

Méthodes mathématiques de la théorie quantique - 2022

Bases de l'Information quantique - Day 3

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 Généralités et notion de calculateur
- 2 Portes single-qubit
- 3 Portes de contrôle
- 4 Portes quantiques universelles



1 Généralités et notion de calculateur

2 Portes single-qubit

3 Portes de contrôle

4 Portes quantiques universelles



Généralités et notion de calculateur

Calculateur classique

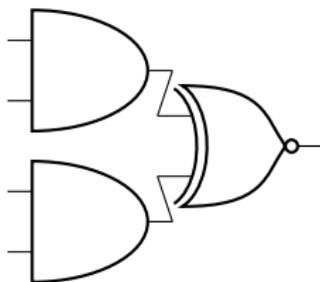
Definition (Calculateur classique)

Un état de n bits d'un calculateur classique ou registre classique de taille n , ne peut stocker, en instant donné, qu'un seul entier $i \in [0, 2^n - 1]$, correspondant à 2^n configurations, décrit en notation binaire par

$$i = i_{n-1}2^{n-1} + \dots + i_12^1 + i_02^0 = \sum_{m=0}^{n-1} i_m2^m \quad i_m \in [0, 1]$$

Exemple : 3 bits physiques $\Rightarrow 2^3 = 8$ configurations différentes (0 à 7 en binaire)

000 \equiv 0 001 \equiv 1 010 \equiv 2 011 \equiv 3 100 \equiv 4 101 \equiv 5 110 \equiv 6 111 \equiv 7



Exemple de circuit logique classique (2 portes AND et 1 porte XNOR)



Principe de Landauer (dissipation de la chaleur)



Chaque fois qu'un bit d'information est effacé, son entropie augmente d'au moins $k_B \ln 2$ et la quantité d'énergie dissipée dans l'environnement (circuit) vaut au moins $k_B T \ln 2$, T étant la température absolue de l'environnement.

Theorem (Théorème de Margolus-Levitin)

La vitesse ou le nombre d'opérations effectuées dans un temps donné, à laquelle toute machine ou tout autre procédé réalisable permettant de calculer, et utilisant une quantité d'énergie E donnée, ne peut pas être supérieur à 6×10^{33} opérations par seconde par joule d'énergie.

- Le Théorème de Margolus-Levitin, tout comme le Principe de Landauer, constitue une limite fondamentale à la **loi de Koomey** selon laquelle **le nombre de calculs, pour une quantité d'énergie dépensée donnée, double tous les 18 mois**

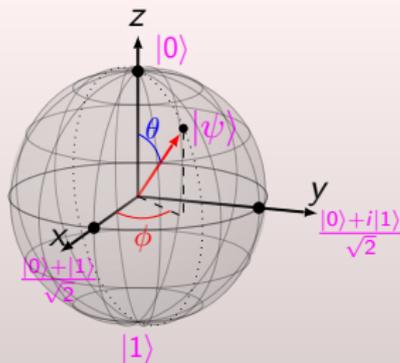


Definition (Bit quantique ou qubit)

Le **qubit** est l'unité de traitement de l'information quantique.

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C} \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

Qubit sur la sphere de Bloch



- Pour $0 \leq \theta \leq \pi$ et $0 \leq \phi < 2\pi$,
 $|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$
- Pour $\theta = 0$ et ϕ , $|\psi\rangle = |0\rangle$
- Pour $\theta = \pi$ et ϕ , $|\psi\rangle = |1\rangle$
- Pour $\theta = \frac{\pi}{2}$ et $\phi = 0$, $|\psi\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$
- Pour $\theta = \frac{\pi}{2}$ et $\phi = \frac{\pi}{2}$, $|\psi\rangle = \frac{|0\rangle + i|1\rangle}{\sqrt{2}}$



Definition (Calculateur quantique)

Un **calculateur quantique** est une collection de n **qubits** qui représente un **registre quantique** de taille n

