

Les nouvelles technologies quantiques : quels enjeux pour l'environnement ?”

V. D'Auria

Institut Fédératif QuantAzur

*Institut de Physique de Nice (INPHYNI),
CNRS UMR 7010 & Université Côte d'Azur*

Équipe Photonique et Information Quantique



Mon séminaire...

- Technologies Quantiques
- Des bits d'information quantique
- Initiatives pour le climat à base de Quantique
- Quel impact énergétique ?

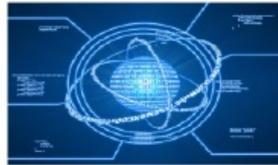
Technologies Quantiques



Utiliser les propriétés de la physique quantique pour atteindre des objectifs non (ou peu) accessibles aux technologies classiques



Communication
(Cryptographie Q.)



Calcul
(Ordinateur Q.)



Simulation
*(Simulation de
Systèmes
Physiques)*



Metrologie
(Capteurs Q.)

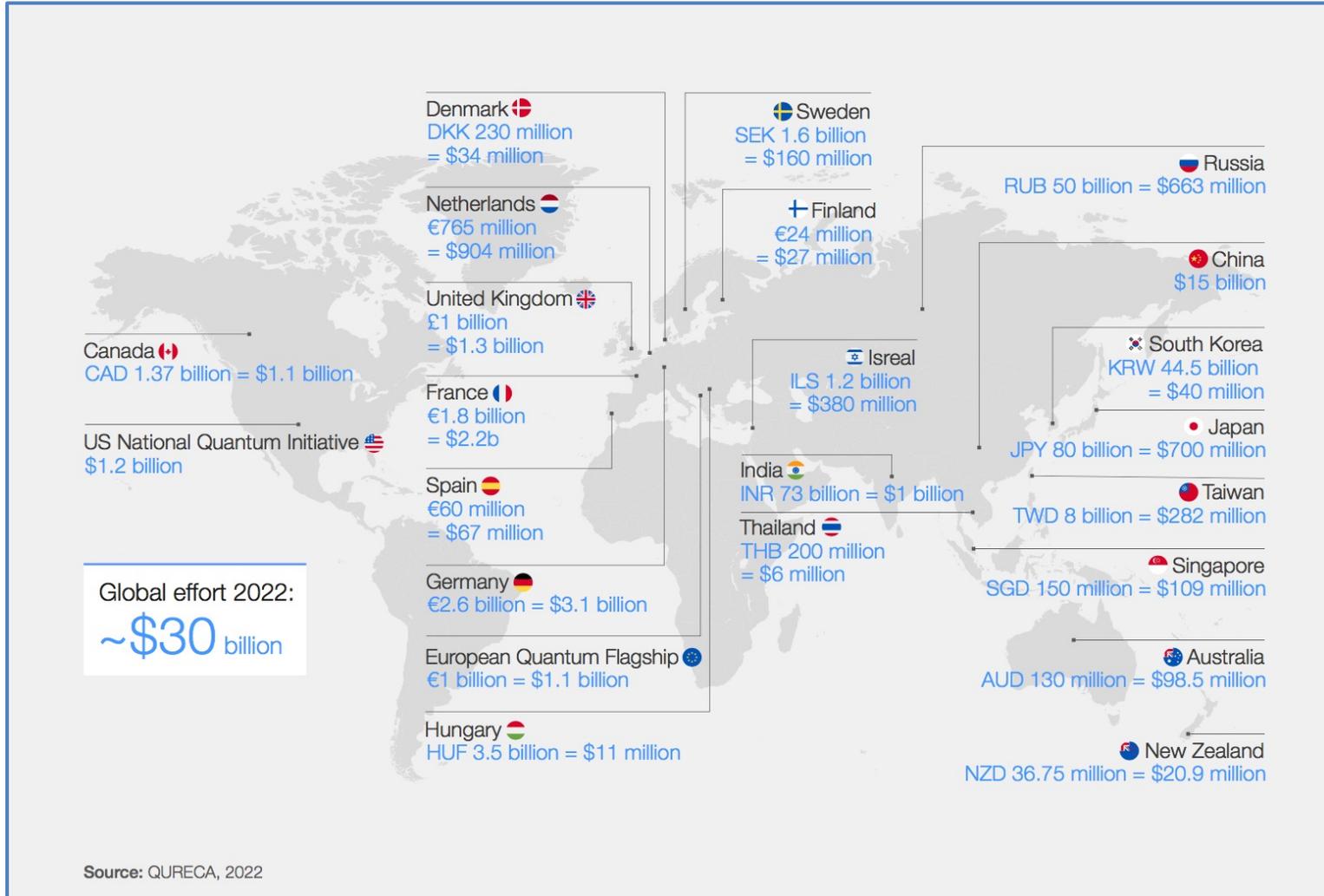
Sciences fondamentales

Des concepts aux premières systèmes opérationnels

Technologies Quantiques



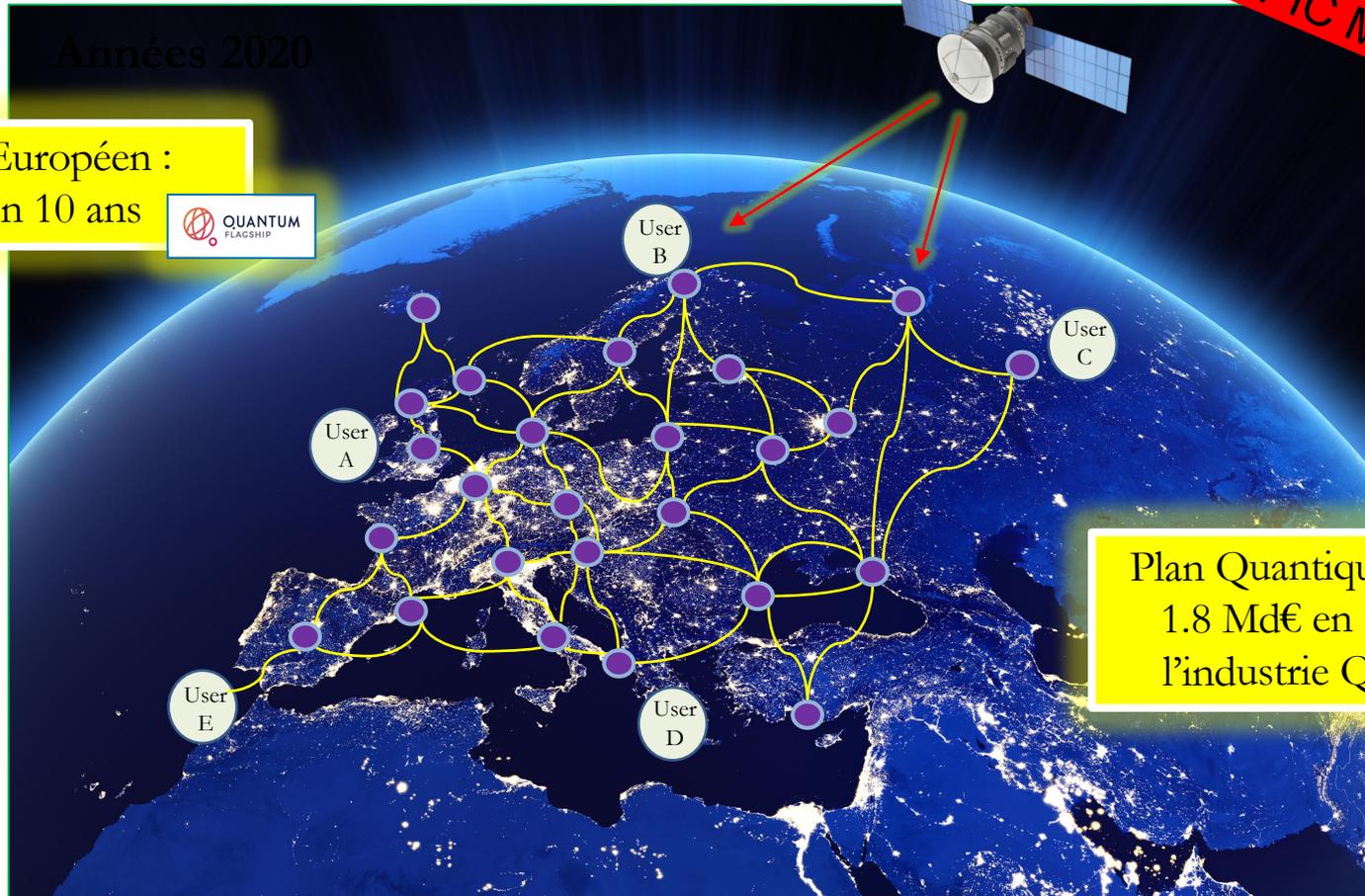
Des investissements importants dans tout le monde



