

# L'informatique Quantique

---

CH CLUB: J'AIME LE CODE

TELEGRAM-GROUP:  
[HTTPS://T.ME/%20YTE5NJMUQAZLN2M6](https://t.me/%20YTE5NJMUQAZLN2M6)

ROOM N°31 DU 30.10.2022

# TABLE DE MATIÈRES

---

1. L'INFORMATIQUE QUANTIQUE: DEFINITION
2. FONCTIONNEMENT DE L'ORDINATEUR CLASSIQUE
3. LES LIMITES DE L'ORDINATEUR CLASSIQUE
4. ORDINATEURS QUANTIQUES
5. L'HISTOIRE DE L'ORDINATEUR QUANTIQUE
6. PHYSIQUES QUANTIQUES
7. PRINCIPES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE
8. LE FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR QUANTIQUE
9. LES ENJEUX DES ORDINATEURS QUANTIQUES
10. 4 PISTES DE QUBITS EN COMPÉTITION
11. LES DIFFICULTÉS DE L'ORDINATEUR QUANTIQUE

# L'INFORMATIQUE QUANTIQUE: DEFINITION

---

**L'informatique quantique** «c'est une technologie [...] qui exploite les lois de la mécanique quantique pour résoudre des problèmes trop complexes pour les ordinateurs classiques».

**L'informatique quantique** «c'est le sous-domaine de l'informatique qui traite des ordinateurs quantiques utilisant des phénomènes de la mécanique quantique, par opposition à ceux de l'électricité exclusivement, pour l'informatique dite « classique ». Les phénomènes quantiques utiles sont l'intrication quantique et la superposition. Les opérations ne sont plus basées sur la manipulation de bits, mais de **qubits**.»

Source: <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/quantum-computing>;

<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Informatique-quantique.html>

 CH Club: j'aime le code

# FONCTIONNEMENT DE L'ORDINATEUR CLASSIQUE (1)

---

- 1- Un ordinateur classique est un appareil capable d'exécuter un programme.
- 2- Un programme est une série d'opérations écrite à l'avance. Le programme est sauvegardé dans une mémoire.
- 3- L'ordinateur classique traite les informations qui sont stockés dans la mémoire à l'aide de son processeur.
- 4- L'information est modélisée sous forme binaire (bits) „0“ et „1“
- 5- Un bit se définit comme la plus petite unité de donnée d'un ordinateur.

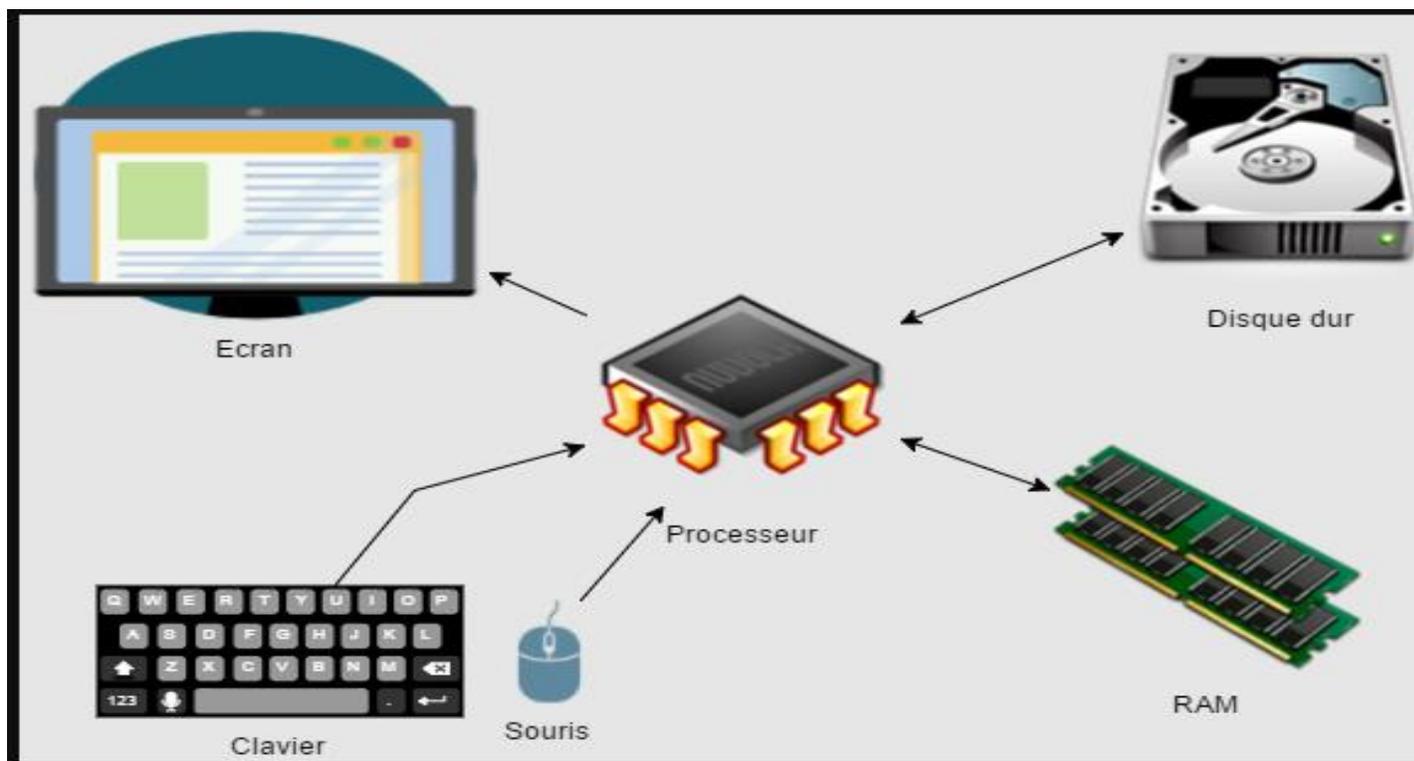
# FONCTIONNEMENT DE L'ORDINATEUR CLASSIQUE (2)