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= \sum_{i=0}^{2^n-1} c_i |i\rangle = \sum_{i_{n-1}=0}^1 \cdots \sum_{i_1=0}^1 \sum_{i_0=0}^1 c_{i_{n-1}, \dots, i_1, i_0} |i_{n-1}\rangle \otimes \cdots \otimes |i_1\rangle \otimes |i_0\rangle \\ &= \sum_{i_{n-1}, \dots, i_1, i_0=0}^1 c_{i_{n-1}, \dots, i_1, i_0} |i_{n-1} \cdots i_1 i_0\rangle \quad \sum_{i=0}^{2^n-1} |c_i|^2 = 1 \end{aligned}$$

- **Parallélisme quantique.** Grâce à la superposition d'états, un registre quantique de n qubits peut stocker 2^n nombres et effectuer en parallèle un grand nombre d'opérations simultanément
- Exemple : Pour $n = 2$, un état générique de 2-qubits s'écrit

$$|\psi\rangle = c_0 |0\rangle + c_1 |1\rangle + c_2 |2\rangle + c_3 |3\rangle = c_{00} |00\rangle + c_{01} |01\rangle + c_{10} |10\rangle + c_{11} |11\rangle$$



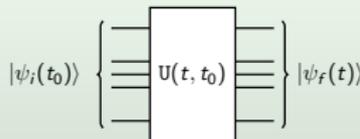
Généralités et notion de calculateur

Principe du calcul quantique

- $i \in \{0, 1\}^n$ est une chaîne binaire de taille $n \Rightarrow |i\rangle \in \mathcal{H}^{\otimes n}$ (2^n dim)

Principe d'un calcul quantique

- 1 Préparation de n qubits dans l'état $|\psi_i(t_0)\rangle$
- 2 Implémentation de la transformation unitaire désirée ou souhaitée $U(t, t_0)$,
 $|\psi_f(t)\rangle = U(t, t_0) |\psi_i(t_0)\rangle$
- 3 Mesure sur les n qubits afin d'obtenir $|\psi_f(t)\rangle$



- L'évolution unitaire $U(t, t_0)$ est réversible : connaissant le vecteur d'état au temps t , on peut remonter à celui au temps t_0 par $U^{-1}(t, t_0) = U(t_0, t)$

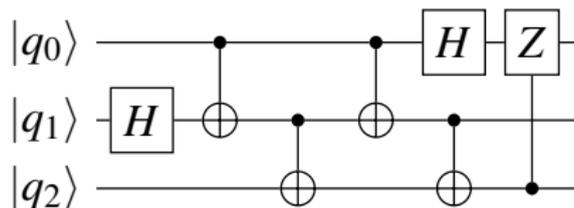
Calcul quantique \equiv évolution quantique réversible \Rightarrow dissipation de chaleur



Généralités et notion de calculateur

Éléments d'un circuit quantique

- **Porte logique quantique** : dispositif qui réalise une opération unitaire fixe sur un qubit donné, pendant une période de temps donnée
- **Réseau ou circuit quantique** : dispositif constitué de portes logiques quantiques dont les séquences de calculs sont synchronisées dans le temps
- **Taille du circuit** : nombre de portes logiques quantiques du réseau
- **Largeur du circuit** : nombre de fils du réseau



Circuit quantique de 7 portes logiques et de taille 3



1 Généralités et notion de calculateur

2 Portes single-qubit

3 Portes de contrôle

4 Portes quantiques universelles



Portes single-qubit

Portes unitaires single-qubit les plus usuelles

Porte	Diagramme	Matrice dans $\{ 0\rangle, 1\rangle\}$
Pauli X	$ k\rangle \longrightarrow \boxed{X} \longrightarrow 1-k\rangle$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
Pauli Y	$ k\rangle \longrightarrow \boxed{Y} \longrightarrow i(-1)^k 1-k\rangle$	$\begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$
Pauli Z	$ k\rangle \longrightarrow \boxed{Z} \longrightarrow (-1)^k k\rangle$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
Walsh-Hadamard W	$ k\rangle \longrightarrow \boxed{W} \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} [(-1)^k k\rangle + 1-k\rangle]$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$
Phase-Shift	$ k\rangle \longrightarrow \overset{\delta}{\bullet} \longrightarrow e^{ik\delta} k\rangle$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix}$
Phase	$ k\rangle \longrightarrow \boxed{S} \longrightarrow (i)^k k\rangle$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$
$\frac{\pi}{8}$	$ k\rangle \longrightarrow \boxed{T} \longrightarrow e^{ik\pi/4} k\rangle$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{pmatrix}$
square root NOT	$ k\rangle \longrightarrow \boxed{\sqrt{X}} \longrightarrow \frac{1+i}{2} [k\rangle - i 1-k\rangle]$	$\frac{1+i}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix}$



