

Exercice de prospective nationale
en physique nucléaire, physique
des particules et astroparticules
Développements technologiques et applications associés



Institut National
de Physique Nucléaire
et de Physique des Particules



Séminaire thématique

Calcul, algorithmes et données

Laboratoire de Physique de Clermont
17-18 octobre 2019

Pour consulter l'agenda et obtenir plus d'informations
sur l'exercice de prospective nationale:

<https://prospectives2020.in2p3.fr>

Quantum Computing

(une courte introduction)

18.10.2019

Bogdan Vulpescu

Laboratoire de Physique de Clermont

Une machine pour faire des calculs ?



classique :

- dans la base de numérotation la plus petite, 2 (bits)
- faire les calculs élémentaires
- implémenter des algorithmes

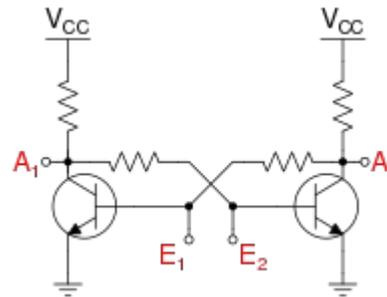
quantique :

- dans la base de numérotation 2 (qubits)
- nous avons des machines qui exécutent des algorithmes (triage, classification, optimisation, TF, ...)
- calcul générique ?

L'implémentation en hardware

- *classique* : une différence de potentiel électrique qui bascule entre deux valeurs de référence (dans un circuit réalisé avec des transistors bipolaires, par exemple)

les deux états d'un circuit *flip-flop* :



- *quantique* : une propriété physique microscopique, qui obéit aux lois de la mécanique quantique (atome, molécule, micro-courants super-conducteurs, etc.)
- pour simplifier, utilisons les deux cotés d'une pièce : *pile* ou *face*



La superposition des états dans la mécanique quantique

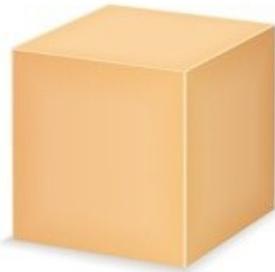
un qubit :

$$\alpha \begin{array}{c} \text{1 EURO} \\ |0\rangle \end{array} + \beta \begin{array}{c} \text{REPUBLICA ITALIANA} \\ |1\rangle \end{array} = \begin{array}{c} \text{REPUBLICA ITALIANA} \\ |0\rangle + |1\rangle \end{array}$$

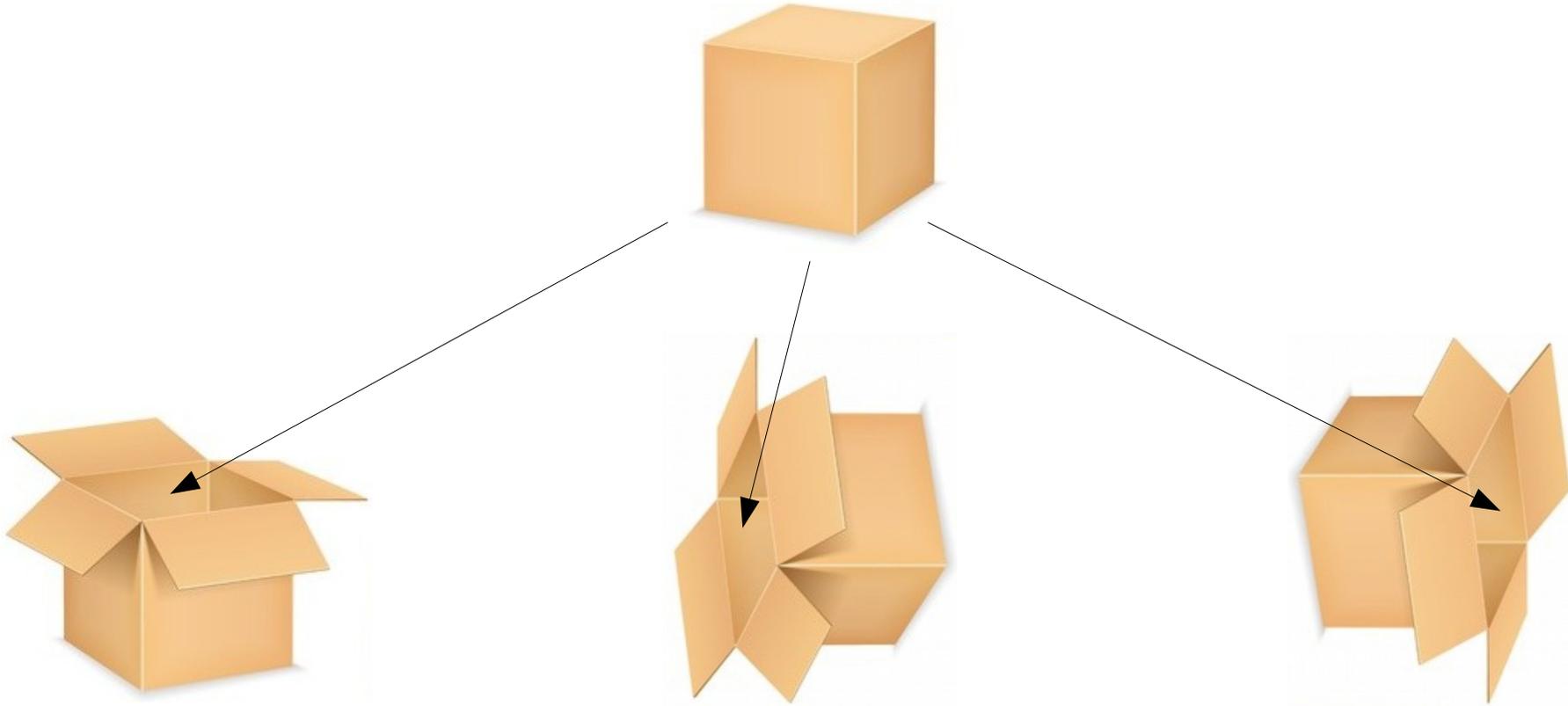
le vecteur d'état

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

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$



La mesure en mécanique quantique



$|0\rangle$ avec probabilité $|\alpha^2|$

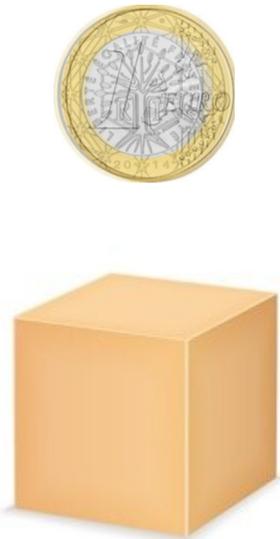
$|1\rangle$ avec probabilité $|\beta^2|$

?