---

- 6 - Le processeur (circuit intégré) et la mémoire contiennent de milliards de transistors.
- 7 - Le nombre de transistors augmente les fonctionnalités des composants électroniques.
- 8 - Un transistor est un petit interrupteur électronique.
- 9 - Les transistors assemblés forment des portes logiques. Les portes logiques mis ensembles permettent ainsi d'effectuer un très grand nombre de fonctions complexes.

# FONCTIONNEMENT DE L'ORDINATEUR CLASSIQUE?

---



## Microprocessor Logic



# LES LIMITES DE L'ORDINATEUR CLASSIQUE

---

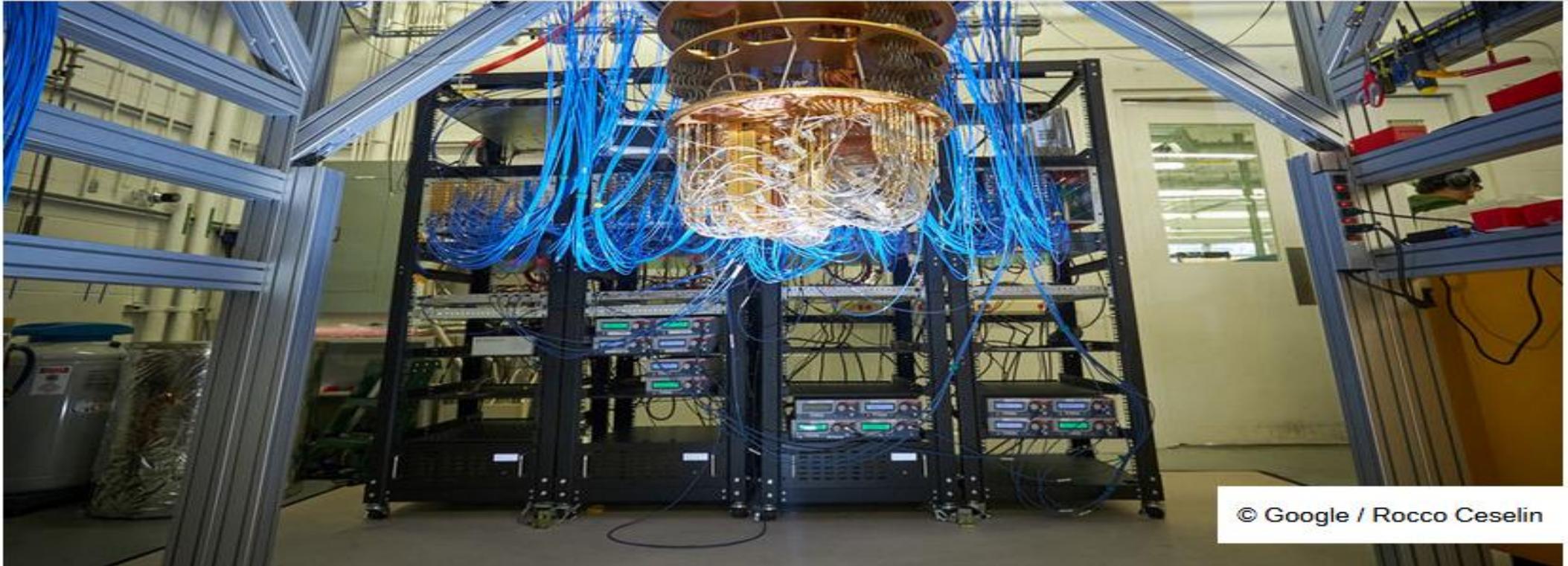
1. Le nombre de transistors sur un processeur, suit la loi empirique de Moore qui dit « le nombre de transistors double tous les deux ans et donc double également la puissance des ordinateurs »
2. Moore déclare encore « en 1997 que cette croissance des puces serait confrontés aux environ de 2017 à des limites physiques, celle de la tailles des atomes »
3. Les transistors fabriqués de nos jours sont de plus en plus petits
4. Avec la taille de la structure de ces transistors trop petit, pose le risque de création des interactions électroniques entre les transistors eux-mêmes et pourrait créer des problèmes.
5. D'où la nécessité de faire recourt à d'autres solutions comme l'informatique quantité si on veut continuer avec des ordinateurs toujours plus puissants

# ORDINATEURS QUANTIQUES

---

**L'ordinateur quantique ou système informatique quantique**  
« utilise les propriétés quantiques de la matière [...] afin d'effectuer des opérations sur des données. [...] Le calculateur quantique travaille sur des qubits dont l'état quantique peut posséder plusieurs valeurs, ou plus précisément une valeur quantique comportant plusieurs possibilités simultanées ».