Portes single-qubit I

Porte Walsh-Hadamard W

Definition (Porte de Walsh-Hadamard W)

La **porte de Walsh-Hadamard** définie par la matrice

$$W = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

permet de transformer les états de base $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ en état superposés

$$W|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$W|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

$$W|k\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}((-1)^k |k\rangle + |1-k\rangle)$$

$$|k\rangle \xrightarrow{W} \frac{1}{\sqrt{2}}((-1)^k |k\rangle + |1-k\rangle)$$



Portes single-qubit II

Porte Walsh-Hadamard W

- La porte W permet d'implémenter le **parallélisme quantique** à l'origine de l'**accélération exponentielle** d'un calcul quantique pour la résolution de certains problèmes

$$|0\rangle^{\otimes 3} \left\{ \begin{array}{c} \text{---} \boxed{W} \text{---} \\ \text{---} \boxed{W} \text{---} \\ \text{---} \boxed{W} \text{---} \end{array} \right\} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \right)^{\otimes 3} = \frac{1}{\sqrt{2^3}}(|0\rangle + |1\rangle + |2\rangle + |3\rangle + |4\rangle + |5\rangle + |6\rangle + |7\rangle)$$

- Si initialement on a un registre de taille n dans un état $y \in \{0, 1\}^n$, alors

$$W^{\otimes n} |y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} (-1)^{y \cdot x} |x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} e^{i\pi y \cdot x} |x\rangle$$

où le produit de $y = (y_{n-1}y_{n-2} \cdots y_1y_0)$ et de $x = (x_{n-1}x_{n-2} \cdots x_1x_0)$ est fait bit par bit

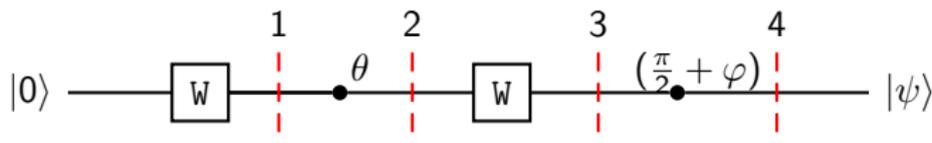
$$y \cdot x = (y_{n-1}x_{n-1} + y_{n-2}x_{n-2} + \cdots + y_1x_1 + y_0x_0)$$



Portes single-qubit I

Implémentation du 1-qubit générique

Les portes W et $P(\delta)$ suffisent pour construire toute opération unitaire sur un 1-qubit



- Il est à noter que le diagramme se lit de gauche à droite alors que le produit d'opérateurs se lit de droite à gauche



Portes single-qubit II

Implémentation du 1-qubit générique

- Ce circuit quantique s'écrit vectoriellement sous la forme

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= \underbrace{P\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}_4 \underbrace{W}_3 \underbrace{P(\theta)W}_2 \underbrace{|0\rangle}_1 \\ &\stackrel{1}{=} \underbrace{P\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}_4 \underbrace{W}_3 \underbrace{P(\theta)}_2 \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \\ &\stackrel{2}{=} \underbrace{P\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}_4 \underbrace{W}_3 \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{i\theta}|1\rangle) = \underbrace{P\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}_4 \underbrace{W}_3 \frac{e^{i\frac{\theta}{2}}}{\sqrt{2}}(e^{-i\frac{\theta}{2}}|0\rangle + e^{i\frac{\theta}{2}}|1\rangle) \\ &\stackrel{3}{=} \underbrace{P\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}_4 \frac{e^{i\frac{\theta}{2}}}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) + e^{i\frac{\theta}{2}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) \\ &= \underbrace{P\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)}_4 e^{i\frac{\theta}{2}} \left(\cos \frac{\theta}{2} |0\rangle - i \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle \right) \\ &\stackrel{4}{=} e^{i\frac{\theta}{2}} \left(\cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle \right) \equiv \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle \end{aligned}$$