UE: vers un internet des objets quantiques



HOT TOPIC MONDIAL



Années 2020

Flagship Européen :
1 Md€ en 10 ans



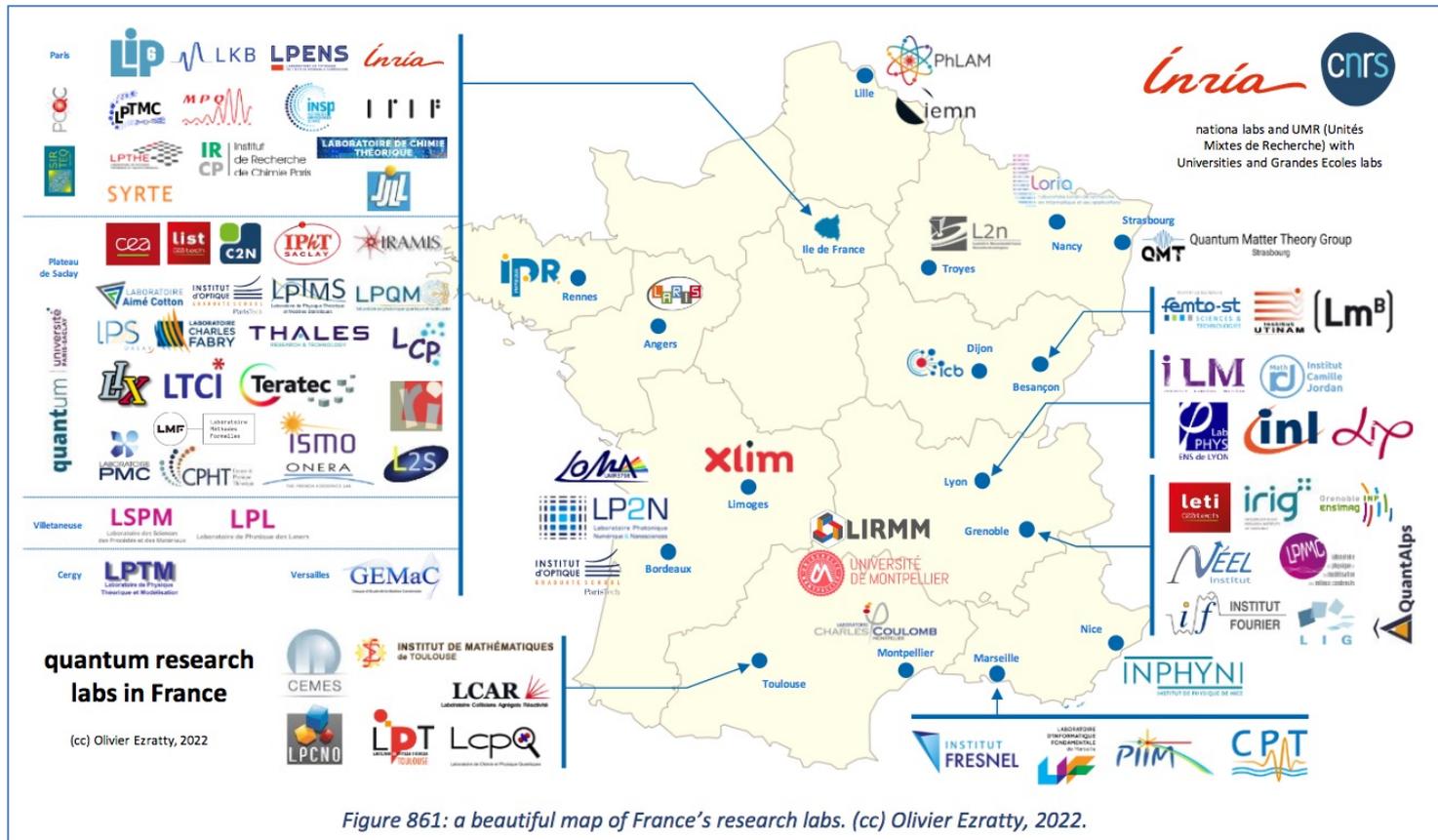
Plan Quantique National :
1.8 Md€ en 5 ans pour
l'industrie Q. française

(Plan QUANTIQUE : 16 000 emplois directs à l'horizon 2030)

Un panorama national très riche



- Un intérêt croissant pour les technologies Q. : recherche, industrie, État



Très forte collaboration publique-privé (français)

Un panorama national très riche



- Un intérêt croissant pour les technologies Q. : recherche, industrie, État

~46 start-up en 2022, R&D de PME et de gros groupes industriels



Start-up: Fonds d'investissement Quantonation et soutien BPI France

Le Quantique pour l'environnement



Des ordinateurs Quantiques ultra-puissants

McKinsey Digital

How We Help Clients [Our Insights](#) Our People Careers Contact Us

Learn to Leap: Green Business Building Edition #4

How quantum computing can help tackle global warming

Forbes

INNOVATION

Will Quantum Technology Be The Silver Bullet For Climate Change?

Markus Pflitsch Forbes Councils Member
Forbes Technology Council COUNCIL POST | Membership (Fee-based)

L'USINE NOUVELLE

Secteurs ▾ Obsessions ▾ Rendez-vous ▾ Régions ▾ Vidéos & Podcasts ▾

TECHNOS ET INNOVATIONS Industrie 4.0 IA Impression 3D Robotique Quantique Blockchain

RECHERCHE \ ENVIRONNEMENT \ DÉVELOPPEMENT DURABLE

[L'instant tech] Le calcul quantique, future arme contre le dérèglement climatique

Quantum Technology | Our Sustainable Future

#oursustainablefuture

THE QUANTUM DAILY AND OXFORD INSTRUMENTS
NANOSCIENCE PRESENT

THE QUANTUM DAILY OXFORD INSTRUMENTS

ZDNET

Recherchez sur ZDNet

Moments de vie Industrie 4.0 TPE / PME Cloud native Télécharger Lexique IT Blog 5G Monitor Connexion

INFORMATIQUE SMARTPHONE CYBERSÉCURITÉ RÉSEAUX ET TÉLÉCOM TECHNOLOGIE GAFAM PARTENAIRES

publicité

GUIDE PRATIQUE: mieux travailler au bureau et à distance avec les conseils et astuces de ZDNet

Accueil > News > Technologie

La botte secrète de l'informatique quantique pour lutter contre le réchauffement climatique

Technologie : L'intersection de la recherche quantique et de la biologie est encore une niche, mais les appels à étudier les applications de cette technologie en matière de développement durable se multiplient.

Par Daphne Leprince-Ringuet | Dimanche 12 Septembre 2021

Réactions 2 Partager 1,9 K Twitter Partager plus

3 minutes pour tout comprendre

ZDTECH

Des bits d'information



Codage binaire : 2 états possibles

→ 1
→ 0



Buongiorno:

01000010 01110101 01101111 01101110
01100111 01101001 01101111 01110010
01101110 01101111

Des bits d'information



Codage binaire : 2 états possibles

→ 1
→ 0



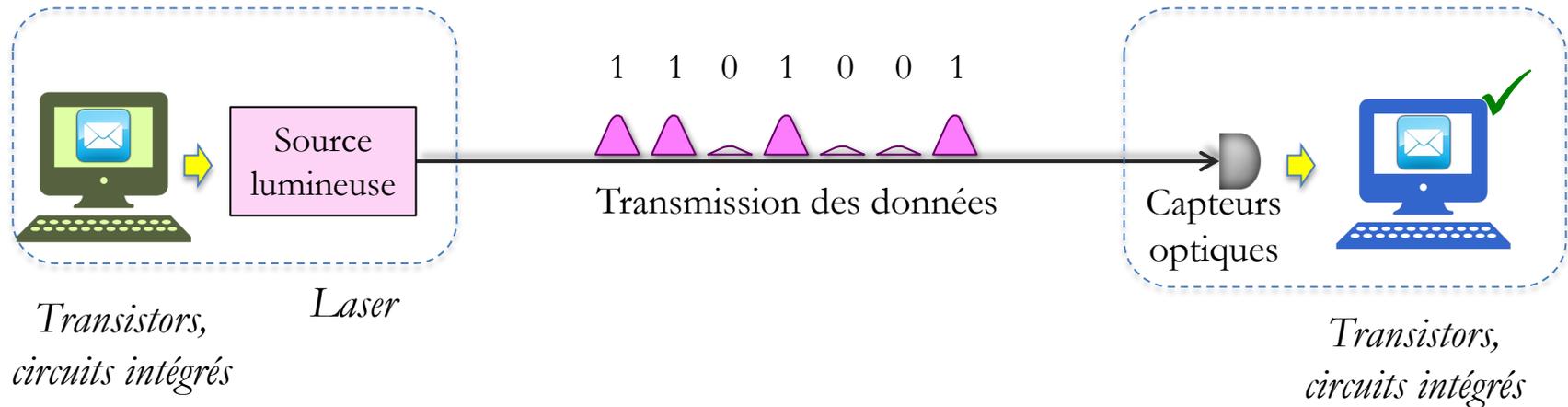
Buongiorno:

```
01000010 01110101 01101111 01101110
01100111 01101001 01101111 01110010
01101110 01101111
```

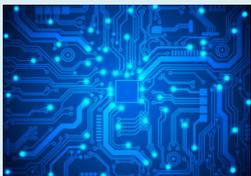
Des bits d'information '0' ou '1':
=> le “coeur” de nos échanges d'information

Calcul, communication, recherche, stockage, simulation, modélisation ...

Le Quantique tous les jours



Des technologies issues de la première révolution Quantique :
Exploitent un très grand ensemble d'objets microscopiques



Le courant qui circule dans un circuit électronique est constitué d'une multitude d'électrons



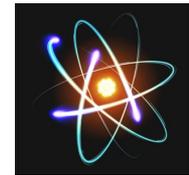
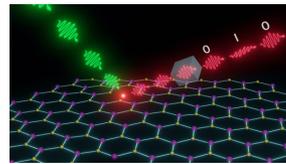
Un faisceau laser est constitué de milliards de grains élémentaires de lumière (les photons)

Des nouvelles technologies Quantiques



Deuxième révolution quantique :
capacité de manipuler des objets quantiques individuels

(ex. un photon de lumière, un électron, un atome..)



i.e. des objets très petits, très fragiles, entièrement soumis aux règles de la physique Q.



Codage sur des « 1 », des « 0 » mais aussi sur « 1 et 0 » à la fois !

a) Dualité onde-particule:

Ex.