?

relation d'incertitude de Heisenberg

Une mesure modifie l'état du système



$|\psi\rangle$

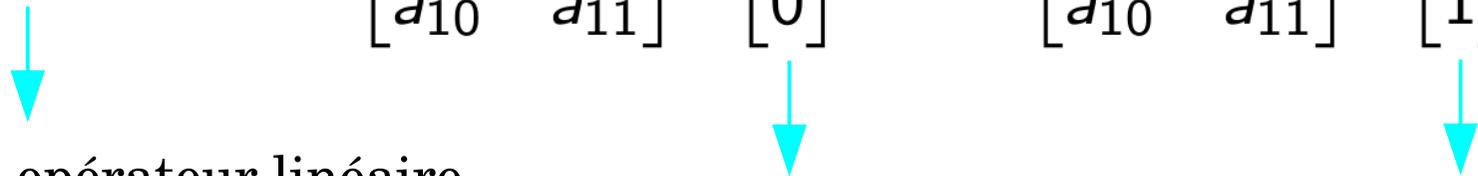


$|0\rangle$

... à 100 %

L'opération de mesure en mécanique quantique (le qubit = espace vectoriel à deux dimensions)

$$A |\psi\rangle = \alpha \cdot \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \beta \cdot \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$



$$|0\rangle \qquad |1\rangle$$

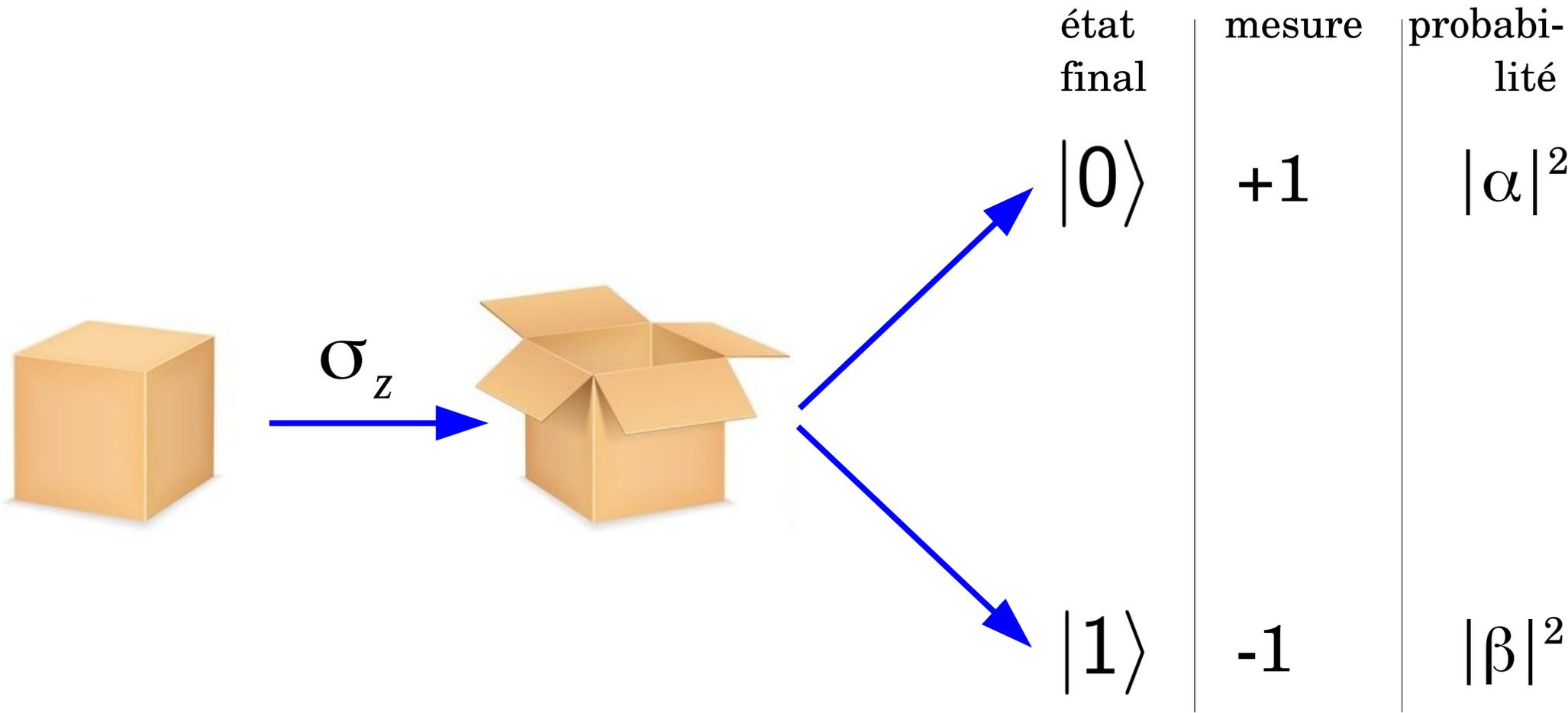
évolution : opérateur linéaire

La **mesure** est définie par le deuxième postulat de la mécanique quantique

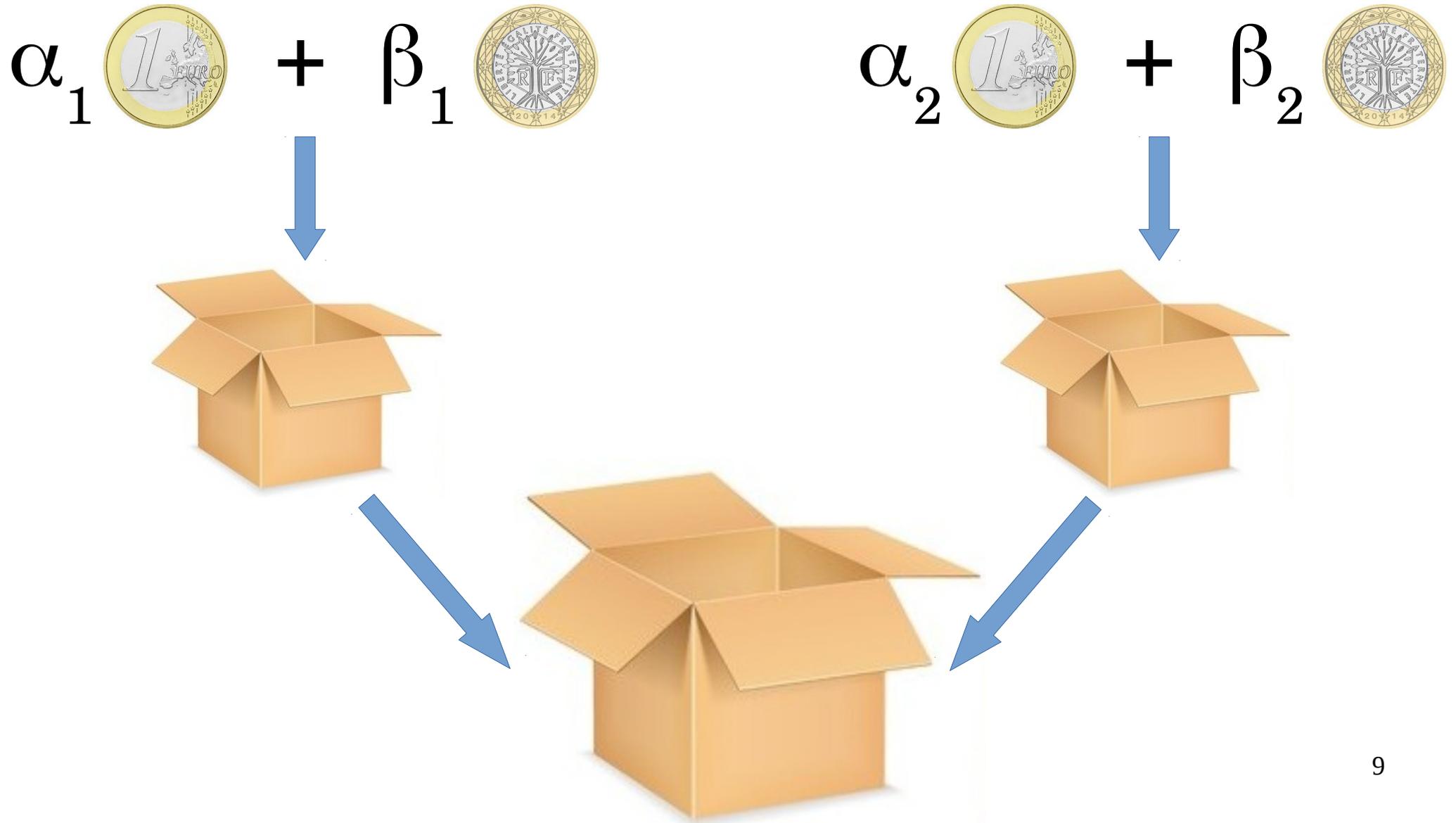