# ORDINATEURS QUANTIQUES



# L'HISTOIRE DE L'ORDINATEUR QUANTIQUE

---

- En 1981: le physicien Paul Benioff américain, détaillait une machine de Turing fonctionnant selon les principes de la mécanique quantique.
- En 1982: l'Américain Richard Feynman théorise les « simulateurs quantiques », une sous-classe d'ordinateur quantique qui sert à contrôler les interactions entre des bits quantiques.
- En 1985, le physicien britannique David Deutsch, réussit à démontrer la validité de la théorie de Feynman.
- En 1998: 1er prototype d'ordinateur quantique par IBM dans son centre de recherche d'Almaden à San José en Californie avec 2 qubits.
- En 2001, le centre de recherche d'Almaden présente le 1er processeur quantique à 7 qubits, composé d'une seule molécule à 7 spins nucléaires.
- Le 13 février 2007, l'entreprise D-Wave Systems montre publiquement « Orion », le 1er ordinateur quantique adiabatique de 16 qubits

Source: <https://geeko.lesoir.be/2021/10/21/l'informatique-quantique-une-histoire-qui-a-debute-il-y-a-40-ans/>

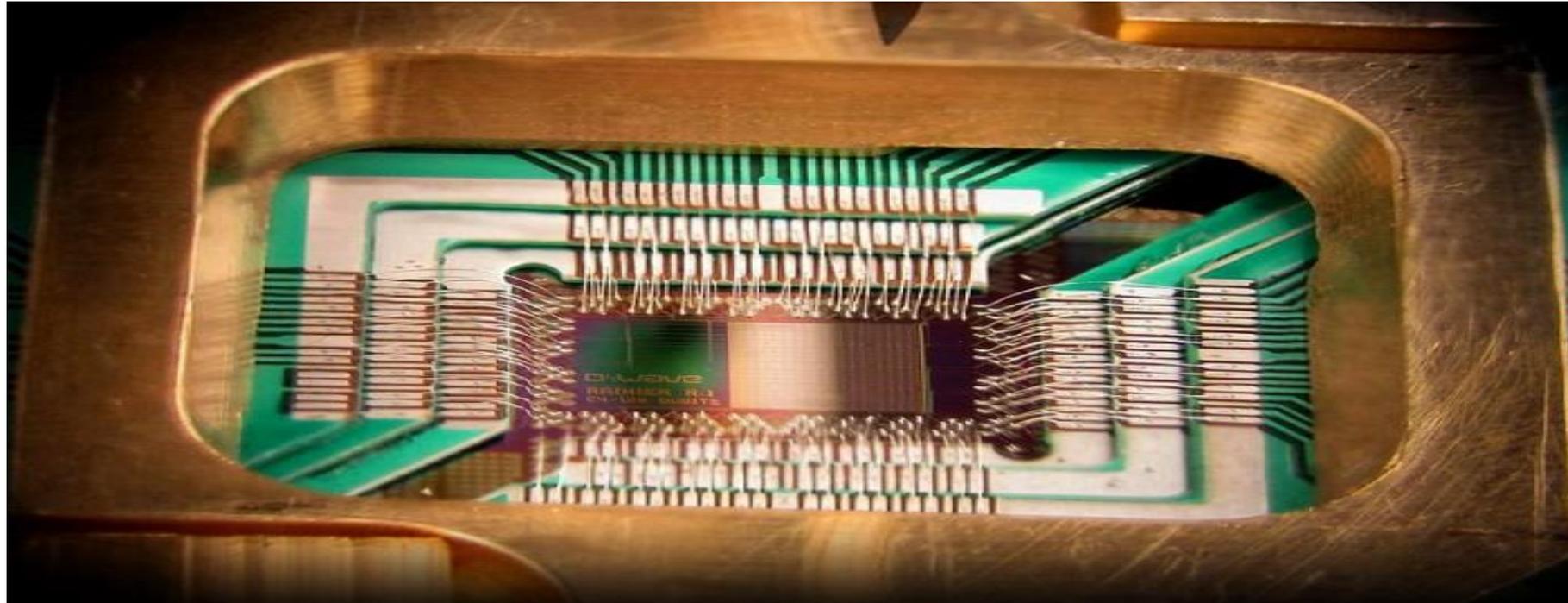
# L'HISTOIRE DE L'ORDINATEUR QUANTIQUE (2)

---

- En février 2016, IBM sort le processeur «IBM Quantum Experience», le premier ordinateur quantique connecté au cloud. un processeur de 5 qubits.
- En mai 2017, IBM annonce un processeur 17 qubits plus élaboré qui pourrait servir de base aux systèmes commerciaux.
- En mai 2017, Google sort un processeur de 20 qubits
- En février 2018, Google annonce 72 qubits appelé «Bristlecone».
- En 2018 Intel confirme le développement d'une puce de test supraconductrice de 49 qubits, appelée «Tangle Lake».
- En 2019, IBM présente son 1er ordinateur quantique commercial doté de 20 qubits, le «IBM Q System One».

# PUCE D'UN ORDINATEUR QUANTIQUE (D-WAVE SYSTEMS)

---



# PHYSIQUES QUANTIQUES (1)

---

**La physique quantique** « est un ensemble de théories physiques nées entre 1900 et 1930 et qui cherchent à expliquer le comportement des atomes et des particules (les électrons qui tournent autour du noyau d'un atome par exemple).[...]».

# PRINCIPES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE (2)

---

**1. La dualité onde-corpuscule** « les objets quantiques peuvent être décrits au niveau microscopique comme des ondes. C'est le cas notamment avec la lumière, qui est portée par un photon, une particule, et qui se comporte comme une onde. ».