Une goutte d'eau dans une flaque



Deux gouttes d'eau dans une flaque

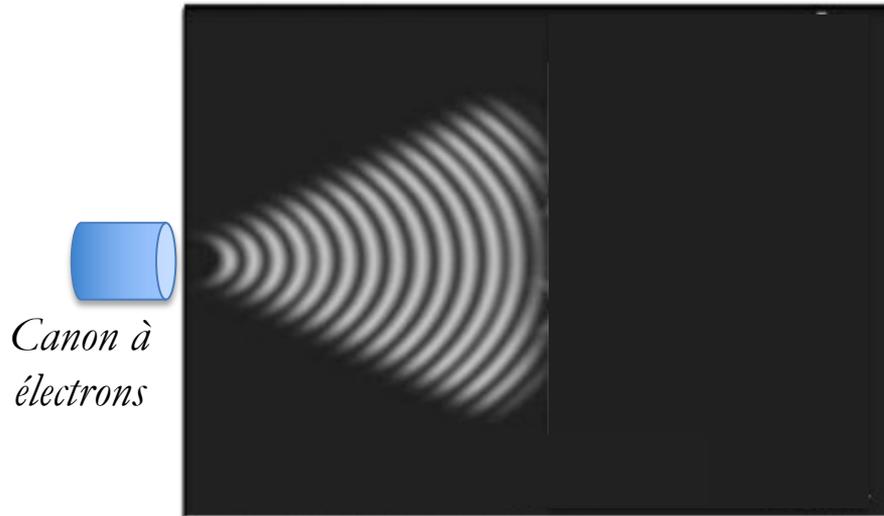
Interférence !

Des bits d'information quantique



a) Dualité onde-particule:

Les particules (*electrons, atomes, protons*) se comportent comme des ondes :

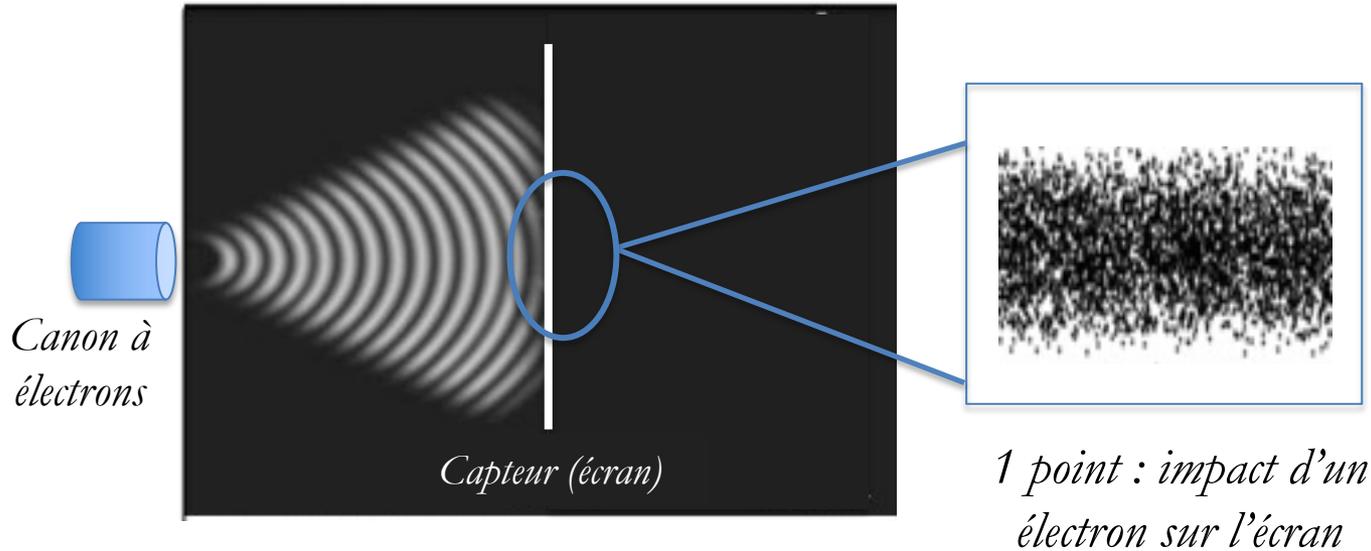


Des bits d'information quantique



a) Dualité onde-particule:

Les particules (*electrons, atomes, protons*) se comportent comme des ondes :

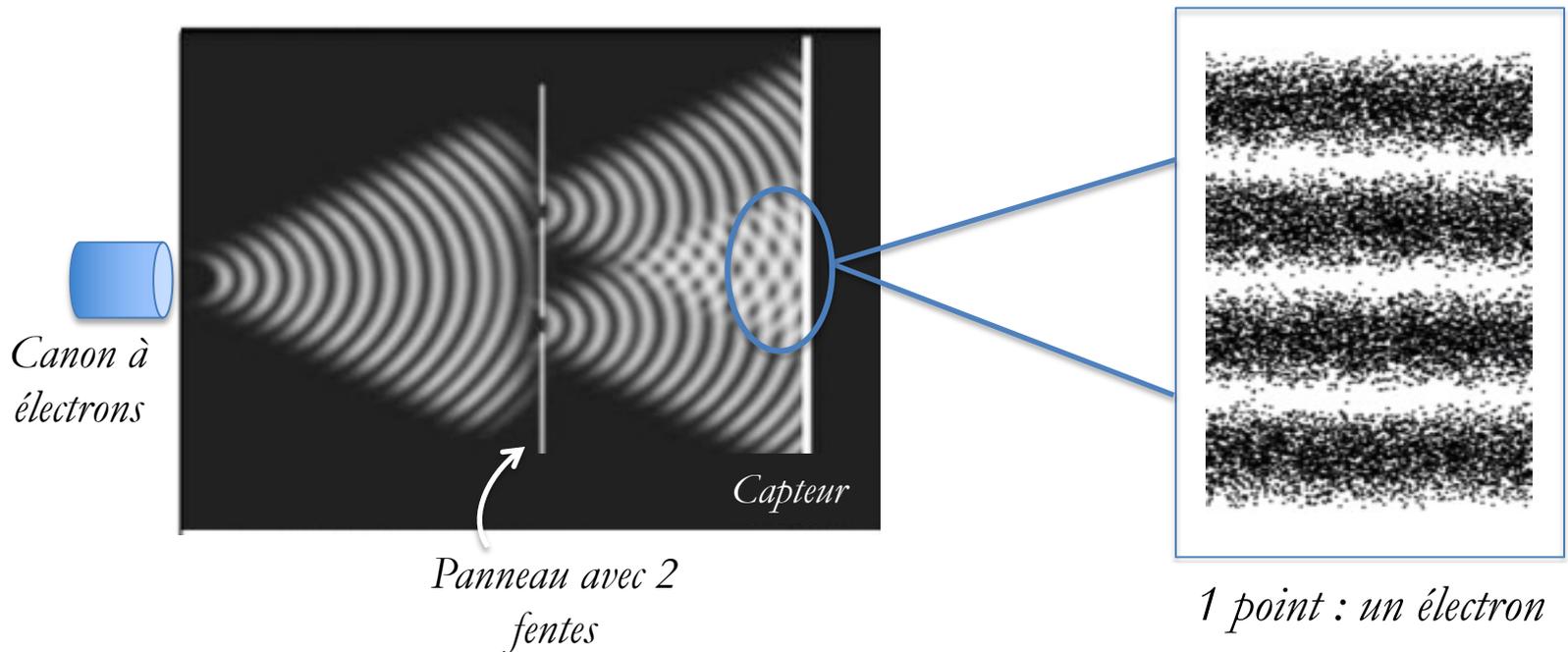


Des bits d'information quantique



a) Dualité onde-particule:

Les particules (*electrons, atomes, protons*) se comportent comme des ondes :



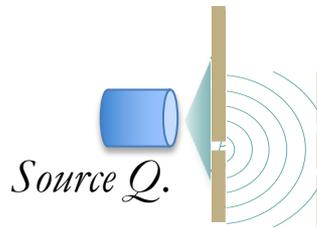
Ex. Les électrons peuvent interférer comme les ondes
(chaque électron se délocalise sur plusieurs chemins)

Des bits d'information quantique

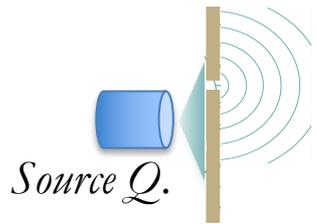


a) Dualité onde-particule:

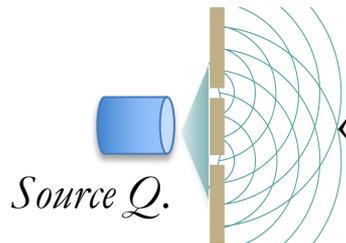
Les bits quantiques permettent d'explorer deux
« configurations » en même temps



« 1 » l'objet Q. passe par la fente en bas



« 0 » l'objet Q. passe par la fente en haut



« 0 » *et* « 1 » l'objet Q. passe par la fente en haut *et* par celle du bas

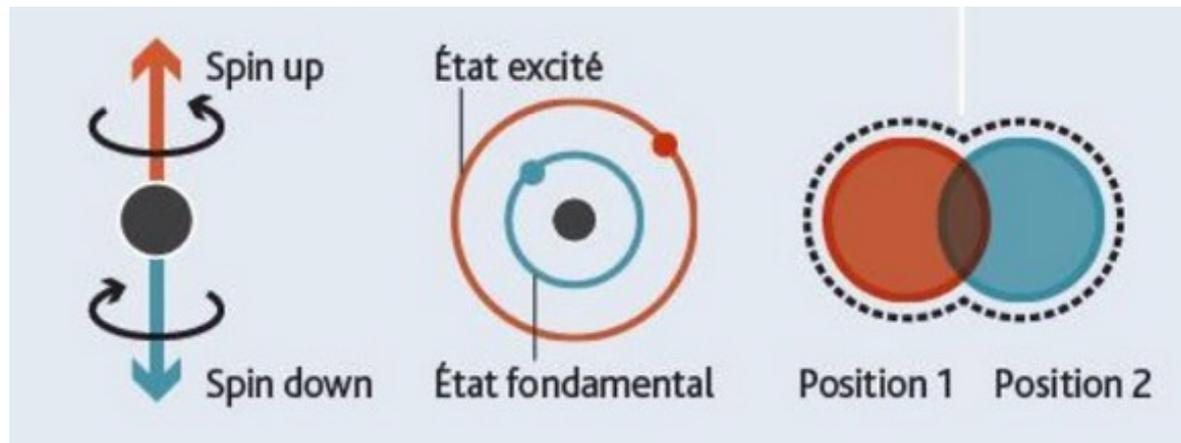
Principe de superposition

Des bits d'information quantique



a) Dualité onde-particule:

Les bits quantiques permettent d'explorer deux
« configurations » en même temps



Principe de superposition

Les ondes (*lumière*) se comportent comme des particules :
Codage des qubits sur des photons

Des bits d'information quantique



b) Intrication :

Deux objets quantiques, même très loins, doivent être considérés comme un tout unique



Prix NOBEL 2022!!!