1 Généralités et notion de calculateur

2 Portes single-qubit

3 Portes de contrôle

4 Portes quantiques universelles



Portes de contrôle I

Porte Controlled-U ou CU

- Les portes **CU** sont des **portes de contrôle** U qui traduisent quantiquement $\text{if } (x) \text{ then } y \leftarrow U^x y$ par

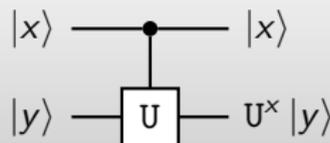
$$|x\rangle |y\rangle \mapsto |x\rangle U^x |y\rangle$$

qui correspond, pour $x, y \in \{0, 1\}$, à

$$|0\rangle |0\rangle \rightarrow |0\rangle |0\rangle \quad |0\rangle |1\rangle \rightarrow |0\rangle |1\rangle \quad |1\rangle |0\rangle \rightarrow |1\rangle U |0\rangle \quad |1\rangle |1\rangle \rightarrow |1\rangle U |1\rangle$$

Dans la base $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$, où I , U et U sont des matrices 2×2

$$CU = |0\rangle \langle 0| \otimes I + |1\rangle \langle 1| \otimes U = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & U \end{pmatrix}$$



Portes de contrôle II

Porte Controlled-U ou CU

- Le 1er bit $|x\rangle$ agit comme **contrôle** et sa valeur reste inchangée à la sortie. Le 2e bit $|y\rangle$ est appelé **cible**. Sur le diagramme, le contrôle est représenté le point noir

Une porte CU applique

- la transformation identité \mathbb{I} au bit cible lorsque le bit de contrôle est dans l'état $|0\rangle$
- la transformation U au bit cible lorsque le bit de contrôle est dans l'état $|1\rangle$
- Puisque pour $x \in \{0, 1\}$, $U^{2^x} = \mathbb{I}$ et les **opérateurs CU sont unitaires**
- Pour une transformation unitaire quelconque $U : (x, y) \rightarrow (x, y \oplus f(x))$, on a

$$|\psi\rangle = \text{CU}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|0\rangle = \alpha|0f(0)\rangle + \beta|1f(1)\rangle$$

qui contient **à la fois** l'information sur $f(0)$ et sur $f(1)$



Portes de contrôle I

Porte CNOT

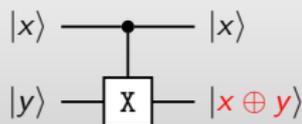
Definition (Porte CNOT)

CNOT ou CX est la plus populaire des portes CU

$$CX = |0\rangle\langle 0| \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes X = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

qui inverse le bit cible $|y\rangle$ lorsque le bit de contrôle $|x\rangle \equiv |1\rangle$

$$CX|x\rangle|y\rangle = |x\rangle|x \oplus y\rangle$$



x	y	x	$x \oplus y$
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0



Portes de contrôle II

Porte CNOT

- On note sur la table de vérité que lorsque la cible $|y\rangle \equiv |0\rangle$ la porte CX devient la porte COPY (clonage de $|x\rangle$) : $|x\rangle |0\rangle \mapsto |x\rangle |x\rangle$, $x \in \{0, 1\}$

$$CX(\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle) |0\rangle = \alpha |00\rangle + \beta |11\rangle$$

qui est non factorisable pour $\alpha, \beta \neq 0$.

La porte CNOT génère des états intriqués

Theorem

Toute opération unitaire sur $\mathcal{H}^{\otimes n}$ peut se décomposer en produit d'opérations unitaires single qubit (1-qubit) et de CNOT.

- Nous utiliserons la notation abrégée $CU_{[ij]}$ pour indiquer que le qubits i est le contrôle et le qubits j la cible. Par exemple,

$$CX_{[12]} |xy\rangle = CX |xy\rangle = |x\rangle |x \oplus y\rangle \quad CX_{[21]} |xy\rangle = |x \oplus y\rangle |y\rangle$$



Portes de contrôle III

Porte CNOT

- Ainsi, les trois autres matrices CNOT sont, pour $P_0 = |0\rangle\langle 0|$ et $P_1 = |1\rangle\langle 1|$