$$\sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \qquad \sigma_z |0\rangle = +1 \cdot |0\rangle \qquad , \qquad \sigma_z |1\rangle = -1 \cdot |1\rangle$$

(collapse dans une des états propres, mesure une des valeurs propres)

Une mesure c'est ça :



Un système avec deux qubits



Évolution : produit tensoriel de deux opérateurs, actionne sur un système de deux qubits

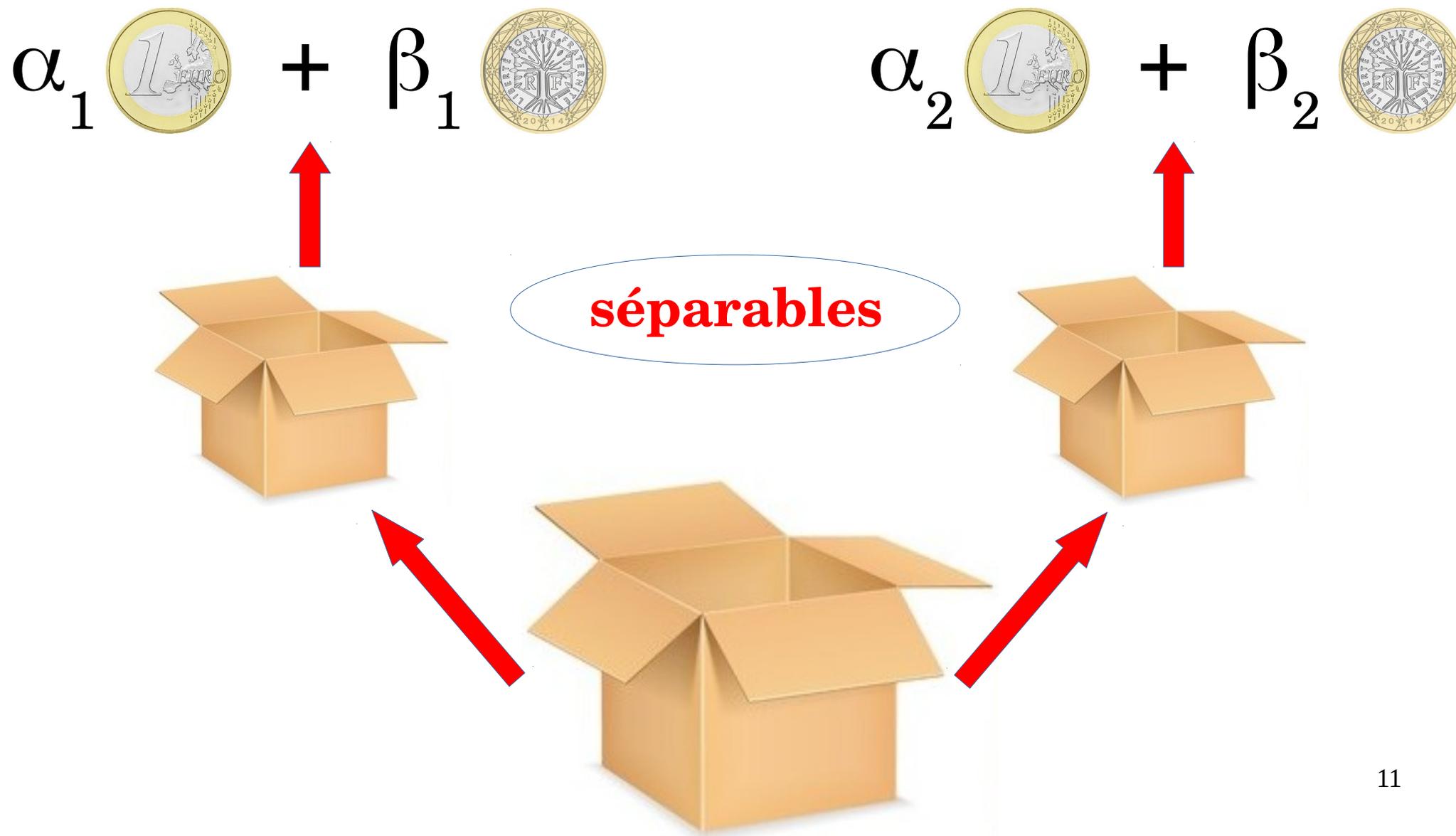
$$\sigma_z \otimes \sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} & 0 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \\ 0 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} & -1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\sigma_z \otimes \sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