**2. La superposition des états** : « une particule peut être dans plusieurs états à la fois. Un électron qui tourne autour d'un atome peut être sur tous les points de l'orbite en même temps, et à toutes ses vitesses possibles. »

# PRINCIPES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE (3)

---

**3. La quantification** « certaines données de ces particules, comme l'énergie, ne peuvent pas prendre toutes les valeurs possibles pour autant. Ses valeurs forment un ensemble de résultats, que l'on appelle "quanta" et qui donnent leur nom à la physique quantique..».

**4. Le principe d'indétermination** « on ne peut pas donner en même temps avec exactitude la position et la vitesse d'une particule. Cette incertitude est structurelle et répond au hasard (on utilise des calculs de probabilités). Albert Einstein n'aimait d'ailleurs pas ce principe et avait déclaré "Dieu ne joue pas aux dés". Niels Bohr, l'un des pères de la physique quantique lui avait répondu : "Qui êtes-vous pour dire à Dieu ce qu'il doit faire?" »

# PRINCIPES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE (4)

---

**5. La mesure influe sur l'état de la particule quantification** « une fois mesuré, l'état de la particule n'est plus superposé. C'est la conclusion de la célèbre expérience de pensée d'Erwin Schrödinger. Un chat est enfermé dans une boîte avec un flacon de gaz mortel relié à un matériau radioactif. SI la radioactivité dépasse un certain seuil, le flacon est cassé et le chat est empoisonné. Selon le principe de superposition des états, le chat dans sa boîte close est donc à la fois mort et vivant. Si on ouvre la boîte, et donc si on prend une mesure, on connaît l'état réel du chat.

**6. L'effet tunnel** « un objet quantique peut traverser un obstacle, comme une partie du noyau d'un atome le fait avec la radioactivité. »

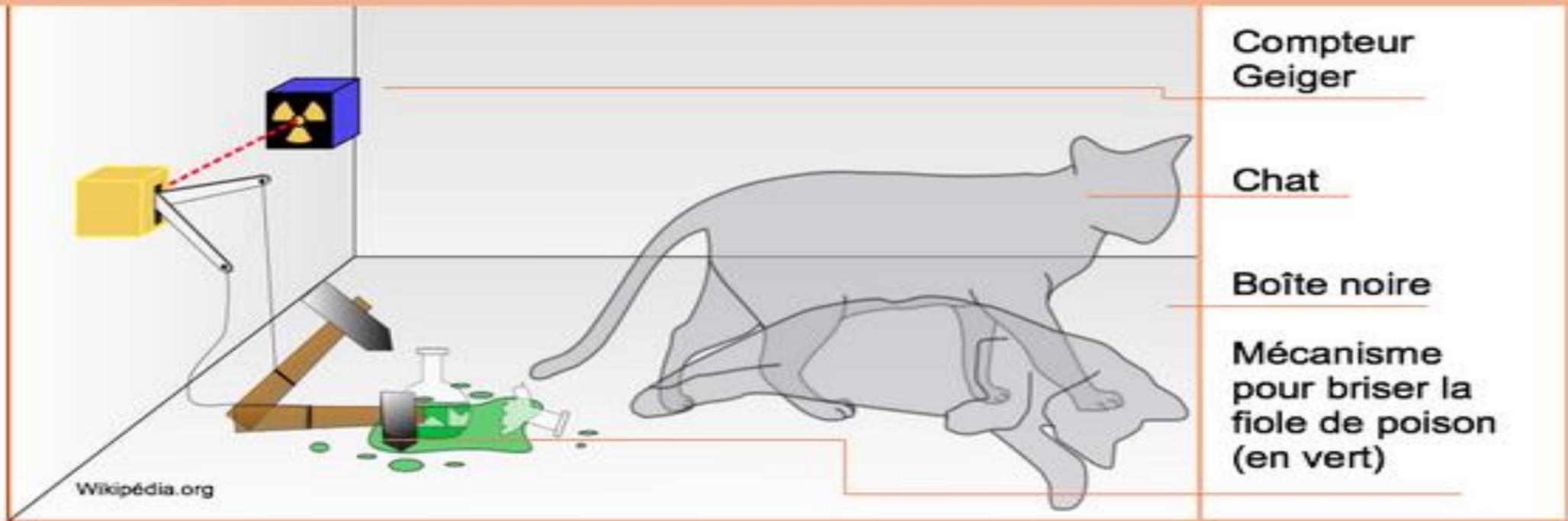
# PRINCIPES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE (4)

