Informatique quantique - travaux pratiques

Benoît Prieur

Informatique quantique - travaux pratiques

Majeure objets connectés, réseaux et services (M2)

ECE Paris, 30 octobre, 8 et 20 novembre 2019

Benoît Prieur - SOARTHEC -

Contexte

- Les éditions E.N.I, spécialiste de l'informatique et du développement logiciel.
- Offre cohérente et exhaustive entre autres en ce qui concerne Microsoft.
- Après WPF et C#, écriture d'un livre au sujet de la programmation Q#.
- Développement Microsoft .Net, Python (Flask, Django), à propos de Wikidata, OpenStreetMap etc.

Objectifs des sessions

- Manipuler avec deux environnements distincts et améliorer ses connaissances de certains langages :
  - **QISKit** d'IBM qui permet par ailleurs d'améliorer sa connaissance de la programmation Python notamment sur le version scientifique (*numpy*, *matplotlib*, *Jupyter*).
  - **Quantum computing** de Microsoft qui permet de découvrir le langage **Q#** et de programmer en **C#**.

Rappels des principales notions (1)

- La notion de bit quantique (qubit).
- Rappel de l'écriture *bracket* :

$$\alpha \cdot |0\rangle + \beta \cdot |1\rangle \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

$$\alpha \cdot |00\rangle + \beta \cdot |01\rangle + \gamma \cdot |10\rangle + \delta \cdot |11\rangle \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1$$

- La mesure quantique : de la physique quantique à la physique classique.

Rappels des principales notions (2)

- La superposition quantique.
- L'intrication quantique.
- Les **états de Bell** correspondent à l'intrication maximale. De manière classique, on implémente ces **états de Bell** comme première illustration quelque soit la plate-forme étudiée.

Rappels des principales notions (3)

- Circuit quantique composée de portes quantiques et se “termine” par une ou plusieurs mesures dont le résultat est transmis au programme classique.
- Dans le cas des **états de Bell** : le circuit quantique est composé d’une porte de Hadamard (H) et d’une porte CNOT.

Qiskit, framework open-source d'informatique quantique

- Une initiative d'IBM Research.
- Permet d'exécuter des programmes quantiques sur des prototypes/simulateurs en ligne.
- Disponible sur les trois OS ; forte utilisation de Python.

Notion d'environnement virtuel en Python

- Création d'un environnement comprenant une certaine version de Python et les versions des librairies.
- Exemples de systèmes d'environnements virtuels : *venv*, *virtualenv* etc.
- Ici environnement virtuel *conda*.

Qiskit, installation

- Le lien d'installation : https://qiskit.org/documentation/install.html
- Installer préalablement *Anaconda* pour bénéficier d'un environnement virtuel de type *conda*.
- Des fichiers de distribution *C++* à installer avec Windows.
- Avec des IDE type *Pycharm*, bien sélectionner l'environnement virtuel *conda*

Création d'un compte IBM Quantum Computing

- Se rendre à cette url : https://quantum-computing.ibm.com/login
- Permet de générer un jeton (*token*) indispensable à l'exécution de la simulation en local.
- Possibilité de créer un notebook Jupyter (Data science) https://quantum-computing.ibm.com/jupyter
    - Exemple d'un notebook Jupyter (dans un autre contexte)

Récapitulatif succinct

QISKit c'est :

- Environnement de programmation quantique sur simulateur ou sur plate-forme réelle (plusieurs essais disponibles).
- Langage **Python**, mais possibilité d'utiliser **Swift** et **JavaScript**.
- Forte connexion à Jupyter, les exemples sont d'ailleurs souvent présentés ainsi.