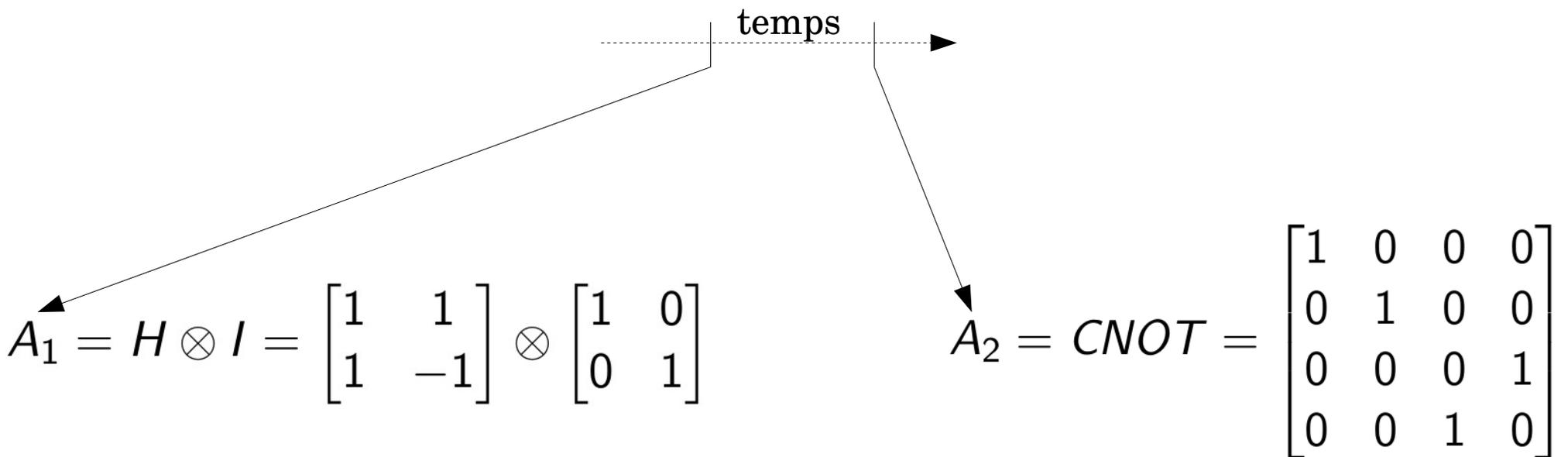
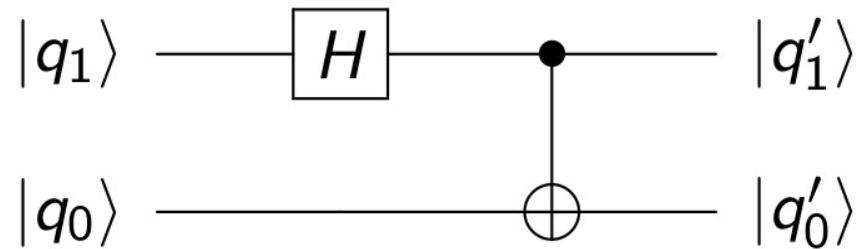
$ 00\rangle$	\rightarrow	$+$	$ 00\rangle$
$ 01\rangle$	\rightarrow	$-$	$ 01\rangle$
$ 10\rangle$	\rightarrow	$-$	$ 10\rangle$
$ 11\rangle$	\rightarrow	$+$	$ 11\rangle$

XOR ?...

Qubits intriqués (non séparables)