---

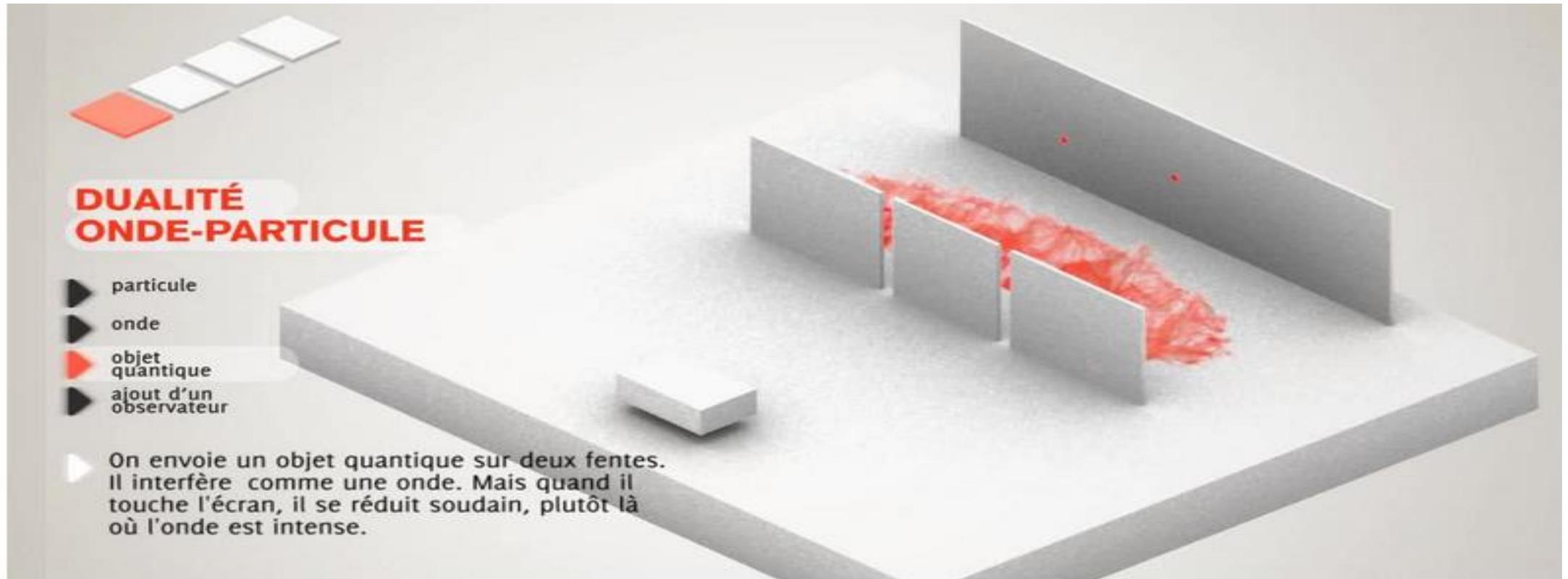
**7. L'intrication** « deux particules peuvent former un système lié. Quand l'une bouge, l'autre aussi. Et cela, quelle que soit la distance entre les deux. Attention, il n'y a pas d'échange d'informations. »

# LA SUPERPOSITION DES ÉTATS: LE CHAT DE SCHRÖDINGER

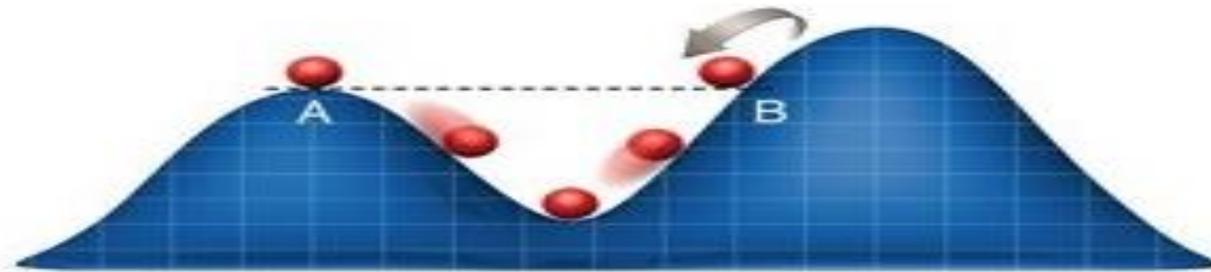
**Fig. 2 : l'expérience du « chat de Schrödinger »**



# LA DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE



# L'EFFET TUNNEL



En physique classique, le ballon lâché depuis le point A ne peut monter plus haut que le point B (loi de la dynamique).



En physique quantique, l'électron, arrivé au point B, peut, par effet tunnel, atteindre le point C situé de l'autre côté de la colline.

La mécanique quantique prédit des comportements inhabituels, dont l'effet tunnel est un bon exemple. © Yuvanoé/CEA

# L'INTRICATION: THE ROLLING STONES



*Je ne sais pas comment ça a pu arriver, mais un lien s'est créé, là, qui tient toujours malgré tout le reste, comme un pacte très solide.*

**Keith Richards**

# LE FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR QUANTIQUE (1)

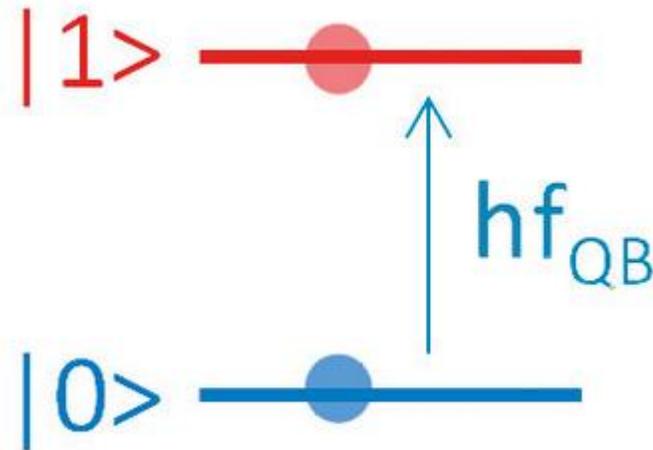
---

- 1- L'ordinateur quantique utilise les propriétés de la mécanique quantique comme la **superposition** et l'**intrication** pour manipuler les données.
- 2- Le **Qubit** est l'analogie quantique du bit, que représente la plus petite unité de stockage d'information quantique
- 3- Les qubits peuvent être utilisés pour encoder une information et soumis à des portes quantiques comme dans le cas des bits classiques
- 4- Les qubits ont la particularité de prendre à la fois la valeur 0 et 1 ainsi que toutes les valeurs intermédiaires entre ces deux bornes (0 et 1). Ce qui fait que la capacité de porter plus d'information par un qubit est théoriquement plus élevée que celle d'un bit (propriété de superposition).