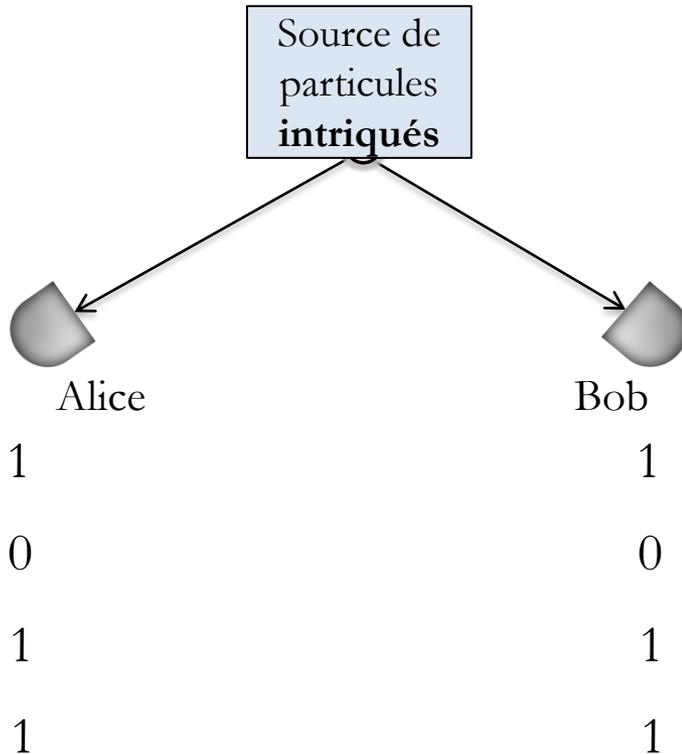
Des bits d'information quantique



b) Intrication :

Deux objets quantiques, même très loins, doivent être considérés comme un tout unique

Résultats des mesures Q. de Alice et Bob:



Manip

Théorie

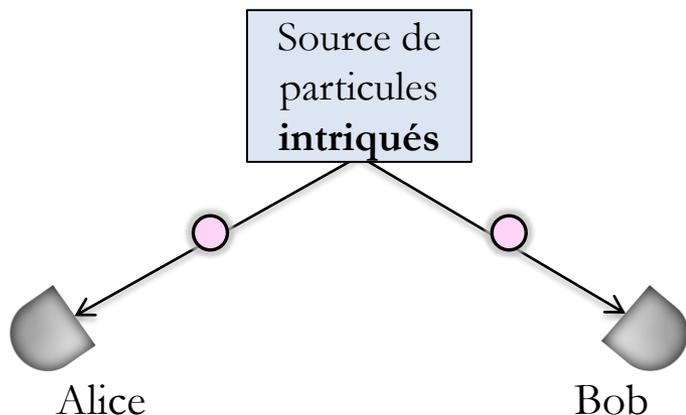
Des bits d'information quantique



b) Intrication :

Deux objets quantiques, même très loins, doivent être considérés comme un tout unique

Résultats des mesures Q. de Alice et Bob:
aléatoires *mais* identiques



Manip

Théorie

En agissant sur l'un des deux objets on peut modifier les résultats des mesures de l'autre (ex. teleportation Q.)



Information quantique



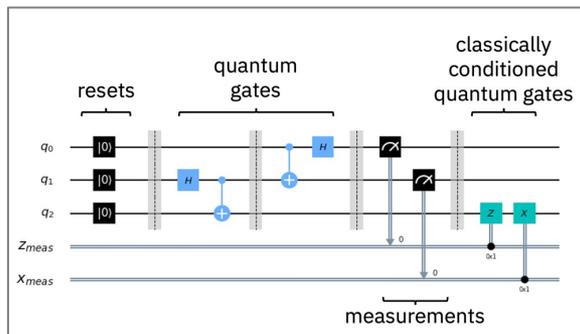
a) Superposition & b) Intrication

Codage des informations sur plusieurs Qubits intriqués

(on explore plusieurs parcours à la fois)



L'ordi Q. effectue plusieurs calculs *en parallèle*
en générant toutes les réponses possibles



Le résultat du calcul est obtenu par des phénomènes d'interférence à l'intérieur d'un circuit quantique selon un algorithme donné.

La vitesse augmente avec le nombre de qubits d'entrée du circuits

Information quantique



a) Superposition & b) Intrication

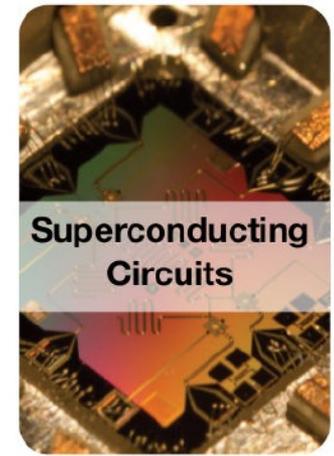
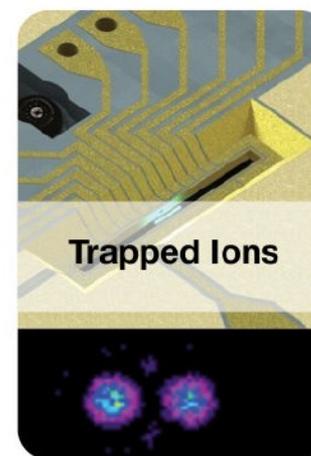
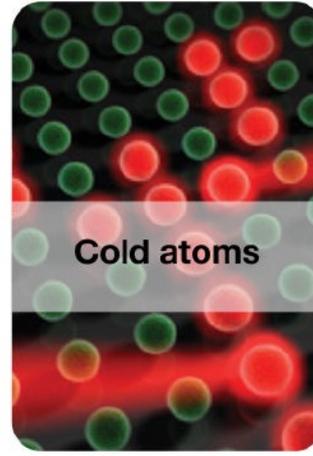
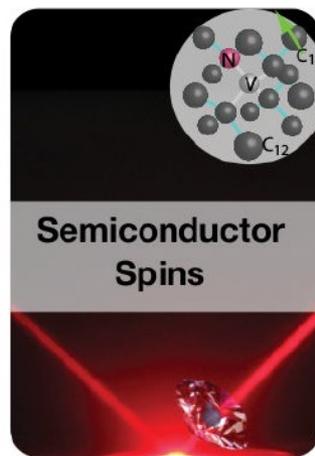
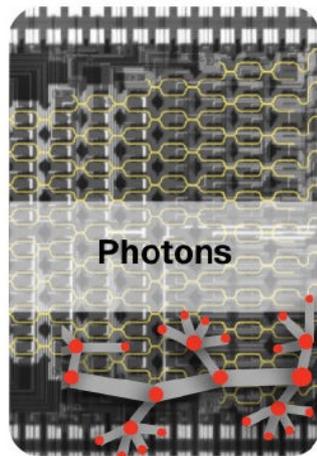
Une nouvelles approche à la manière dont l'information est
générée, transmise, stockée et traitée

Information quantique



a) Superposition & b) Intrication

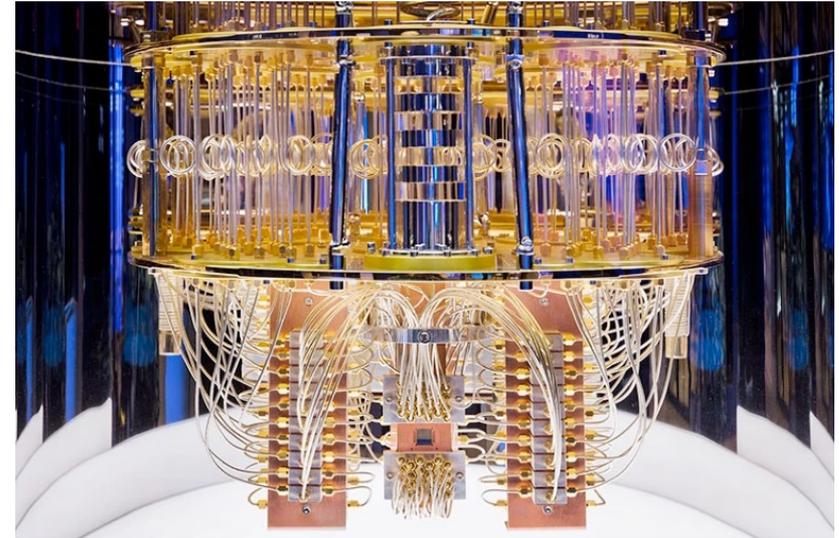
Une nouvelles approche à la manière dont l'information est générée, transmise, stockée et traitée