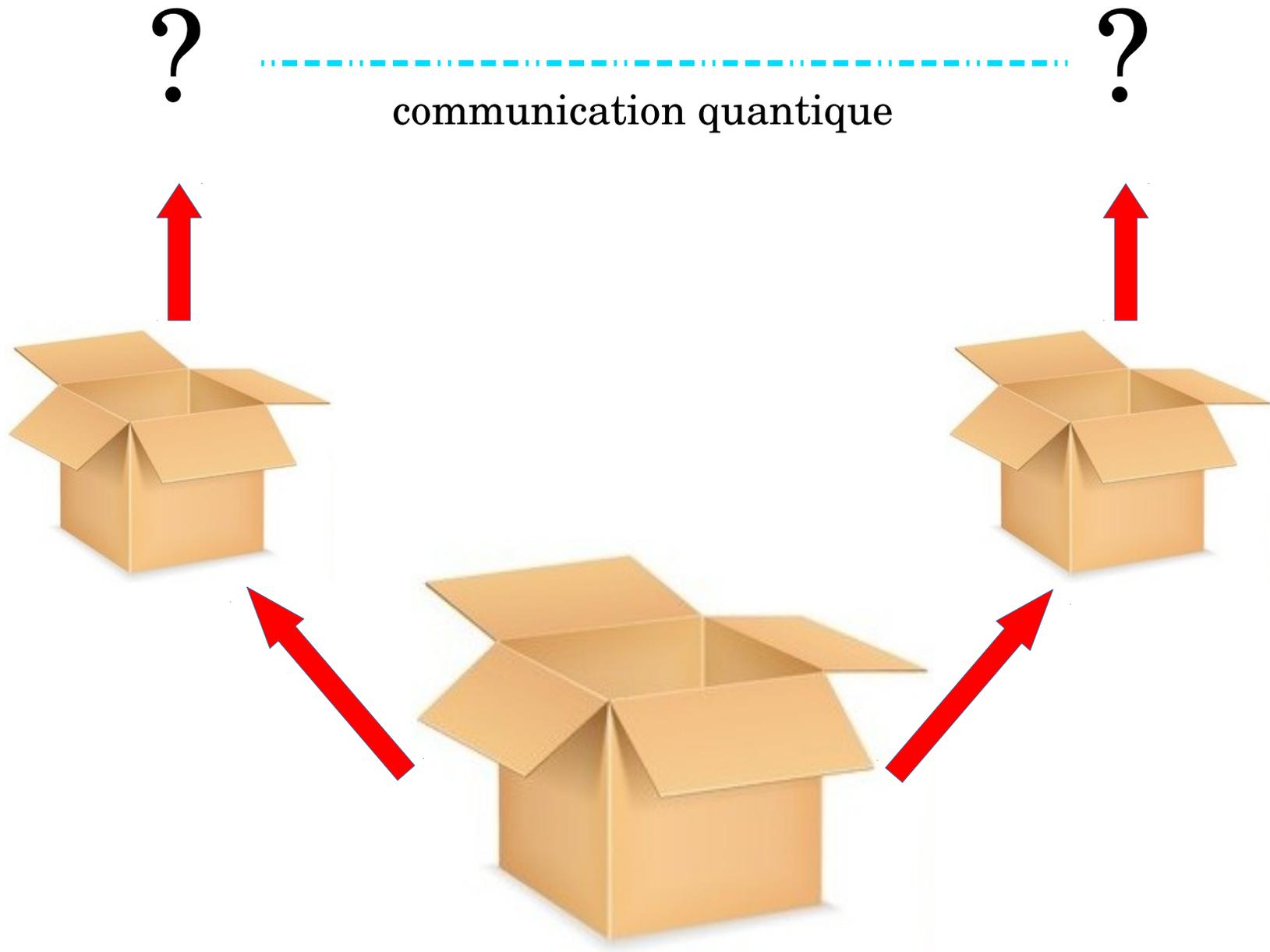


Évolution d'un système de deux qubits (ou manipulation) dans la représentation de Feynman

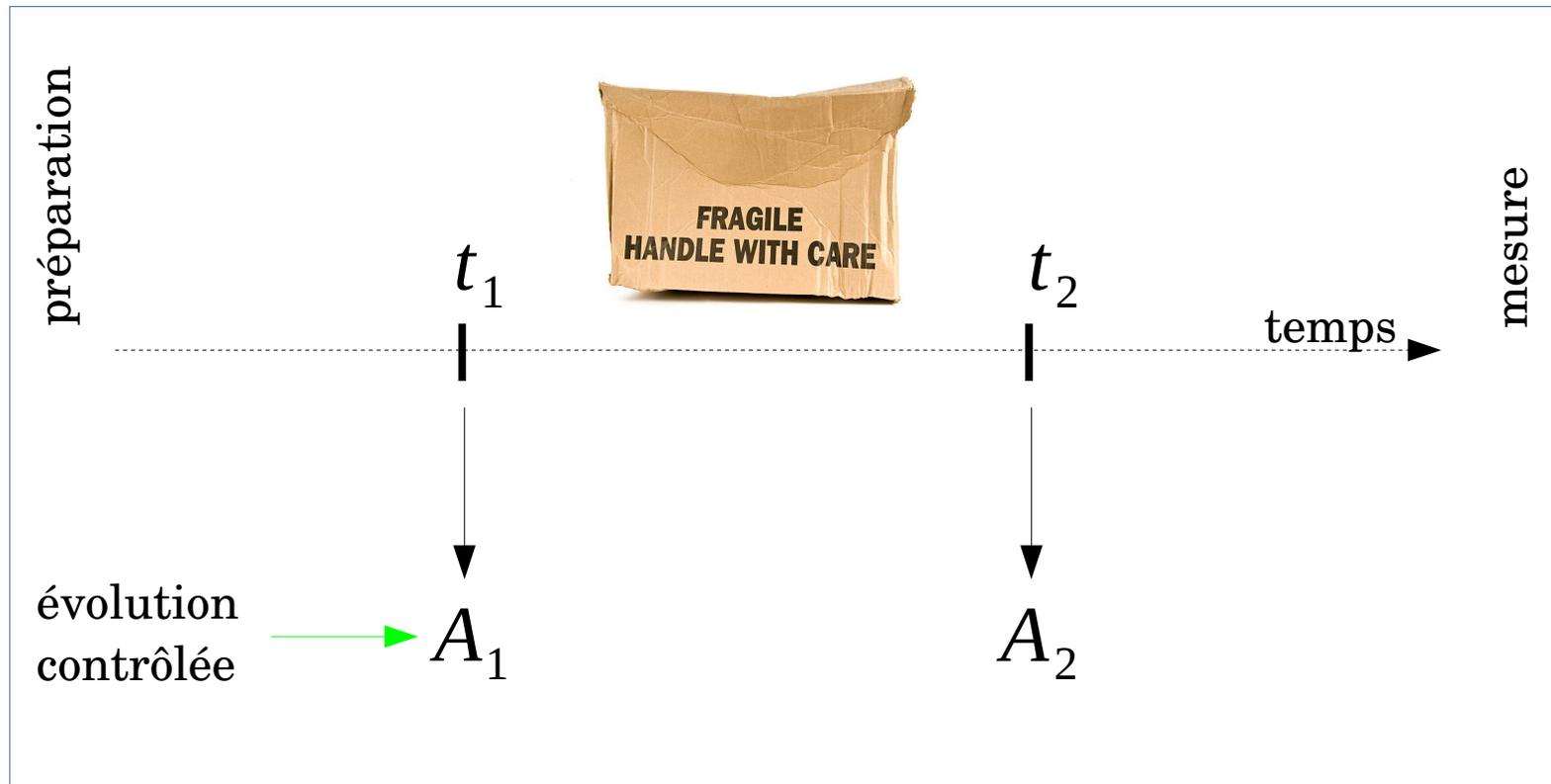


le deux qubits à la sortie ne sont plus séparable ! ils sont **intriqués** !

