

Méthodes mathématiques de la théorie quantique - 2022

Bases de l'Information quantique - Day 4

Nana Engo

serge.nana-engo@facsciences-uy1.cm

Department of Physics
Faculty of Science
University of Yaounde I

<https://github.com/NanaEngo/Memaquan2022>

Bénin, 11-15 Juillet 2022



- 1 Outils de l'information quantique
- 2 Fax quantique ou téléportation quantique



1 Outils de l'information quantique

2 Fax quantique ou téléportation quantique



Non-clonage quantique I

- L'idée directrice de l'**information quantique** est que l'on peut, en utilisant les spécificités du formalisme quantique, et particulièrement l'**intrication quantique**, concevoir de nouvelles façons de traiter et transmettre l'information

Theorem (Non-clonage quantique)

*Il n'est pas possible de construire une machine (Quantum Cloning Machine, QCM) qui opère des transformations unitaires et capable de dupliquer (cloner) **parfaitement** un qubit arbitraire*

Comme le principe d'indétermination d'Heisenberg, le **Théorème de non-clonage** définit une **impossibilité intrinsèque**, pas seulement une limitation de laboratoire



Non-clonage quantique II

- Soit $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ le qubit à dupliquer, $|R\rangle$ le support vierge et $|M\rangle$ la machine à dupliquer ou cloner (photocopieuse)
- Est-ce qu'il existe une transformation unitaire U telle que

$$\begin{aligned}U|\psi\rangle|R\rangle|M\rangle &= |\psi\rangle|\psi\rangle|M(\psi)\rangle \\ &= (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|M(\psi)\rangle \\ &= (\alpha^2|00\rangle + \alpha\beta(|01\rangle + |10\rangle) + \beta^2|11\rangle)|M(0+1)\rangle\end{aligned}\tag{1}$$

où $|M(\psi)\rangle$ est l'état final de la machine

- Montrons que U ne peut exister

$$U|0\rangle|R\rangle|M\rangle = |0\rangle|0\rangle|M(0)\rangle \quad U|1\rangle|R\rangle|M\rangle = |1\rangle|1\rangle|M(1)\rangle$$

En vertu de la linéarité de l'addition dans l'espace de Hilbert,

$$U|\psi\rangle|R\rangle|M\rangle = \alpha|0\rangle|0\rangle|M(0)\rangle + \beta|1\rangle|1\rangle|M(1)\rangle\tag{2}$$

qui est clairement différent de (1) que l'on souhaite obtenir



Distance de trace et fidélité I

- On dispose de deux instruments pour mesurer la **similarité** ou la **distinguabilité** entre deux états (copie approximative).
 - On considère dans la base $\{|u_i\rangle\}$ $\rho = \sum_i r_i |u_i\rangle\langle u_i|$ et $\sigma = \sum_i s_i |u_i\rangle\langle u_i|$
- La **distance de trace** (ou trace distance en anglais) entre ρ et σ est définie par

$$\delta(\rho, \sigma) = \frac{1}{2} \text{Tr} |\rho - \sigma| \quad |\rho| = \sqrt{\rho^\dagger \rho}$$

- **Exemple** : Si Alice prépare un système dans l'état ρ ou σ , chacun avec une probabilité $\frac{1}{2}$ et l'envoie à Bob qui doit faire la distinction entre les deux états. Avec une **mesure optimale**, Bob a la probabilité

$$\mathcal{P}_{max} = \frac{1}{2}(1 + \delta(\rho, \sigma))$$

d'identifier correctement dans quel état Alice a préparé le système

- $\delta(\rho, \sigma)$ est une **métrie** dans l'espace de Hilbert, si :



Distance de trace et fidélité II

| | |
|---|--|
| $\delta(\rho, \sigma) \geq 0$ | Non négative |
| $\delta(\rho, \sigma) = \delta(\sigma, \rho)$ | Symétrique |
| $\delta(U\rho U^\dagger, U\sigma U^\dagger) = \delta(\rho, \sigma)$ | Invariante sous les transfo unitaires |
| $\delta(\rho, \sigma) \leq \delta(\rho, \mu) + \delta(\mu, \sigma)$ | Vérifie l'inégalité triangulaire |
| $\delta(\rho, \sigma) = \sqrt{1 - \langle \psi \sigma \psi \rangle}$ | Si $\rho = \psi\rangle\langle\psi $ est un état pur |
| $\delta(\rho, \sigma) = \frac{1}{2} \text{Tr} \sum_i (r_i - s_i) u_i \rangle \langle u_i $ | Si $[\rho, \sigma] = 0$ |
| $\delta(\rho, \sigma) = \frac{1}{2} r - s $ | r et s vecteurs de Bloch de ρ et σ |