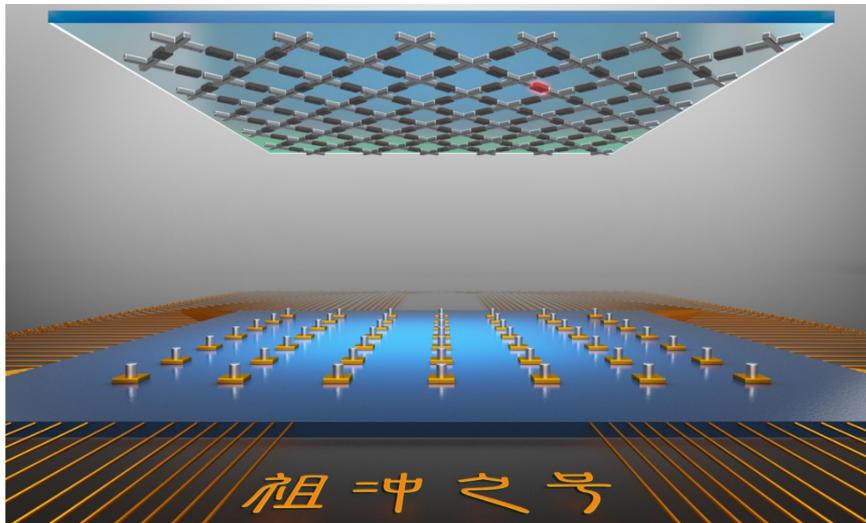
Des ordinateurs Quantiques



Sycamore



IBM



Zuchongzhi 2.1



Jiuzhang 2.0 (optique)

Mon séminaire...

- Technologies Quantiques
- Des bits d'information quantique
- **Initiatives pour le climat à base de Quantique**
- **Quel impact énergétique ?**

Des puissances de calculs très grandes



Puissance de calcul exponentielle



Résoudre rapidement des problèmes qui nécessiteraient des quantités impossibles de temps et de ressources informatiques classiques

Des applications à la lutte contre le changement climatique ?

Plusieurs initiatives internationales:



Q4Climate

The union of quantum and climate research

Des puissances de calculs très grandes



Puissance de calcul exponentielle



Résoudre rapidement des problèmes qui nécessiteraient des quantités impossibles de temps et de ressources informatiques classiques

Simulation
quantique

&

Optimisation
Quantique

&

Mineur coût
énergétique

NB: Capteurs Quantique très sensibles et très efficaces

(étude des aérosols et des émissions, caractérisation des matériaux pour des technologies classiques « propres », analyses des performances de batteries...)

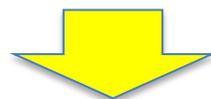
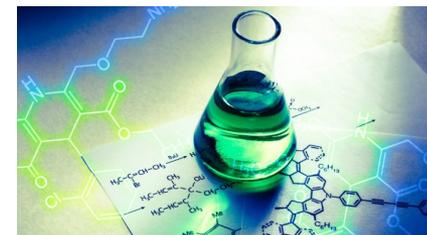
Simulation Quantique



Étude de processus chimiques ou physiques et de la structure microscopique des nouveaux matériaux

Ex. **Chimie verte:**

produire moins de déchets,
consommer moins d'énergie



Des « catalyseurs » pour la production de molécules intéressantes pour l'industrie

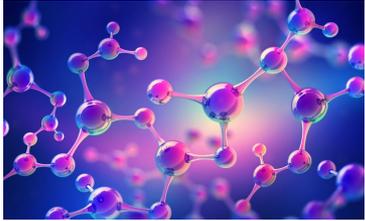
(ils accélèrent certaines réactions et les rendent moins énergivores)



Procédés chimiques « éco-compatibles »

Ex. réaction à température moins élevée

Simulation Quantique



Étude de processus chimiques ou physiques et de la structure microscopique des nouveaux matériaux

Monde microscopique:

un *très* grand nombre de atomes, molécules, électrons

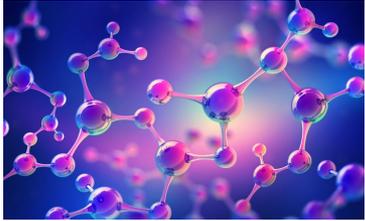


(*et* des nombreux facteurs qui peuvent influencer la façon dont ces objets interagissent)

Difficile à résoudre pour un ordinateur classique

(ex. 100 particules chacune ayant 2 configurations possibles :
traiter $2^{100} \approx 10^{30}$ données i.e. 10^{89} Terabyte !)

Simulation Quantique



Étude de processus chimiques ou physiques et de la structure microscopique des nouveaux matériaux

Monde microscopique:

un *très* grand nombre de atomes, molécules, électrons



- Pas de modèle mathématique exact
- Expériences chères ou longues (*parfois même dangereuses*)

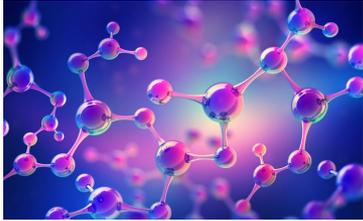


Simulation Q. *avant* les expériences et *après* les expériences

(*remplace, explique, complète, identifie, optimise les expériences !*)

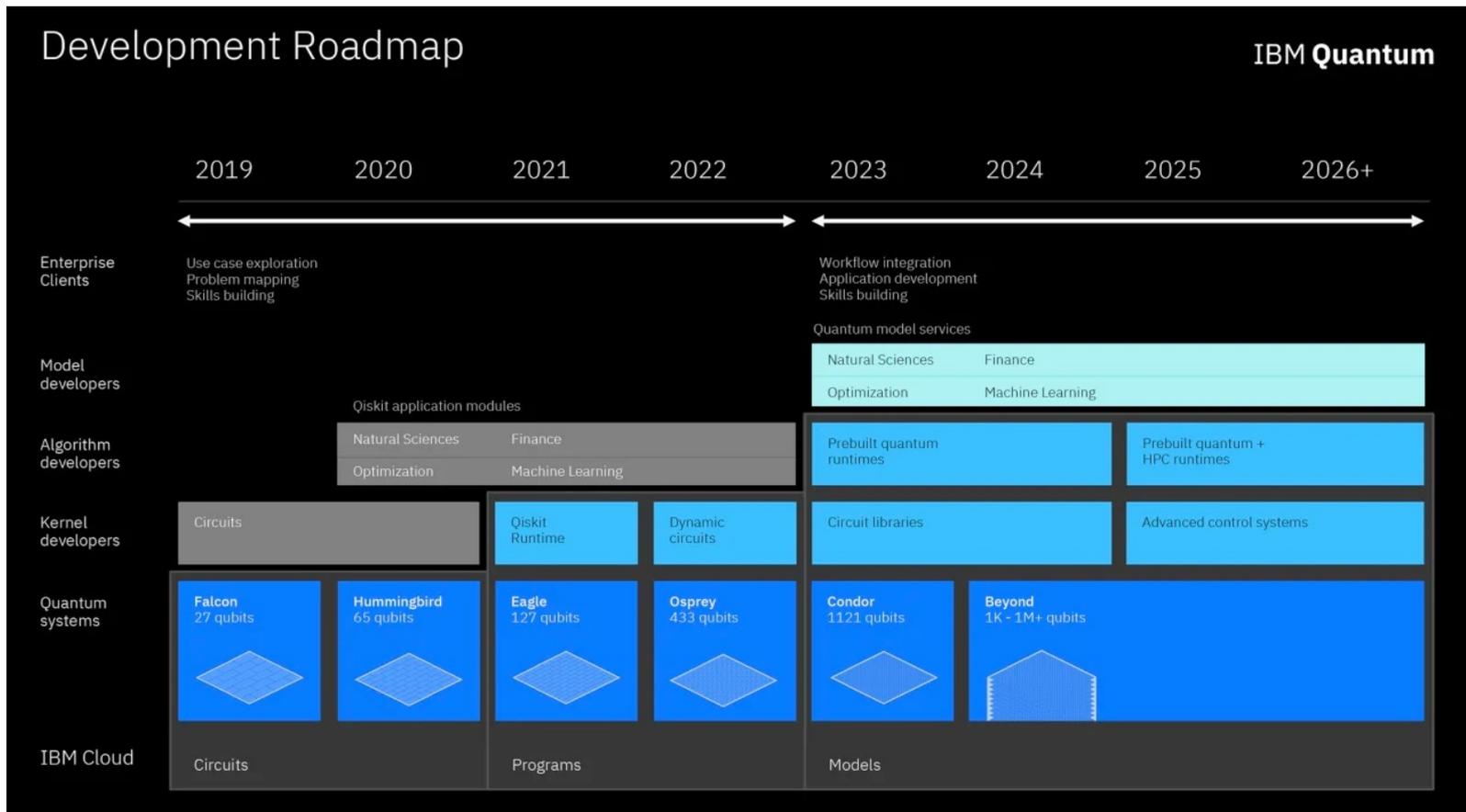
(ex. nouveaux panneaux photovoltaïques, batteries, procédés, médicaments ...)

Simulation Quantique

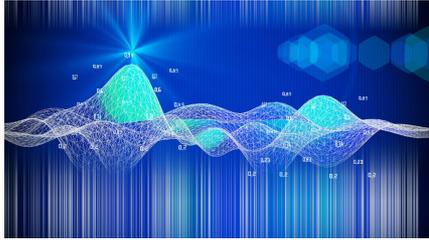


Étude de processus chimiques ou physiques et de la structure microscopique des nouveaux matériaux

Un grand nombre de Qubits !



