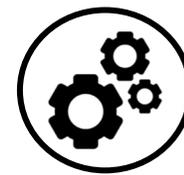
entre académiques et vers les industriels, prioritairement bi-site,
autour de l'ingénierie, des communications, des capteurs et de la simulation quantiques



1395 k€

12 Allocations de recherche doctorale / 9 Post-doctorats de 18 mois

- En soutien au lancement de projets nouveaux et collaboratifs



365k€
+ FEDER

Soutien aux Plateformes régionales de recherche et innovation

- Dépenses éligibles : petits et moyens équipements, plateaux expérimentaux, banc de caractérisation,...