Distance de trace et fidélité III

- La **fidélité** mesure le recouvrement entre l'état d'entrée ρ et l'état de sortie σ et est définie par

$$F(\rho, \sigma) = \text{Tr} \left(\sqrt{\sqrt{\rho}\sigma\sqrt{\rho}} \right)$$

- Si $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ et $\sigma = |\phi\rangle\langle\phi|$ sont des états purs, alors $\rho^2 = \rho$ et $\sigma^2 = \sigma$, i.e., $\rho = \sqrt{\rho}$ et $\sigma = \sqrt{\sigma}$. Par conséquent,

$$\begin{aligned} F(\rho, \sigma) &= \text{Tr} \left(\sqrt{\sqrt{\rho}\sigma\sqrt{\rho}} \right) = \text{Tr} \sqrt{(|\psi\rangle\langle\psi|)(|\phi\rangle\langle\phi|)(|\psi\rangle\langle\psi|)} \\ &= \text{Tr} \sqrt{(|\langle\phi|\psi\rangle|^2)(|\psi\rangle\langle\psi|)} = |\langle\phi|\psi\rangle| \sqrt{\langle\psi|\psi\rangle} = |\langle\phi|\psi\rangle| \end{aligned}$$

- $F(\rho, \sigma)$ est une **pseudo-métrique dans l'espace de Hilbert** si :



Distance de trace et fidélité IV

| | |
|---|---|
| $0 \leq F(\rho, \sigma) \leq 1$ | $F(\rho, \rho) = 1$ et $F(\rho, \sigma) = 0$ s'il n'y a aucun recouvrement entre les deux états |
| $F(\rho, \sigma) = F(\sigma, \rho)$ | Symétrique |
| $F(U\rho U^\dagger, U\sigma U^\dagger) = F(\rho, \sigma)$ | Invariante sous les transformations unitaires |
| $F(\rho, \sigma) = \sum_i \sqrt{r_i s_i}$ | Si $[\rho, \sigma] = 0$ |
| $\mathcal{P}(\sigma \leftarrow \rho) = (F(\rho, \sigma))^2$ | Probabilité de transition de ρ vers σ |



Concurrence et intrication de formation I

- La **concurrence** mesure le recouvrement entre les états $|\psi\rangle$ et $|\bar{\psi}\rangle$ et est définie par

$$C(\psi) = |\langle\psi|\bar{\psi}\rangle|, \quad |\bar{\psi}\rangle = \mathbf{Y} \otimes \mathbf{Y}|\psi^*\rangle$$

- En fonction de l'opérateur statistique,

$$C(\rho) = \max\{0, \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4\}$$

$\lambda_i \equiv$ valeurs propres dans l'ordre décroissant de la matrice Hermitienne

$$\mathbf{R} = \sqrt{\sqrt{\rho}\tilde{\rho}\sqrt{\rho}} \quad \tilde{\rho} = \mathbf{Y} \otimes \mathbf{Y}\rho^*\mathbf{Y} \otimes \mathbf{Y}$$



Concurrence et intrication de formation II

- L'intrication de formation est la caractérisation mathématique des ressources nécessaires pour créer l'intrication

$$E(\rho) = H\left(\frac{1 + \sqrt{1 - C^2}}{2}\right) \quad \underbrace{H(x) = -x \log_2(x) - (1-x) \log_2(1-x)}_{\text{entropie de Shannon}}$$

- On note que $0 \leq E(\rho) \leq 1$ avec $E(\rho) = 1$ dans le cas d'un état maximalement intriqué et $E(\rho) = 0$ dans le cas d'un état séparable



1 Outils de l'information quantique

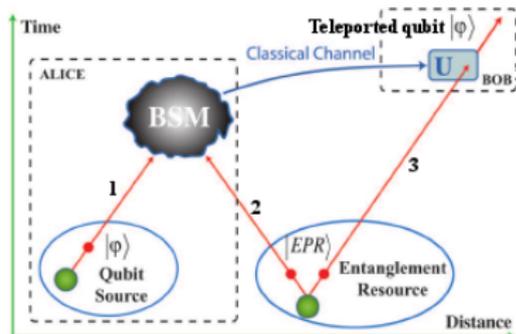
2 Fax quantique ou téléportation quantique