Optimisation Quantique



Trouver la meilleure solution à un problème
(en fonction de certains critères)
parmi un ensemble de solutions possibles

Pas tous les problèmes sont difficiles !

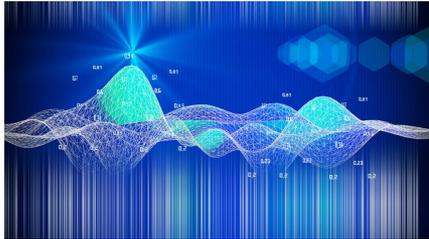
Ex (classiques) : algorithmes pour optimiser le flux de données internet à travers les serveurs, optimisations financières pour réduire les risques des banques...



Des nombreux problèmes d'optimisation sont difficiles

*(il n'y a pas de moyen facile d'obtenir la meilleure solution
sans explorer toutes les possibilités)*

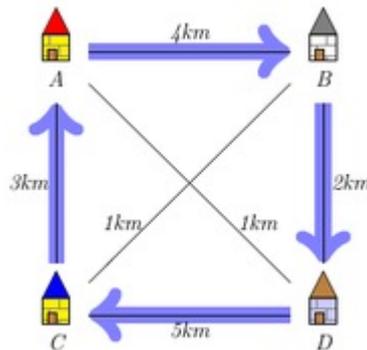
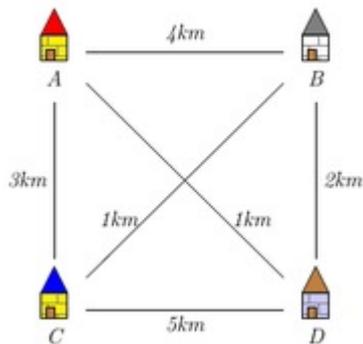
Optimisation Quantique



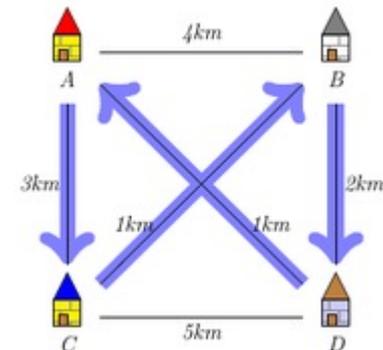
Trouver la meilleure solution à un problème
(en fonction de certains critères)
parmi un ensemble de solutions possibles

Ex. Problème du commis voyageur:

Étant donné une liste de villes, quel est le plus court chemin qui visite chaque ville une seule fois et qui termine dans la ville de départ ?

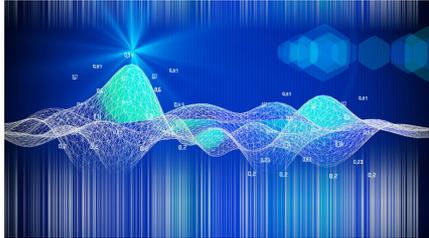


$$4+2+5+3 = 14 \text{ km}$$



$$3+1+2+1=7 \text{ km}$$

Optimisation Quantique



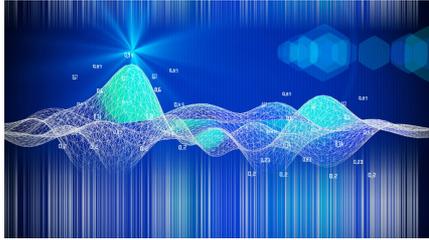
Trouver la meilleure solution à un problème
(en fonction de certains critères)
parmi un ensemble de solutions possibles

Ex. Problème du commis voyageur:

Nombre de villes n	Nombre de chemins candidats $(n - 1) ! / 2$
4	3

Si on emploie 1 milliardième de seconde pour tester chaque chemin, le temps total de calcul est proche du temps de vie de l'univers !

Optimisation Quantique



Trouver la meilleure solution à un problème
(en fonction de certains critères)
parmi un ensemble de solutions possibles

Ordi Q. : mêmes des minuscules améliorations peuvent se traduire
par d'importantes économies de ressources

Ex. Optimisation de (problème difficiles):

- Réseaux de la chaîne d'approvisionnement (*fabrication et distribution efficaces*)
- Itinéraires (*i.e. réduction considérable de la consommation de carburant et des émissions*)
- Systèmes (*emplacement des éoliennes ou des stations de recharge électrique par rapport au trafic...*)

Etc.

Avantage Q vis-à-vis des algos classiques pas encore certain

Mineur coût énergétique

Un ordi Q. consomme moins qu'un ordi classique?

D-Wave 2000Q : 25 kW



Superordinateur Summit: 13 MW



VS

(de la taille de 2 terrains de tennis)



Diminution des besoins en refroidissement et de la puissance nécessaire au fonctionnement



D-wave ne sait faire qu'une seule opération (un type d'optimisation)

Mineur coût énergétique



Un ordi Q. consomme moins qu'un ordi classique?

Google Sycamore:



21 physical qubits

Superordinateur Summit



VS

(de la taille de 2 terrains de tennis)

Google

: 10 000 ans pour effectuer la tâche équivalente !
(*suprémie Q.*)

IBM

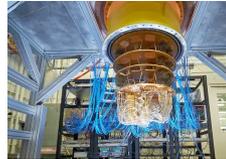
: naaah! Seulement 2.5 jours !

Mineur coût énergétique



Un ordi Q. consomme moins qu'un ordi classique?

Quantum



Classical



Durée du calcul:

200 s = 0.056 heures

2,5 jours = 60 heures

Consommation:

25 kW/h

13 000 kW/h

Coût électricité :
(*site EDF*)

0,1740 € TTC par kWh

Prix totale électricité :

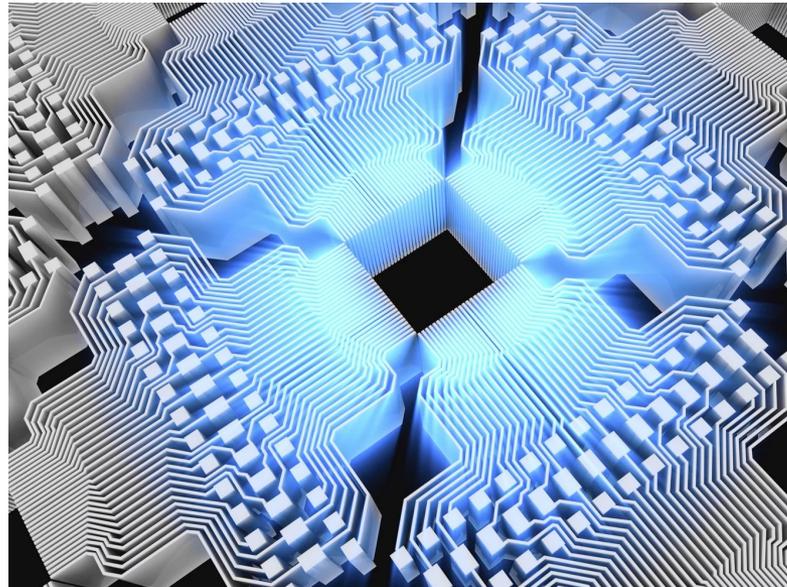
0.24 €

135720 €

Q.-ordi : mineures durée *et* consommation
(intéressant même sans avoir suprématie Q.)

Conclusions

Qu'est ce qu'il se passe pour des calculs « utiles » à beaucoup de Qubits?

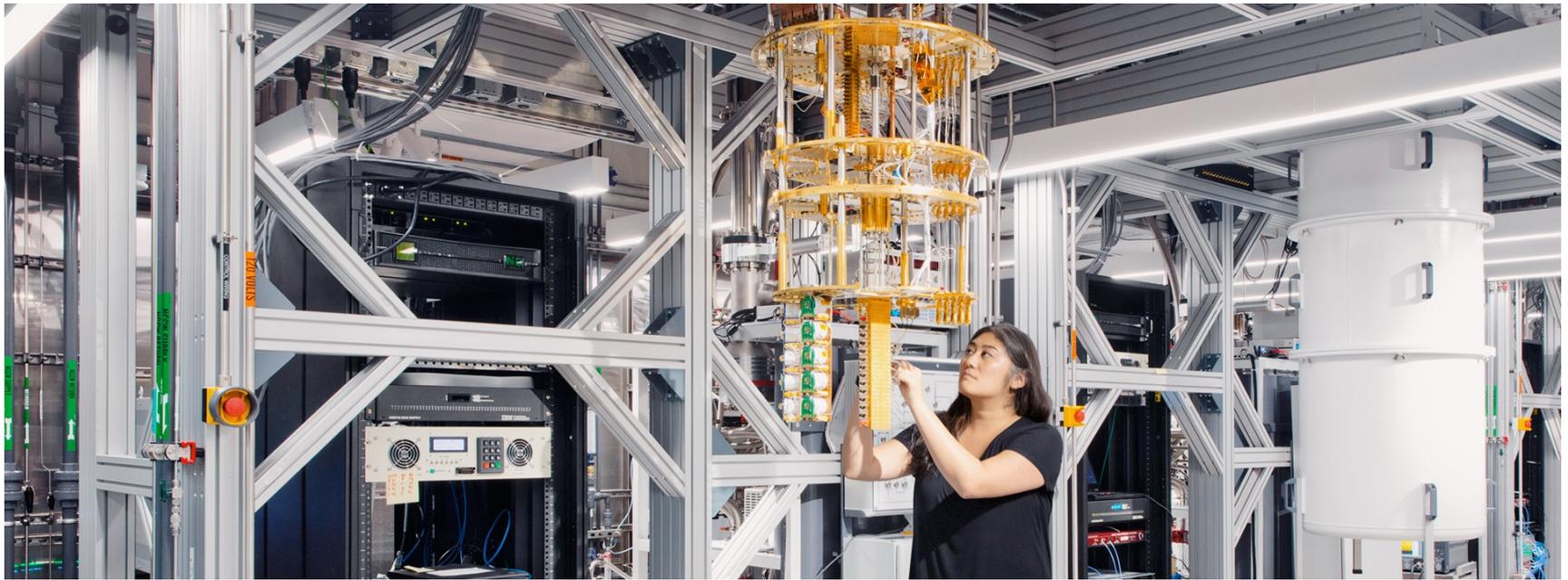


Une initiative énergétique pour le Quantique



Aujourd'hui ordinateurs **imparfaits** souvent à base de systèmes **ultra-froids** !

a) Qubits : objets Q. fragiles difficiles à isoler!