Qiskit (local), affichage de la version

```
import qiskit

from qiskit import IBMQ

IBMQ.save_account('TOKEN')

print(qiskit.__version__)
```

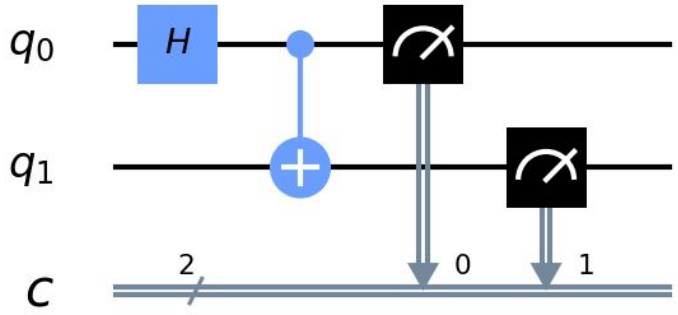
```
>> 0.10.0
```

```
qiskit.__qiskit_version__
```

```
{'qiskit-terra': '0.10.0',
'qiskit-aer': '0.3.2',
'qiskit-ignis': '0.2.0',
'qiskit-ibmq-provider':
'0.3.3', 'qiskit-aqua': '0.6.1',
'qiskit': '0.13.0'}
```

QISKit (local) : états de Bell (1)

- Circuit à deux bits quantiques impliquant une porte de Hadamard (H) et une porte CNOT ; on s'intéresse au résultat de la mesure.



QISKit (local) : états de Bell (2)

L'approche **QISKit** :

- Construction du circuit quantique.
- Exécution du programme quantique.
- Analyse des données issues de la mesure.

Le code de l'exemple est en ligne ici.

QISKit (local) : états de Bell (3)

On commence par l'**import des packages** ; on importe numpy et on déclare le simulateur qui va chercher une solution (Aer).

```
import numpy as np
from qiskit import(
  QuantumCircuit,
  execute,
  Aer)
from qiskit.visualization import plot_histogram
```

QISKit (local) : états de Bell (4)

On poursuit par l'**initialisation des variables** ; on veut pour rappel un circuit à deux bits quantiques avec deux lignes de mesure quantique (relatives à la physique classique donc).

```
circuit = QuantumCircuit(2, 2)
```

QISKit (local) : exemple de circuit quantique (5)

On passe à la création du circuit quantique :

```
circuit.h(0)

circuit.cx(0, 1)

circuit.measure([0,1], [0,1])
```

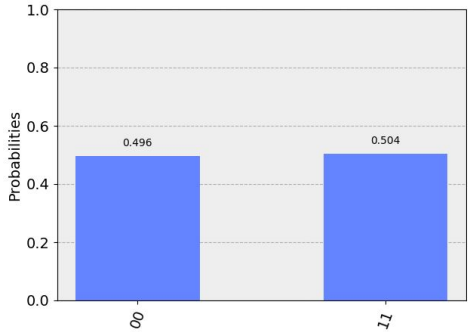
QISKit (local) : exemple de circuit quantique (6)

On exécute notre circuit quantique :

```
simulator = Aer.get_backend('qasm_simulator')
job = execute(circuit, simulator, shots=1000)
result = job.result()
counts = result.get_counts(circuit)
print("\nTotal count for 00 and 11 are:",counts)
```

QISKit (local) : états de Bell (7)

- Exploitation des résultats ; *Numpy* et *Matplotlib* permettent une exploitation visuelle immédiate (gros point fort / Microsoft).



Organisation de QisKit (1)

- **Terra** : ce qu'on a utilisé ici. Permet de définir des circuits quantiques et de les simuler.
- **Aqua** : fournit des outils qui peuvent être utilisés sans aucune programmation quantique explicite. Des sujets comme la finance, l'IA etc.
- **Aer** : contient un set de petits simulateurs quantiques.
- **Ignis** : contient des ressources pour caractériser le bruit et évaluer les erreurs relatives à une simulation donnée.