# LE FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR QUANTIQUE (2)

---

5- Un bit quantique (qubit) a deux états quantiques  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ , séparés par une différence d'énergie définissant sa fréquence ( $f_{QB}$ ), et peut être à la fois dans ces deux états.



# LE FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR QUANTIQUE (3)

---

## 6-Stockage quantique, lecture classique:

- La superposition quantique est à la base de l'informatique quantique.
- Un bit quantique - ou qbit - du fait du principe de superposition se trouve dans un état indéterminé. Il stocke à la fois un 1 et un 0.
- Dès qu'il y a une mesure le qbit perd logiquement son état superposé. Il est projeté, ou réduit.
- En conclusion: la lecture détruit la superposition quantique.

# LE FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR QUANTIQUE (4)

---

Exemple: rechercher de la position du livre «L'ORDINATEUR QUANTIQUE C'EST FANTASTIQUE» rangé dans un rayon d'une bibliothèque.

1. la recherche avec un ordinateur classique: nécessite 4 requêtes
2. la recherche avec un ordinateur quantique: nécessite 1 seule requête

# LE FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR CLASSIQUE

**cea**

L'ORDINATEUR QUANTIQUE C'EST FANTASTIQUE

1

0	ORANGE MÉCANIQUE QUANTIQUE
1	IL ÉTAIT UNE FOIS LA QUANTIQUE
2	L'ORDINATEUR QUANTIQUE C'EST FANTASTIQUE
3	LA NEUVIÈME PORTE LOGIQUE

**cea**

0|1|0|0|1|1|1|1|0|...|1|0|1|0|0

2

0 0	0 1 1 0 1 1 1 0 0 ... 1 0 1 1 0
0 1	0 0 1 1 1 1 0 0 1 ... 1 1 1 0 1
1 0	0 1 0 0 1 1 1 1 0 ... 1 0 1 0 0
1 1	0 1 0 0 1 0 1 0 0 ... 1 1 1 0 0

**cea**

Oracle

0 1 0 0 1 1 1 1 0 ... 1 0 1 0 0

3

0 0	0 1 1 0 1 1 1 0 0 ... 1 0 1 1 0
0 1	0 0 1 1 1 1 0 0 1 ... 1 1 1 0 1
1 0	0 1 0 0 1 1 1 1 0 ... 1 0 1 0 0