Des frigos, des cables, des systèmes électroniques...

Une initiative énergétique pour le Quantique



Aujourd'hui ordinateurs **imparfaits** souvent à base de systèmes **ultra-froids** !

b) Qubits : objets Q. fragiles difficiles à isoler: erreurs sur les calculs !

- Comment optimiser les calculs en tenant compte des erreurs possibles ?
(i.e. dans un cas non idéal)

- Comment coder les informations afin de réduire les erreurs?

(des nouveaux types de Qubit?)

- Combien ça coute de corriger les erreurs ?

(nécessité de Qubit supplémentaires et de ressources classiques de calcul)



Qu'est ce qu'il se passe pour des calculs « utiles » à beaucoup de Qubits?

PRX QUANTUM 3, 020101 (2022)

Perspective

Quantum Technologies Need a Quantum Energy Initiative

Alexia Auffèves*

Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut Néel, Grenoble 38000, France



(Received 18 November 2021; revised 11 April 2022; published 1 June 2022)

Quantum technologies are currently the object of high expectations from governments and private companies, as they hold the promise to shape safer and faster ways to extract, exchange, and treat information. However, despite its major potential impact for industry and society, the question of their energetic footprint has remained in a blind spot of current deployment strategies. In this Perspective, I argue that quantum technologies must urgently plan for the creation and structuration of a transverse quantum energy initiative, connecting quantum thermodynamics, quantum information science, quantum physics, and engineering. Such an initiative is the only path towards energy-efficient, sustainable quantum technologies, and to possibly bring out an energetic quantum advantage.

DOI: [10.1103/PRXQuantum.3.020101](https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.3.020101)

Une initiative énergétique pour le Quantique



Qu'est ce qu'il se passe pour des calculs « utiles » à beaucoup de Qubits?

PRX QUANTUM 3, 020101 (2022)

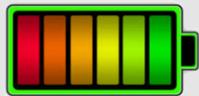
Perspective

Quantum Technologies Need a Quantum Energy Initiative

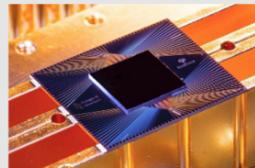
Alexia Auffèves*

Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut Néel, Grenoble 38000, France

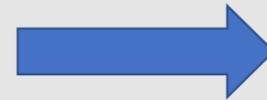
Ressources
macroscopiques



*Full stack level
Technos habilitantes*



Efficacité du
Processeur



Mesure des
performances

Niveau Quantique – recherche fondamentale

Merci pour votre attention

<https://univ-cotedazur.fr/quantazur>



Des bits d'information quantique

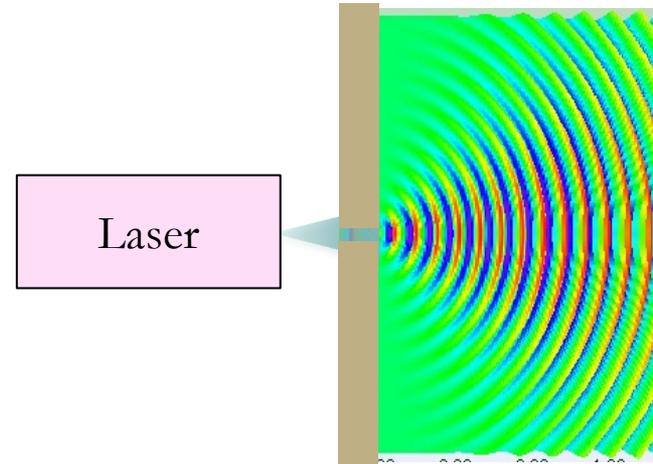


a) Dualité onde-particule:

La lumière est une onde



Une goutte d'eau dans une flaque



La lumière qui passe au travers d'une fente dans un panneau

*Huygens
(XVII^e siècle)*



Des bits d'information quantique

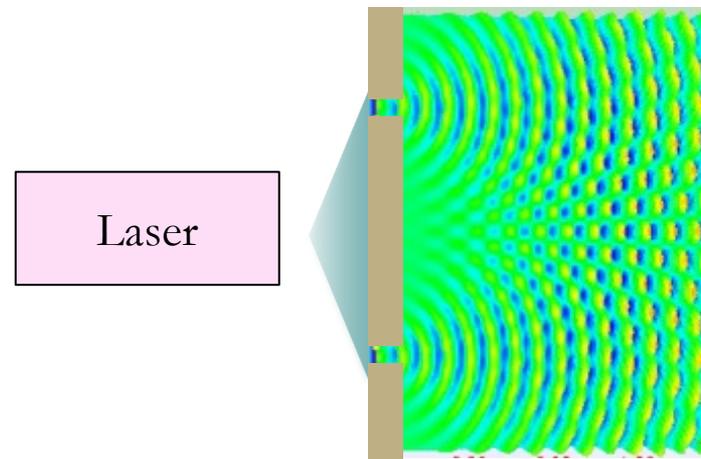


a) Dualité onde-particule:

La lumière est une onde



Deux gouttes d'eau dans une flaque



La lumière qui passe au travers de deux fentes dans un panneau

*Young
(XIX^e siècle)*

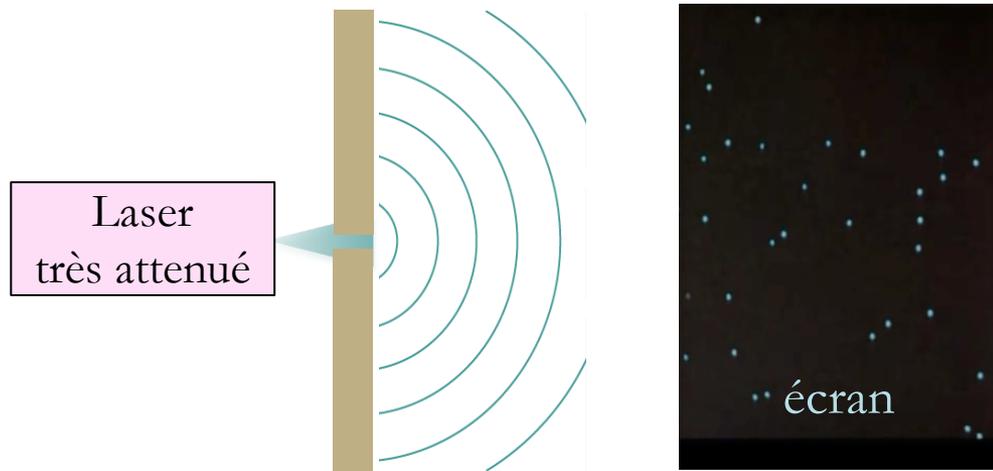


Des bits d'information quantique



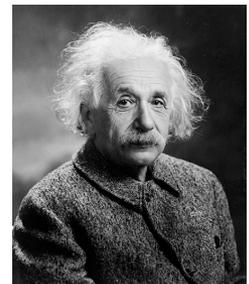
a) Dualité onde-particule:

La lumière qui est une onde se comporte comme des particules :



La lumière qui passe au travers d'une fente dans un panneau

On observe des graines de lumière : les photons
(vue avec effet photo-electrique)

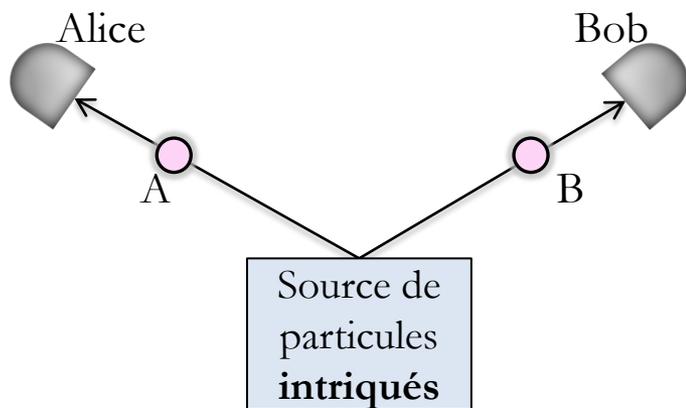


Des bits d'information quantique



b) Intrication :

Deux objets quantiques, même très loins, doivent être considérés comme un tout unique



# Essai	Résultat d'Alice	Résultat de Bob
Essai 1	1	1
Essai 2	1	1
Essai 3	0	0
Essai 4	1	1
....
Essai N	1	1

Résultats aléatoires mais identiques

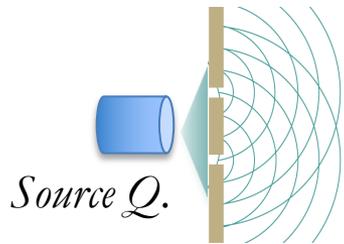
En agissant sur un des deux objets on peut modifier les résultats des mesures de l'autre

Information quantique



a) Super-position & b) Intrication

Codage des informations sur plusieurs Qubits



1 qubit

2 possibilités :