Organisation de QisKit (2)

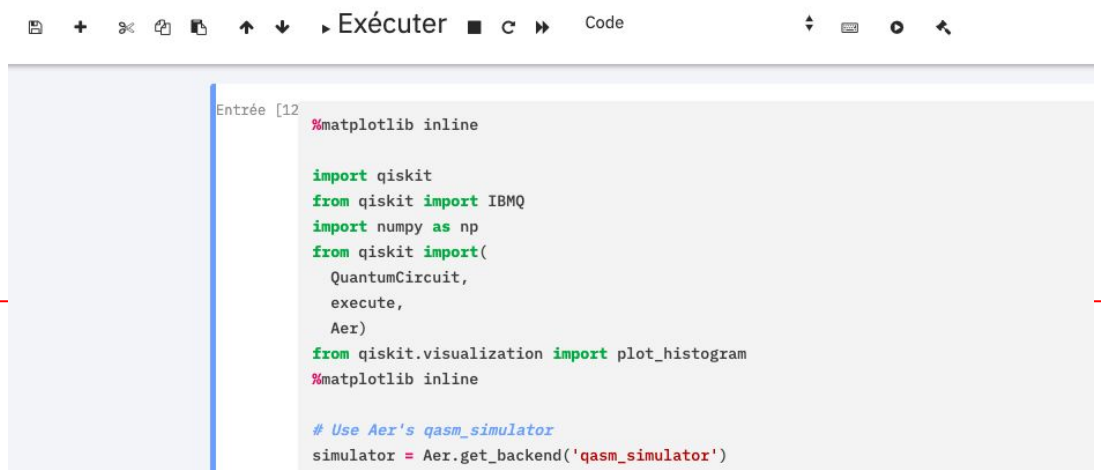
- Notebooks Jupyter organisé selon Terra, Aer, etc. https://nbviewer.jupyter.org/github/Qiskit/qiskit-tutorials/blob/master/qiskit/1_start_here.ipynb
- Le Github de QisKit : https://github.com/Qiskit/

QISKit (online) : Circuit Composer

- Version graphique qui propose la construction du circuit quantique en faisant glisser les différentes portes quantiques sur le circuit.

QISKit (online) : notebook Jupyter

- Utiliser la directive **%matplotlib inline**
- Rappels sur Jupyter



QISKit (online) : notebook Jupyter - code états de Bell

- Le code est ici : https://github.com/benprieur/QISKit/blob/master/Bell%20State%20for%20Jupyter.py
- Le notebook Jupyter sur Github : https://github.com/benprieur/QISKit/blob/master/BELL.ipynb
- Vous créer un Github pour stocker vos notebooks.

QISKit (Jupyter) : téléportation quantique

- Alice veut transmettre $\psi\rangle = \alpha \mid 0\rangle + \beta \mid 1\rangle$ à Bob.
- On veut transmettre alpha et Bêta et non pas le résultat d'une mesure.
- La copie d'un état quantique est impossible.

Qiskit (Jupyter) : téléportation (1)

- On commence par créer deux qubits intriqués selon les états de Bell.
- Alice possède q1 et Bob q2. Elle possède également $|\psi\rangle$ le qubit qu'elle tente de transmettre à Bob.
- Alice applique une porte CNOT sur $q1$.
- Alice applique une porte de Hadamard à $|\psi\rangle$. Elle mesure $q1$ et $|\psi\rangle$.

Qiskit (Jupyter) : téléportation (2)