**cea**

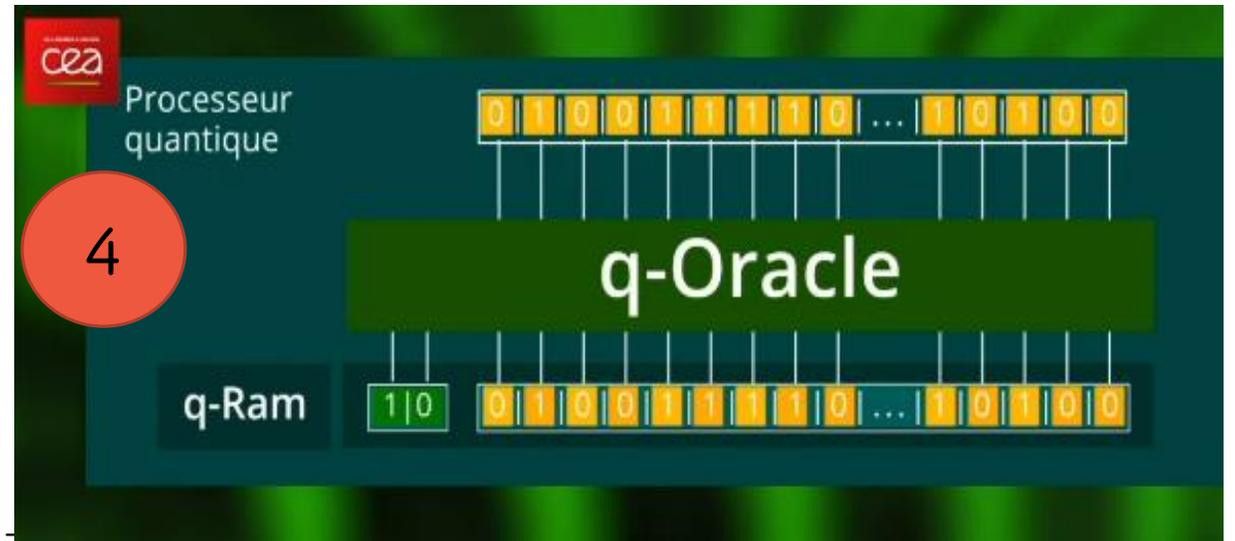
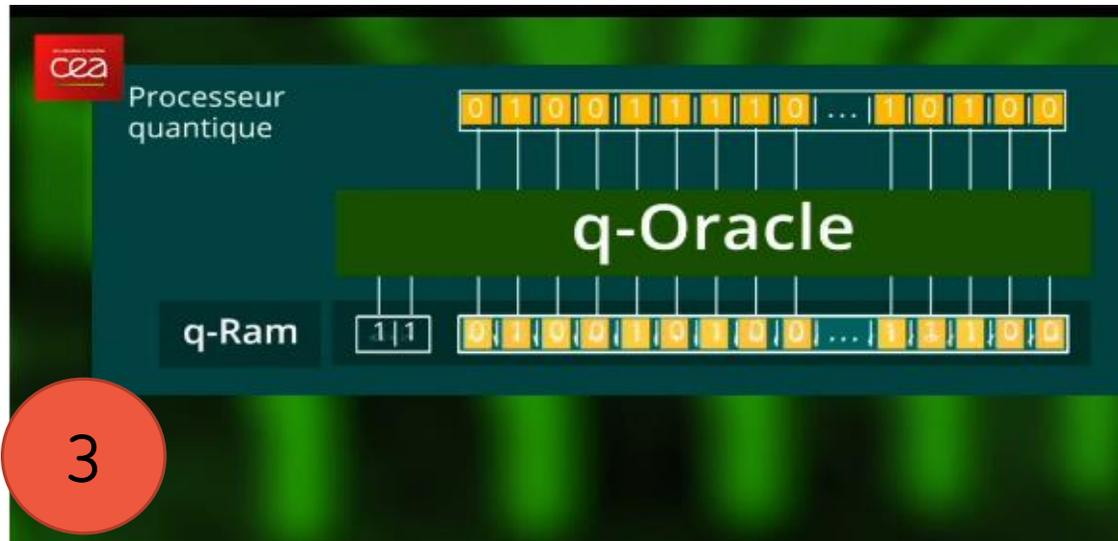
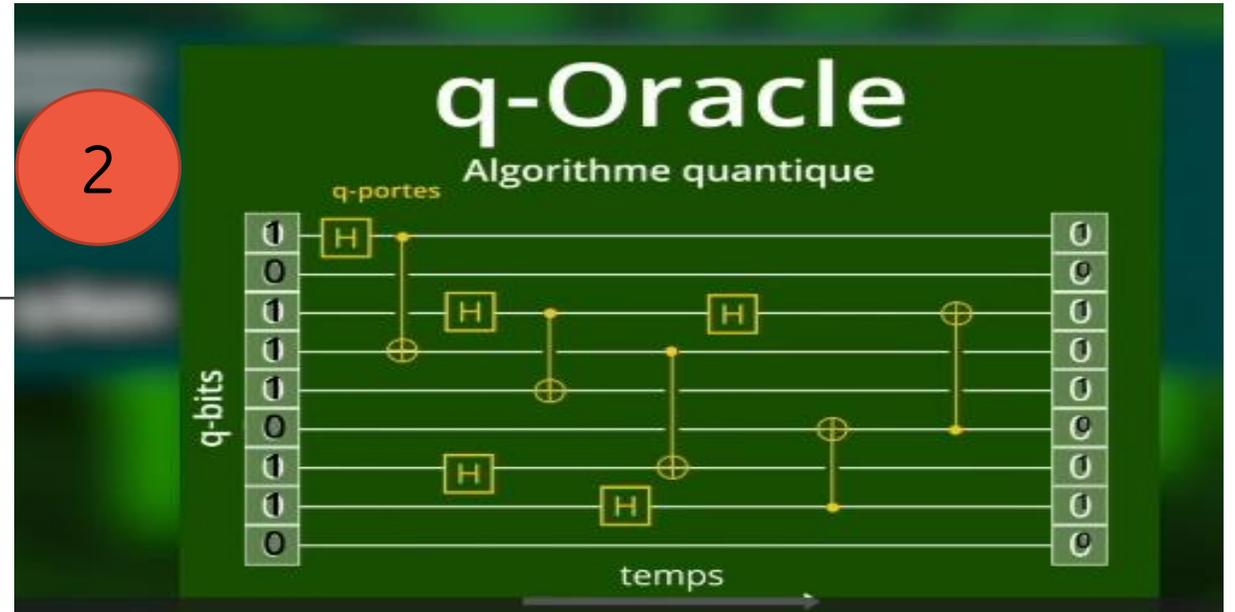
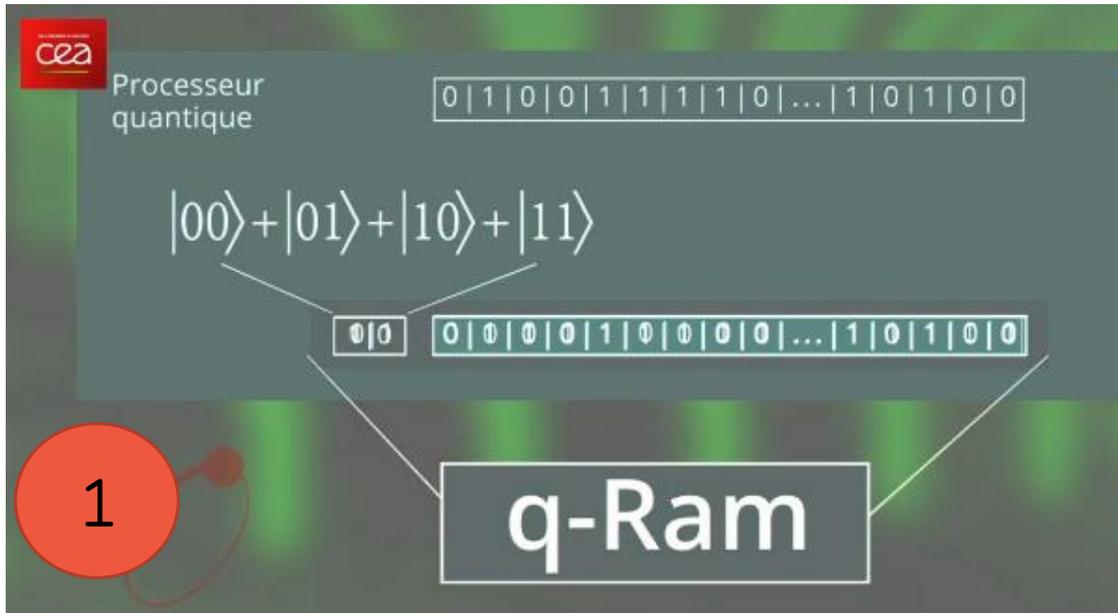
Oracle