Qubits intriqués



Le problème de la décohérence

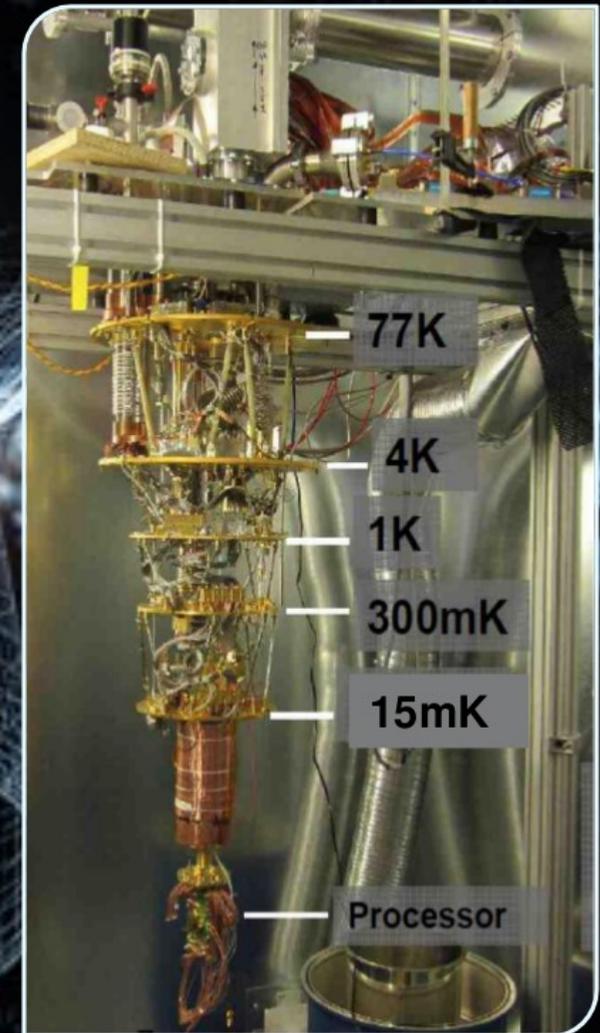


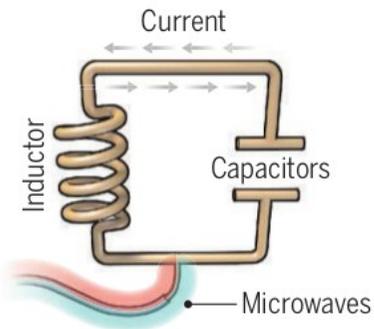
le système doit être en même temps :

- **accessible**, pour permettre la préparation, l'évolution contrôlée et la mesure
- bien **isolé** (maintenir la cohérence quantique) sur toute la durée de la manipulation

Processor Environment

- Cooled to 0.015 Kelvin, 175x colder than interstellar space
- Shielded to 50,000 \times less than Earth's magnetic field
- In a high vacuum: pressure is 10 billion times lower than atmospheric pressure
- On low vibration floor
- <25 kW total power consumption – for the next few generations





Superconducting loops

A resistance-free current oscillates back and forth around a circuit loop. An injected microwave signal excites the current into superposition states.

Longevity (seconds)
0.00005

Logic success rate
99.4%

Number entangled
9

Company support

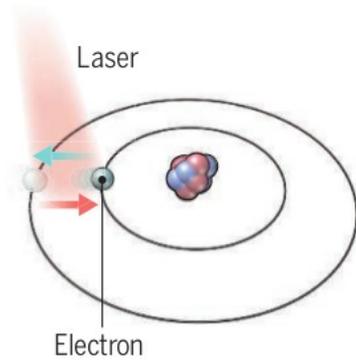
Google, IBM, Quantum Circuits

+ Pros

Fast working. Build on existing semiconductor industry.

- Cons

Collapse easily and must be kept cold.



Trapped ions

Electrically charged atoms, or ions, have quantum energies that depend on the location of electrons. Tuned lasers cool and trap the ions, and put them in superposition states.

>1000

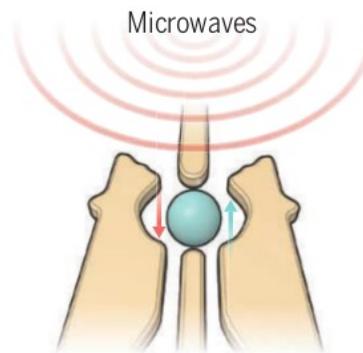
99.9%

14

ionQ

Very stable. Highest achieved gate fidelities.

Slow operation. Many lasers are needed.



Silicon quantum dots

These "artificial atoms" are made by adding an electron to a small piece of pure silicon. Microwaves control the electron's quantum state.

0.03

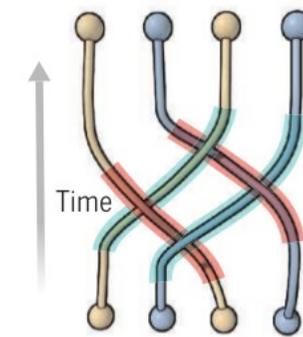
~99%

2

Intel

Stable. Build on existing semiconductor industry.

Only a few entangled. Must be kept cold.



Topological qubits

Quasiparticles can be seen in the behavior of electrons channeled through semiconductor structures. Their braided paths can encode quantum information.

N/A

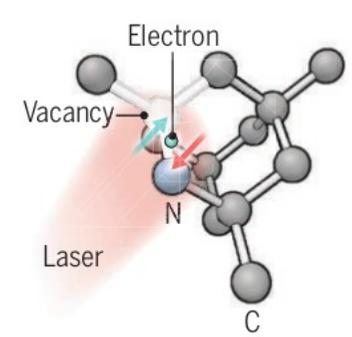
N/A

N/A

Microsoft, Bell Labs

Greatly reduce errors.

Existence not yet confirmed.



Diamond vacancies

A nitrogen atom and a vacancy add an electron to a diamond lattice. Its quantum spin state, along with those of nearby carbon nuclei, can be controlled with light.