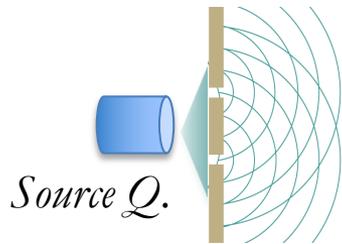
1 (*bas*), 0 (*haut*)

Information quantique

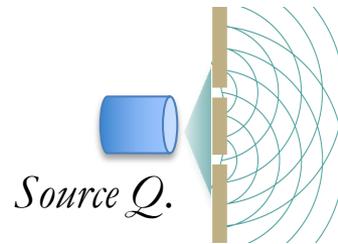


a) Super-position & b) Intrication

Codage des informations sur plusieurs Qubits



1 qubit:
2 chemins



1 qubit:
2 chemins



2 qubit intriqués

4 possibilités : 11 ; 00 ; 10 ; 01

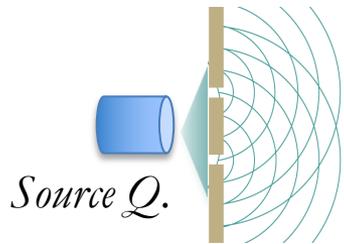
(on explore beaucoup plus de cas possibles)

Information quantique

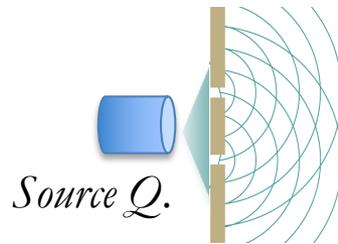


a) Super-position & b) Intrication

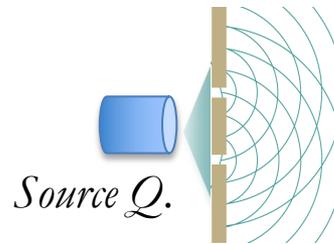
Codage des informations sur plusieurs Qubits



1 qubit:
2 chemins



1 qubit:
2 chemins



1 qubit:
2 chemins



3 qubit intriqués :

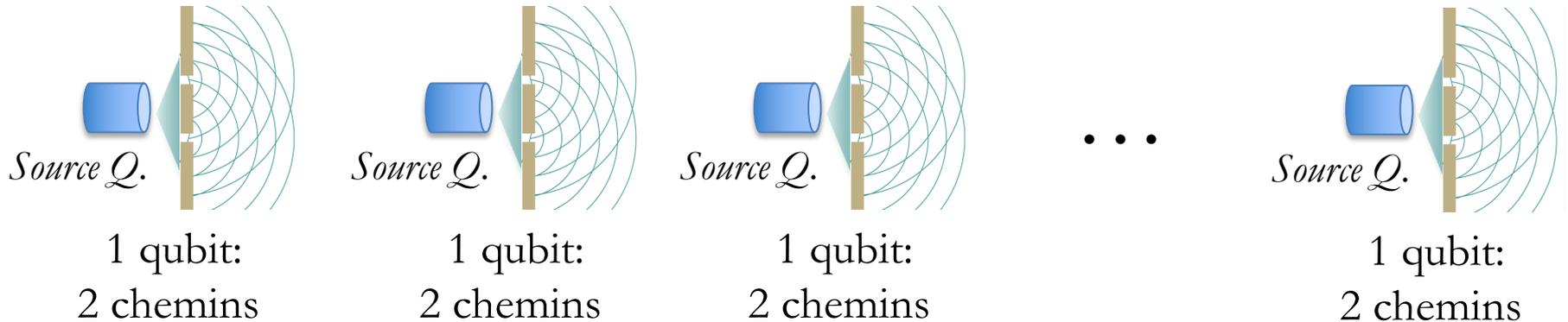
8 possibilités : 000 ; 100 ; 010 ; 001 ; 110 ; 011 ; 101 ; 000 ; 111

Information quantique



a) Super-position & b) Intrication

Codage des informations sur plusieurs Qubits



N qubit intriqués :

2^N possibilités : 000000...000 ; 000000...001 ; ; 111111...111

Des ordinateurs Quantiques

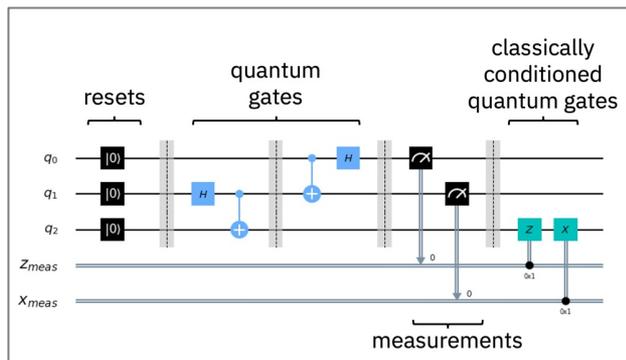


L'information est codée dans beaucoup de qubits chacun correspondant à une réponse du calcul



L'ordi Q. effectue plusieurs calculs simultanément en générant toutes les réponses possibles

(on explore plusieurs parcours à la fois)



Le résultat du calcul est obtenu par des phénomènes d'interférence à l'intérieur d'un circuit quantique selon un algorithme donné.

La vitesse augmente avec le nombre de qubits d'entrée du circuits

Des puissances de calculs très grandes

Ordinateur Quantique

(exploite les lois de la physique quantique)

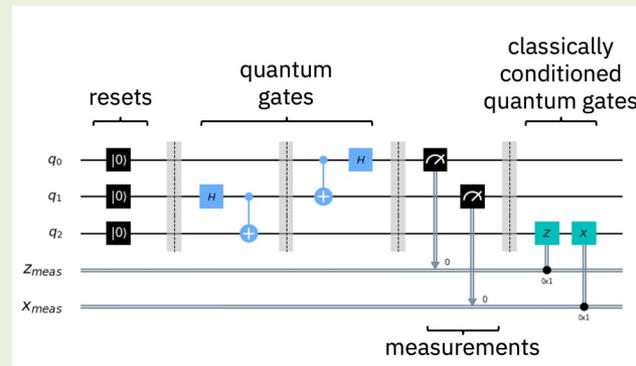


Entrée

Qubit superposition
de tous les résultats
de calcul possibles



Circuit quantique



Sortie

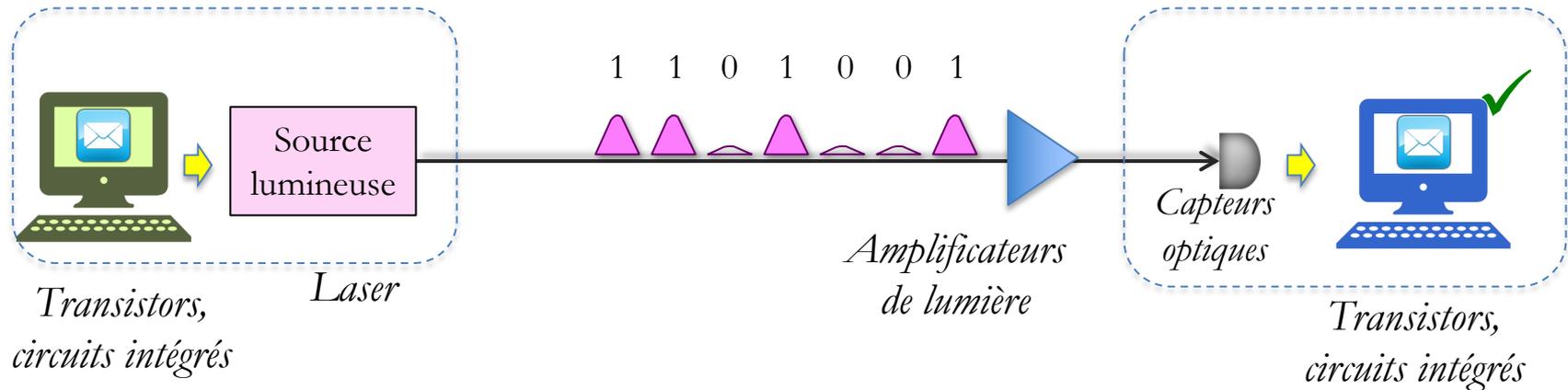
État quantique qui
correspond au
résultat du calcul
*(Résultat de
l'interférence)*

Ex.
"11" et "00" et "10" et "01"

Interférence des composantes de la
superposition selon
un algorithme donné

Ex. "11"

Le Quantique tous les jours



Des technologies issues de la première révolution Quantique :

Concepts quantiques appliqués à
un très grand ensemble d'objets microscopiques



Le courant qui circule dans un circuit électronique est constitué d'une
miriade d'électrons

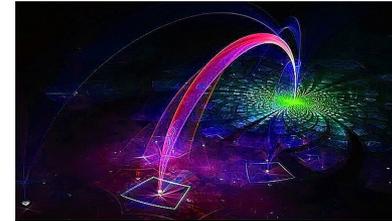


Un faisceau laser est constitué de milliards de graines élémentaires de
lumière (les photons)

Des puissances de calculs très grandes

Ordinateur Quantique

(exploite les lois de la physique quantique)



Des puissances de calcul accrues!



Calcul classique

vs

Calcul quantique

1 bit : 0 ou 1

1 qubit : 0 et 1

N bits : 1001...0110

N qubit intriqués :

000000...00 et 00000...001 et et 11111...111

Calcul séquentiel

1000100110



...



00011100101

Calcul exploitant des effets quantiques:
Superposition d'états, intrication, ...

10011100110

01010100110

00011100101

10100101110

01101011011

...

Pour N bits, 2^N séquences à traiter l'une après l'autre

Possibilité de en parallèle les 2^N séquences de bits ! traiter