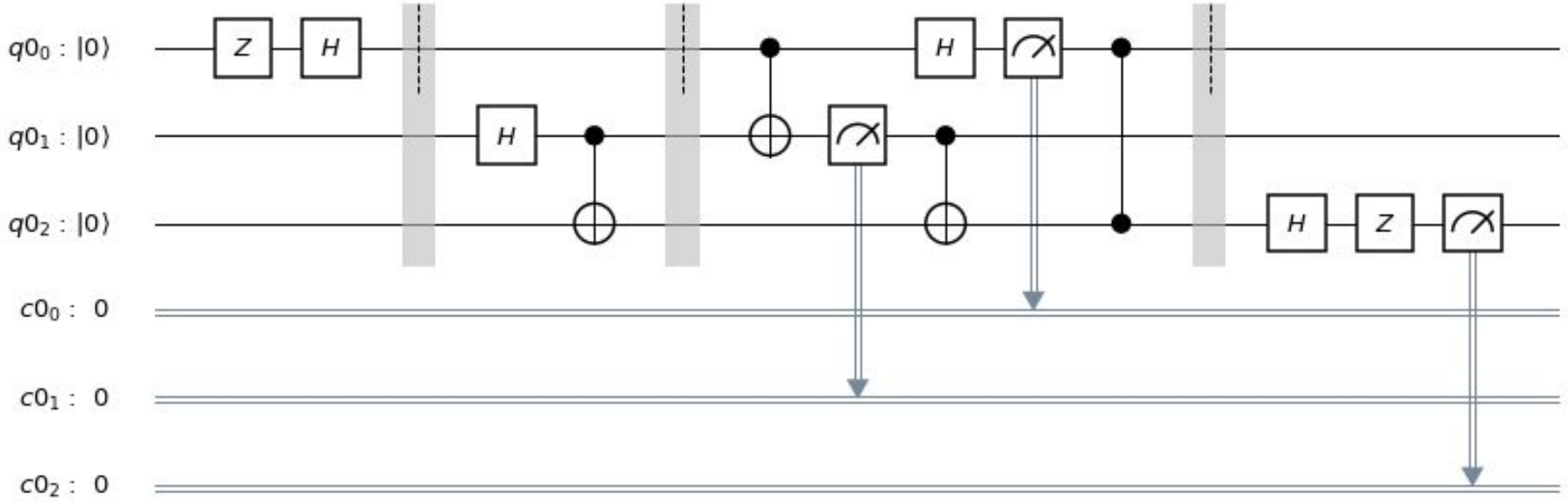
- Alice appelle Bob (de manière classique) :
  - Si elle lui dit 00 → ne rien faire
  - Si elle lui dit 01 → X
  - Si elle lui dit 10 → Z
  - Si elle lui dit 11 → ZX

$|\psi\rangle$ s'est téléporté de A à B.

Qiskit (Jupyter) : téléportation (3) ; simulateur

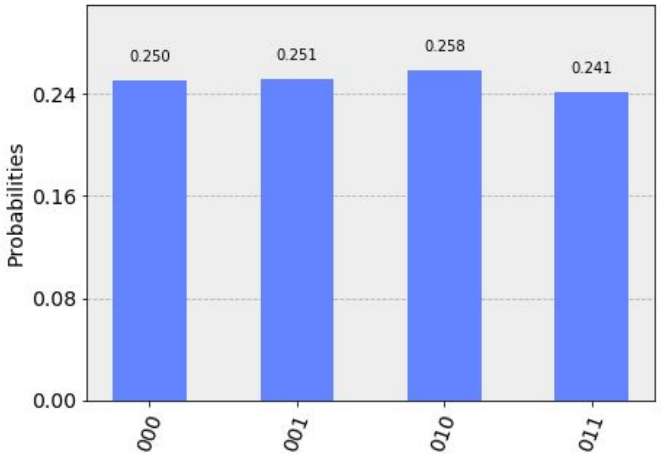
- Le premier code de téléportation est ici : https://github.com/benprieur/QISKit/blob/master/teleportation_1.py
- Le notebook associé est là : https://github.com/benprieur/QISKit/blob/master/Te%CC%81le%CC%81portation%20(1).ipynb (problème d'affichage sur Github)

Qiskit (Jupyter) : téléportation (4) ; schéma



Qiskit (Jupyter) : téléportation (5) ; simulateur

```
{'001': 257, '011': 247, '010': 264, '000': 256}
```

