

## Inégalités de Bell (version CSHS): implémentation sur une machine quantique d'IBMQ

Le but de ce projet est d'implémenter un test de des inégalités de CSHS (vues en cours) sur un device NISQ d'IBMQ. Dans un premier temps vous allez préparer des états de Bell. Dans un deuxième temps vous implémenterez le protocole des mesures faites par "Alice" et "Bob" puis calculerez le coefficient de corrélation de CHSH.

i) Vous pouvez créer vos circuits sur le "Composer" dans un premier temps et les tester d'abord sur le simulateur, puis faire l'expérience réelle.

ii) Ensuite vous pourrez créer des notebooks avec le langage Qiskit, simuler vos circuits avec le quasm simulator, faire l'expérience sur les machines.

**Tout d'abord:** Allez sur le site <https://www.ibm.com/quantum-computing/> et familiarisez vous avec les informations. Ensuite, inscrivez vous avec votre adresse email.

**Composer:** Vous pouvez utiliser directement le "Composer" pour créer des circuits, les simuler, puis faire les expériences.

**Qiskit:** familiarisez vous grâce aux nombreux tutoriels sur le site. *Pour utiliser les vraies machines avec Qiskit*, créez un "account" et générez un API token. Une fois le compte sauvé ("load account" et "save account" dans Qiskit) il n'y a plus besoin de régénérer un nouveau token à chaque fois. Vous pouvez utiliser le: simulateur, choisir une vraie machine avec une faible queue, ou sélectionner la machine "least busy" (voir commandes sur Qiskit).

**Etapes principales du projet: (à faire sur le Composer d'abord, puis avec le langage Qiskit).**

1) Créez un circuit à deux qubits avec input  $|00\rangle$  et output  $|B_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ . Faites des mesures les deux qubits (dans la base computationnelle) et obtenez des histogrammes. Familiarisez vous avec le résultat quand vous faites "1 shot", "1024 shots", etc... Observez les résultats sur le simulateur et sur les vraies machines.

2) Faites de même pour les 3 autres états de Bell. Observez que l'entrée du circuit est toujours  $|00\rangle$ . Vous devez donc ajouter des portes appropriées.

3) Maintenant reprenez le circuit qui prépare l'état de Bell. Le premier qubit est celui "d'Alice" et le second celui de "Bob." On rappelle le protocole expérimental pour tester l'inégalité de Bell:

- Mesures de type 1: A et B font  $N$  mesures dans les bases  $\{|\alpha\rangle, |\alpha_{\perp}\rangle\}$  et  $\{|\beta\rangle, |\beta_{\perp}\rangle\}$ .

- Mesures de type 2: A et B font  $N$  mesures dans les bases  $\{|\alpha\rangle, |\alpha_\perp\rangle\}$  et  $\{|\beta'\rangle, |\beta'_\perp\rangle\}$ .
- Mesures de type 3: A et B font  $N$  mesures dans les bases  $\{|\alpha'\rangle, |\alpha'_\perp\rangle\}$  et  $\{|\beta\rangle, |\beta_\perp\rangle\}$ .
- Mesures de type 4: A et B font  $N$  mesures dans les bases  $\{|\alpha'\rangle, |\alpha'_\perp\rangle\}$  et  $\{|\beta'\rangle, |\beta'_\perp\rangle\}$ .

Ils mettent en commun leur résultats puis calculent le coefficient de corrélation:

$$X_{CSHS} = \text{Moy}_1(ab) + \text{Moy}_2(ab') - \text{Moy}_3(a'b) + \text{Moy}_4(a'b')$$

où Moy est une *moyenne empirique*. Pour les angles optimaux suivant  $\alpha = 0$ ,  $\alpha' = -\frac{\pi}{4}$ ,  $\beta = \frac{\pi}{8}$ ,  $\beta' = -\frac{\pi}{8}$  la théorie prévoit que  $X_{CSHS}^{\text{theorie}} = 2\sqrt{2}$ .

**On veut tester ce résultat:**

- Créez 4 circuits qui implémentent les 4 types de mesures. Indication: Comme on ne peut faire des mesures que dans la base computationnelle  $\{|0\rangle, |1\rangle\}$  vous devez ajouter des portes quantiques, qui opèrent le changement de base, juste avant l'opération de mesure.
- Collectez les histogrammes pour  $N = 1024$  (ou  $N = 8192$ ) pour chaque circuit.
- En déduire  $X_{CSHS}^{\text{simulateur}}$  (sur le simulateur) et  $X_{CSHS}^{\text{experience}}$  (sur une vraie machine).

**Rendu du projet uniquement sur la question 3):**

1. Vous sauvez les circuits et histogrammes faits sur le composer en fichier pdf et indiquerez votre calcul et résultats pour  $X_{CSHS}^{\text{simulateur}}$  et  $X_{CSHS}^{\text{experience}}$ .
2. Vous rendrez aussi une copie pdf de votre notebook Qiskit avec les simulations et les résultats sur une vraie machine.
3. Le tout agrapé SVP !