0 1 0 0 1 1 1 1 0 ... 1 0 1 0 0

4

0 0	0 1 1 0 1 1 1 0 0 ... 1 0 1 1 0
0 1	0 0 1 1 1 1 0 0 1 ... 1 1 1 0 1
1 0	0 1 0 0 1 1 1 1 0 ... 1 0 1 0 0

# LE FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR QUANTIQUE: ALGORITHME DE GROVER



	registre de n bits	n=3	registre de n qubits	
				<b>000</b>
				<b>001</b>
<b>101</b> ←	2 <sup>n</sup> états possibles un seul à la fois		2 <sup>n</sup> états possibles simultanément →	<b>010</b>
				<b>011</b>
	évaluable		partiellement évaluable	<b>100</b>
	copies indépendantes		incopiable indépendamment	<b>101</b>
	effaçable individuellement		ineffaçable individuellement	<b>110</b>
	lecture non destructive		lecture modifie la valeur	<b>111</b>
	déterministe		probabiliste	

# LES ENJEUX DES ORDINATEURS QUANTIQUES (1)

---

**1-La chimie** : possibilité de simuler de manière exacte, la structure et le fonctionnement de grosses molécules pour la pharmacologie ou pour l'agronomie.

**2-Le Data mining** : Accélérer la recherche d'une information spécifique dans une vaste base de données.

**3-L'optimisation de procédés de l'industrie de demain**: possibilité de trouver une solution optimale dans un système complexe à multiparamés, comme en logistique pour une tournée plus rapide d'un camion de livraison ou ajuster l'offre à la demande sur un réseau électrique très décentralisé.

# LES ENJEUX DES ORDINATEURS QUANTIQUES (2)

---

**4-** La solution quantique traite des problèmes très complexes avec une masse de données à traiter extrêmement énorme que les supercalculateurs classiques sont pas capables de régler.

**5-** Application dans la phase d'apprentissage d'un système d'IA, comme la reconnaissance d'images

**6-** Les informations ne seront plus traitées de manière séquentielle, mais parallèle.

# 4 PISTES DE QUBITS EN COMPÉTITION (1)

---

## 1-Le qubit supraconducteur:

- est pour le moment la technologie la plus avancée.
- C'est un courant entre deux matériaux supraconducteurs séparés par une couche d'un matériau non supraconducteur
- L'objectif: créer, à très basse température, une superposition de deux états distincts d'un courant qui oscille à haute fréquence et traverse la barrière en une boucle supraconductrice.
- IBM, Google, Intel, D-Wave et le CEA.

# 4 PISTES DE QUBITS EN COMPÉTITION (2)

---

## 2-Le qubit silicium:

- Utilisé à très basse température, la superposition (provoquée par un champ magnétique) du spin (une propriété quantique des particules qui n'a pas d'équivalent en physique classique) d'un électron.
- les qubits silicium pourraient ainsi être intégrés par millions voire milliards sur une même puce.
- largement utilisées dans l'industrie microélectronique, ce qui leur donne un avantage compétitif pour la production en série.
- Intel et le CEA.

# 4 PISTES DE QUBITS EN COMPÉTITION (3)

---

## 3-Le qubit à ions piégés:

- les ions piégés peuvent s'intriquer plus librement et donc résoudre des calculs complexes plus facilement.

## 4-Le qubit photonique:

- L'avantage de cette option est que ces qubits fonctionnent à température ambiante.

# LES DIFFICULTÉS DE L'ORDINATEUR QUANTIQUE

---

## La fragilité de l'état de superposition:

- Toute interaction quelconque petite soit-elle avec l'extérieur a pour conséquence de détruire la superposition quantique : on parle de la **décohérence**.
- La difficulté s'aggrave à mesure que le nombre de qubits intriqués augmente
- Certains qubits effectuent le travail de calcul, tandis que d'autres traitent les erreurs
- L'un des principaux obstacles à la conception d'un ordinateur quantique de grande d'envergure est le coût très élevé de la correction des erreurs quantiques.
- La plupart des opérations d'un ordinateur quantique consistent à corriger les erreurs pour garantir que le résultat du calcul est juste

*Un homme à la mer lève un bras, crie : « Au secours ! »  
Et l'écho lui répond : « Qu'entendez-vous par là ? »*  
**Jules Supervielle**