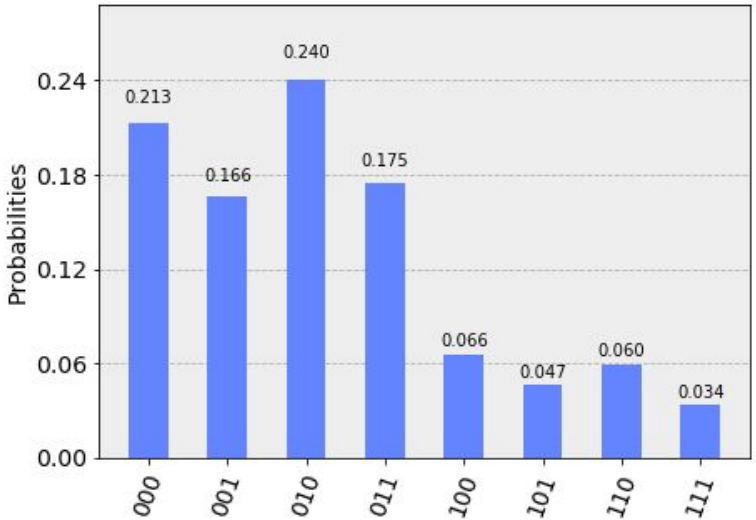


Qiskit (Jupyter) : téléportation (4) ; réel

- Le code de la simulation réelle est ici : https://github.com/benprieur/QISKit/blob/master/teleportation_2.py
- Notebook : https://github.com/benprieur/QISKit/blob/master/Te%CC%81le%CC%81portation%202%20(re%CC%81el).ipynb

Qiskit (Jupyter) : téléportation (5) ; réel

```
{'010': 1966, '110': 489, '100': 541, '101': 384, '000': 1741, '001': 1359, '111': 278, '011': 1434}
```



Microsoft Quantum Development Kit (1)

- Décembre 2017.
- Bibliothèque standard Q# qui inclut tous les aspects du langage, en particulier un compilateur.
- Simulateur de machine quantique exécutable sur la machine locale et pilotable grâce au langage Q#.
- “Pilotage” depuis le code C#.

Microsoft Quantum Development Kit (2) - installation

- Procédure avec VSCode : lien
- Installer *Microsoft Quantum Development Kit for Visual Studio Code* depuis le Market Place (lien) ; installation automatique d'*OmniSharp*

Microsoft Quantum Development Kit (3) - récupérer les exemples et la documentation

- https://github.com/microsoft/Quantum
- Installer git et obtenir les projets de tests :

git clone https://github.com/microsoft/Quantum

Microsoft Quantum Development Kit (4) - principes

- Host.cs (pilotage C Sharp)
- Programme quantique lui-même extension .qs (Q Sharp)
- Test de la version locale avec l'algorithme de téléportation : https://github.com/microsoft/Quantum/tree/master/samples/getting-started/teleportation

Microsoft Quantum Development Kit (5) - commentaire des états de Bell en Q#

- Code à commenter : lien
- Comparer les résultats obtenus au sujet des états de Bell entre QisKit et Microsoft Quantum

Typologie des problèmes (1)

- Comparaison théorique des algorithmes.
- Quantifier la performance d'un algorithme en fonction des données d'entrée : la **complexité**

Complexité des algorithmes (1)

- Notation de Landau “O” (grand O de quelque chose)
- Exemple simple d’un parcours d’un tableau à une dimension : complexité en O(n)
- Tableau à deux dimensions : O(n*n) ;
- Complexité polynomiale (*vs* exponentielle)

Complexité des algorithmes (2)

- Déterminer une complexité : exemple de la dichotomie

On recherche 73 entre 1 et 100 :

On teste 50, puis on étudie l'intervalle [51, 100]
On teste 75, puis on étudie l'intervalle (50, 74]
On teste 62, puis on étudie l'intervalle [63, 74]
On teste 62, puis on étudie l'intervalle [63, 74]
On teste 68, puis on étudie l'intervalle [69, 74]
On teste 72, puis on étudie l'intervalle [73, 74]
On teste 73 et on obtient le résultat en sept itérations.