10

99.2%

6

Quantum Diamond Technologies

Can operate at room temperature.

Difficult to entangle.

Note: Longevity is the record coherence time for a single qubit superposition state, logic success rate is the highest reported gate fidelity for logic operations on two qubits, and number entangled is the maximum number of qubits entangled and capable of performing two-qubit operations.

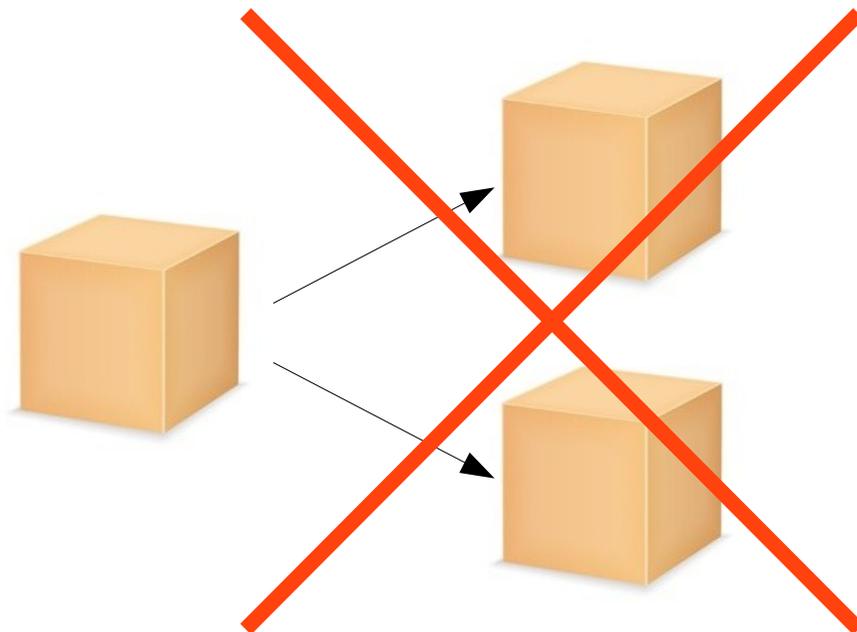
Enfin, pourquoi des qubits ?

Avantage des qubits par rapport aux bits classiques :

- la superposition : l'état d'un dispositif de calcul quantique avec n -qubits est représenté par une fonction d'onde dans un espace (Hilbert) à 2^n dimensions, ce qui fait que différents inputs peuvent être traités dans la même *run*, dans un **parallélisme massif, exponentiel** !
- le phénomène d'intrication des qubits : applications dans les algorithmes, mais surtout dans la **cryptographie** « incassable » par principe !

Le théorème de non-clonage

« il est impossible de cloner un système dans un état inconnu »
(*sans ouvrir la boîte et mesurer... et modifier en conséquence l'état ...*)



Erreurs intrinsèques (de dispositif)

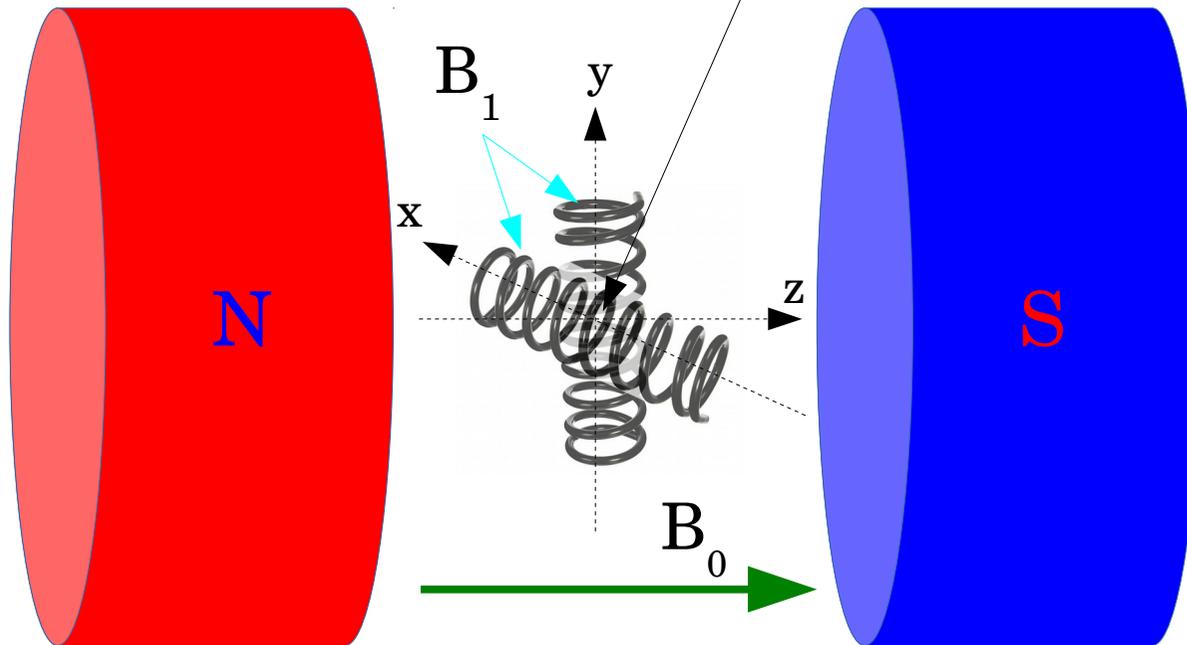
$$\alpha \begin{array}{c} \text{1€} \\ |0\rangle \end{array} + \beta \begin{array}{c} \text{2€} \\ |1\rangle \end{array} = \begin{array}{c} \text{1€} \\ |\psi\rangle \end{array}$$

la connaissance **exacte** du mélange d'états élémentaires
(préparation) suppose la possibilité de connaître (mesurer)

les paramètres α et β avec une **précision infinie** !