Fax quantique ou téléportation quantique I

Definition (Téléportation quantique)

La **téléportation quantique** est un protocole de communications quantiques consistant à **transférer l'état quantique** d'un système vers un autre système similaire et séparé spatialement du premier en mettant à profit l'intrication quantique



- Alice et Bob utilisent un canal EPR composé de $|B_{00}\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle_{23} + |11\rangle_{23})$, le qubit 2 est pris par Alice et le qubit 3 est pris par Bob
- Alice souhaite transmettre à Bob l'**information** sur l'état du qubit $|\varphi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1$ qui lui est *a priori* inconnu, *sans lui transmettre directement ce qubit*



Fax quantique ou téléportation quantique II

- Alice mesure l'état quantique de la nouvelle paire de qubits 1 et 2 (non intriqués) en utilisant la **base de Bell** constituée des états intriqués

$$|B_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \quad |B_{10}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) \quad (3)$$

$$|B_{01}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) \quad |B_{11}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) \quad (4)$$

- Dans la base de Bell, l'état des trois qubits est

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_{123} &= |\varphi\rangle_1 \otimes |B_{00}\rangle_{23} = (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)_1 \otimes |B_{00}\rangle_{23} \\ &= \frac{1}{2} [|B_{00}\rangle_{12} (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)_3 + |B_{10}\rangle_{12} (\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle)_3 \\ &\quad + |B_{01}\rangle_{12} (\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle)_3 + |B_{11}\rangle_{12} (\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)_3] \end{aligned} \quad (5)$$

$$|\psi\rangle_{123} = \frac{1}{2} \sum_{xy} |B_{xy}\rangle_{12} |\varphi_{xy}\rangle_3 \quad |\varphi_{xy}\rangle_3 = \alpha|y\rangle_3 + \beta(-1)^x|1-y\rangle_3 \quad (6)$$

La mesure par Alice de l'état intriqués $|B_{xy}\rangle_{12}$ projette $|\psi\rangle_{123}$ sur l'un des quatre états de Bell avec le $|\varphi_{xy}\rangle_3$ correspondant dans (5)



Fax quantique ou téléportation quantique III

| Résultat de la mesure de 12 | État préparé en 3 | probabilité | $U_{xy} = Z^x X^y$ |
|-----------------------------|------------------------------------|---------------|------------------------|
| $ B_{00}\rangle$ | $\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$ | $\frac{1}{4}$ | $Z^0 X^0 = \mathbb{I}$ |
| $ B_{10}\rangle$ | $\alpha 0\rangle - \beta 1\rangle$ | $\frac{1}{4}$ | $Z^1 X^0 = Z$ |
| $ B_{01}\rangle$ | $\alpha 1\rangle + \beta 0\rangle$ | $\frac{1}{4}$ | $Z^0 X^1 = X$ |
| $ B_{11}\rangle$ | $\alpha 1\rangle - \beta 0\rangle$ | $\frac{1}{4}$ | $Z^1 X^1 = ZX$ |

L'état du qubit d'Alice $|\varphi\rangle_1$ est téléporté sur le qubit de Bob $|\varphi\rangle_3$ avec une probabilité de 25%

- Alice transmet à Bob par un canal classique le résultat de sa mesure (mesure de Bell), et Bob sait que le qubit 3 lui arrive dans l'état inconnu de départ $|\varphi\rangle_1$, mais qui reste tout aussi inconnu ! L'état du qubit 1 a été téléporté, mais il n'y a jamais eu une mesure de cet état
- Si le résultat de la mesure d'Alice n'est pas $|B_{00}\rangle_{12}$, Bob en sait assez pour faire la correction en appliquant la transformation unitaire U convenable qui permet de ramener le qubit 3 dans l'état $|\varphi\rangle_1$.



Fax quantique ou téléportation quantique IV

- 1 A aucun moment, les coefficients α et β ne sont mesurés, et l'état $|\varphi\rangle_1$ est détruit au cours de la mesure effectuée par Alice. Il n'y a pas contradiction avec le Théorème de non-clonage
- 2 Bob ne connaît l'état $|\varphi\rangle_3$ que lorsqu'il a reçu le résultat de la mesure d'Alice. La transmission de cette information doit se faire par un canal classique, à une vitesse au plus égale à la vitesse de la lumière. Il n'a donc pas transfère instantanée de l'information à distance
- 3 Il y a jamais transport de la matière dans la téléportation