Complexité des algorithmes (3)

- 1 *(échantillon final)* <= n *(échantillon initial)* / 2 exp k, *avec k nombre d'itérations*
- On applique la fonction log à gauche et à droite
- On obtient k <= log (n) / log (2)

On en déduit que la complexité est en O (log(n))

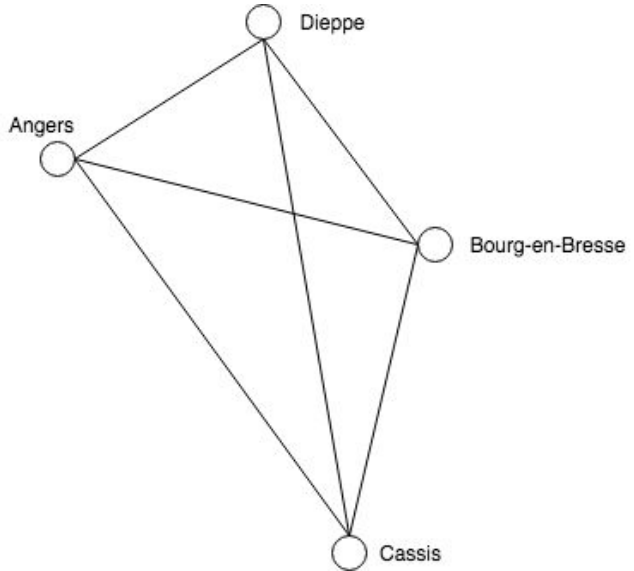
Complexité des algorithmes (4)

- Exemple du problème du voyageur de commerce
- (factorielle de (n - 1)) / 2 *chemins différents*

  Angers – Dieppe – Bourg-en-Bresse – Cassis

  Angers – Bourg-en-Bresse – Cassis - Dieppe

  Angers – Cassis – Dieppe – Bourg-en-Bresse



Complexité des algorithmes (5)

Défi à l'informatique classique et intérêt futur de l'informatique quantique

- 20 villes => 6.082255 . 10^16
  - 6.082255 . 10^16 ⇔ 2 exp k => k = **55 qubits**
  - 55 qubits à mettre en perspective avec l'expérience de Google

Complexité des algorithmes (6)

La **classe P** représente la classe des problèmes qui peuvent être résolus (ou « décidés ») par une **machine de Turing** (c'est-à-dire une sorte d'ordinateur déterministe) en un temps polynomial par rapport à la taille des données en entrée. De tels problèmes voient leurs solutions obtenues en un **temps polynomial**.

La **classe NP** représente de son côté un problème décidable en un temps polynomial par une machine de Turing non-déterministe. Plus prosaïquement cela signifie que l'on peut vérifier en un temps polynomial, c'est-à-dire « rapidement » qu'une solution proposée est bien solution du problème considéré.

Complexité des algorithmes (7)

Si un problème A est de classe P il peut être résolu en un temps polynomial. Cela signifie intuitivement que l'on n'aura aucun mal si on fournit une solution éventuelle à la vérifier en un temps polynomial. Il est donc également de classe NP. Plus généralement on a donc **P ⊂ NP** qui se lit comme « la classe P est incluse dans la classe NP ».

Un problème moderne qui se pose est la question de l'inclusion de NP dans P qui si cela est vrai (ce n'est très probablement pas le cas) => P = NP ?

Le fait de démontrer que P est égal ou non à NP constitue un des **problèmes du millénaire** qui est nommé « **conjecture du siècle** ». C'est un des problèmes majeurs et non résolus de l'informatique.

Complexité des algorithmes (8) - NP-Complet

Deux conditions :

- Il appartient à la classe NP (on vérifie en un temps polynomial une de ses solutions éventuelles) ;
- Tous les problèmes NP sont réductibles en ce problème par une réduction polynomiale. C'est-à-dire que si on résout ce problème on résout tous les autres.

Deux exemples de problèmes NP-Complets : le **problème du voyageur de commerce** et le **problème du sac à dos**.

Suprématie quantique (1)

- La **suprématie quantique** correspond au nombre de qubits au-delà duquel aucun superordinateur classique n'est capable de simuler son équivalent quantique (en un temps raisonnable), pour un problème donné.
- Annonce de **Google** en 2019.
- Vidéo officielle => https://www.youtube.com/watch?v=-ZNEzzDcllU

Suprématie quantique (2)

Vidéo de la chaîne “Sciences étonnantes” :
https://www.youtube.com/watch?v=KaRd_eB2qOA

Me contacter

- Formulaire de contact sur le site de Soarthec
- Twitter : benprieur