Le qubit par résonance magnétique (IRM)

un *qubit* avec moment magnétique



$$B_0 \sim 10 \text{ Tesla}$$

$$\omega = \omega_0 \sim 400 \text{ MHz}$$

$$\Omega = -2 \mu H_1 / \hbar$$

Porte NOT :

$$\Omega \tau = \pi$$

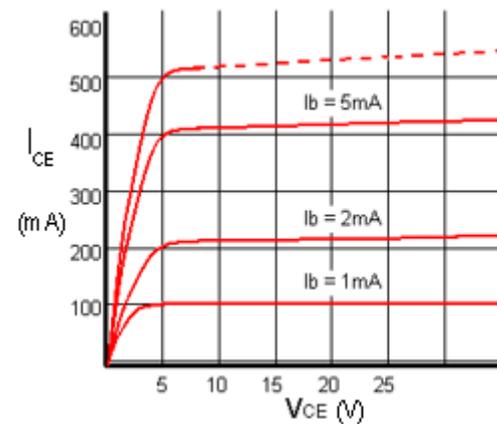
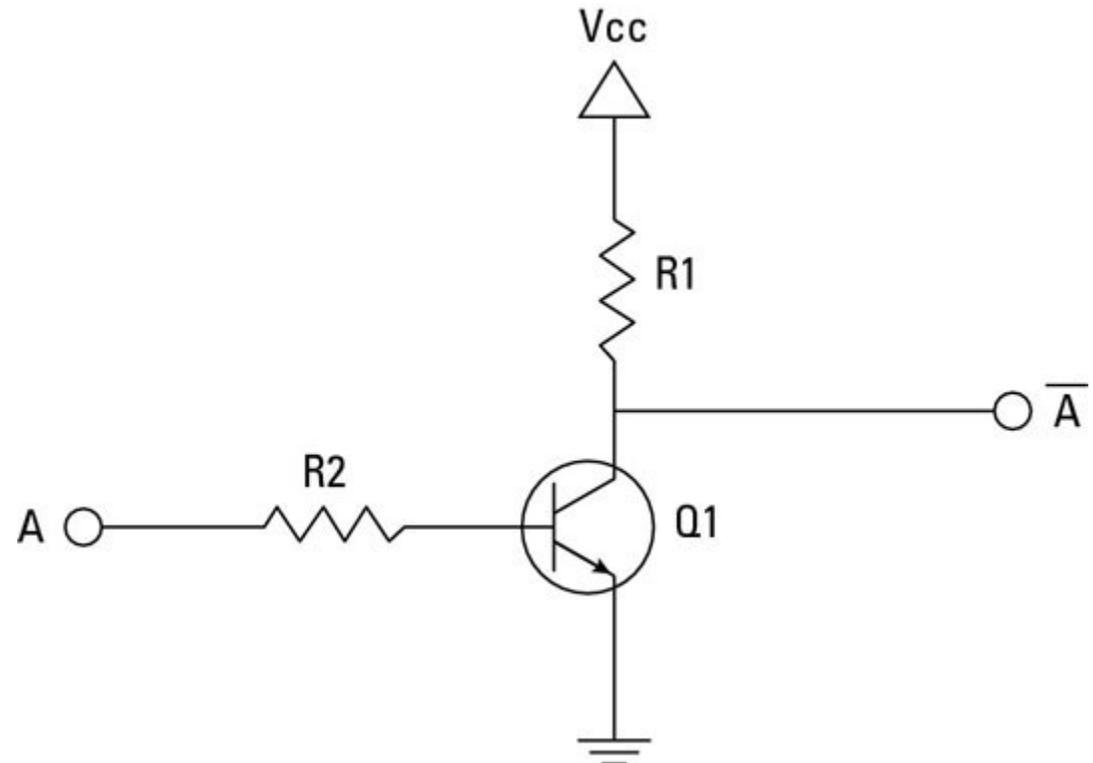
$$\omega \tau = (4n+3)\pi$$

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = -\mu \{ H_0 \sigma_z + H_1 [\cos(\omega t) \sigma_x + \sin(\omega t) \sigma_y] \} |\psi(t)\rangle$$

Porte NOT classique, avec transistor bipolaire

A	\bar{A}
0	1
1	0

précisément !



La correction des erreurs occupe une partie importante d'un calcul quantique

Classique :

- redondance
- il faut mesurer
- l'erreur peut être : $0 \Rightarrow 1$ ou $1 \Rightarrow 0$



Quantique :

- le clonage n'est pas possible
- si on mesure, on modifie
- l'erreur est continue (α et β)

Bibliographie



Quantum Computing for High Energy Physics workshop

5-6 November 2018, CERN <https://indico.cern.ch/event/719844/>

Quantum Computing at **D-Wave**, Dr. Bo Ewald

<https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3019529/>

Quantum Computing at **Google**, Kevin Kissell

<https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3058028/>

Quantum Computing at **IBM**, Ivano Tavernelli

<https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3019718/>

Quantum Computing at **Rigetti**, Dr. Will Zeng

<https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3098726/>

Quantum Computing at **Microsoft**, Dr. Stephen Jordan

<https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3035310/>

Quantum Communication Networks, Prof. Robert Thew

<https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3188306/>

.....

IBM



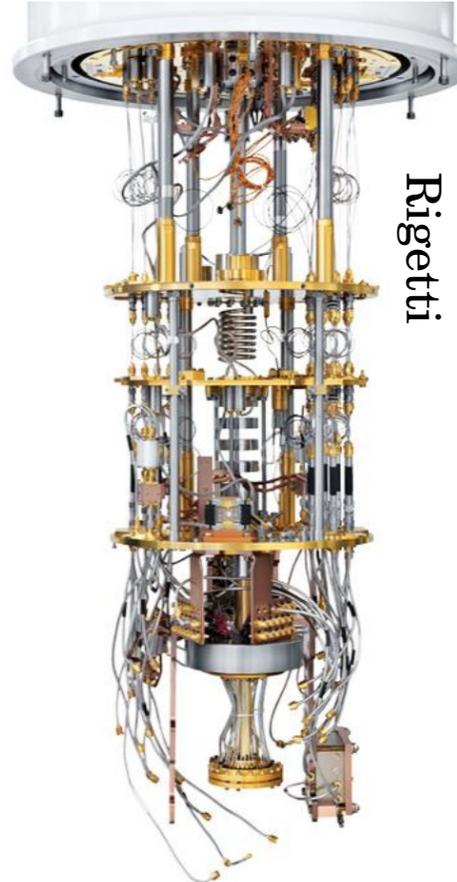
Intel



Google



Rigetti



D-Wave



Microsoft