$CX_{[12]}^- = P_0 \otimes X + P_1 \otimes \mathbb{I}$	$CX_{[21]} = X \otimes P_1 + \mathbb{I} \otimes P_0$	$CX_{[21]}^- = \mathbb{I} \otimes P_1 + X \otimes P_0$
$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$CX_{[12]}^-$ inverse le 2e qubit lorsque le 1er est dans l'état $ 0\rangle$	$CX_{[21]}$ inverse le 1er qubit lorsque le 2e est dans l'état $ 1\rangle$	$CX_{[21]}^{-1}$ inverse le 1er qubit lorsque le 2e est dans l'état $ 0\rangle$

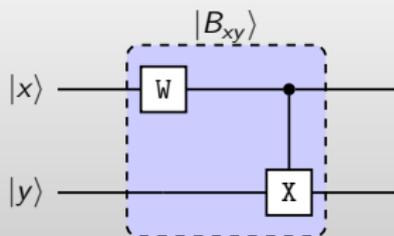
- **cerle noir** = opération de contrôle positif ou qubit cible inversé lorsque le contrôle est $|1\rangle$
- **cerle vide** = opération de contrôle négatif ou qubit cible inversé lorsque le contrôle est $|0\rangle$



Portes de contrôle

Génération des états de Bell - États maximalement intriqués

- Circuit générant les états intriqués de Bell



$$\begin{aligned} |B_{xy}\rangle &= CX(W \otimes I) |xy\rangle \quad x, y \in \{0, 1\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|0y\rangle + (-1)^x |1(1-y)\rangle) \end{aligned}$$

- Ainsi,

$$\begin{aligned} |00\rangle \rightarrow |B_{00}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) & |10\rangle \rightarrow |B_{10}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle) \\ |01\rangle \rightarrow |B_{01}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle) & |11\rangle \rightarrow |B_{11}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle) \end{aligned}$$



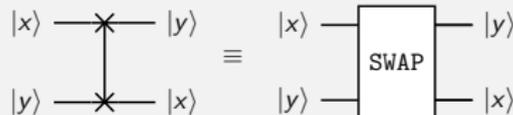
Portes de contrôle

Porte SWAP

Definition (Porte SWAP)

La porte **SWAP** permute ou intervertit deux qubits

$$\text{SWAP} = \text{CXCX}_{[21]}\text{CX} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



- Par exemple, pour $|\psi\rangle = (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle)$ et $|\phi\rangle = (\delta |0\rangle + \gamma |1\rangle)$ on a

$$\begin{aligned} \text{CXCX}_{[21]}\text{CX} |\psi\rangle |\phi\rangle &= \text{CXCX}_{[21]}\text{CX}(\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle)(\delta |0\rangle + \gamma |1\rangle) \\ &= \text{CXCX}_{[21]}(\alpha\delta |00\rangle + \alpha\gamma |01\rangle + \beta\delta |11\rangle + \beta\gamma |10\rangle) \\ &= \text{CX}(\alpha\delta |00\rangle + \alpha\gamma |11\rangle + \beta\delta |01\rangle + \beta\gamma |10\rangle) \\ &= (\alpha\delta |00\rangle + \alpha\gamma |10\rangle + \beta\delta |01\rangle + \beta\gamma |11\rangle) \\ &= \delta |0\rangle (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle) + \gamma |1\rangle (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle) \\ &= |\phi\rangle |\psi\rangle \end{aligned}$$



1 Généralités et notion de calculateur

2 Portes single-qubit

3 Portes de contrôle

4 Portes quantiques universelles

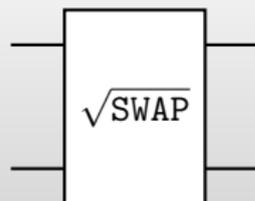


Portes quantiques universelles

Porte $\sqrt{\text{SWAP}}$

- Les portes universelles facilitent l'intégration à partir de portes pré-caractérisées
- Comme n'importe quelle fonction peut être synthétisée à l'aide des CNOT et 1-qubits W , $P(\delta)$: (CNOT, W , $P(\delta)$) forme un ensemble infini de portes quantiques universelles
- La porte $\sqrt{\text{SWAP}}$ qui effectue la moitié des chemins de deux qubits swap est universelle : n'importe quelle porte logique quantique peut être construite à partir de seulement la porte $\sqrt{\text{SWAP}}$, et des portes 1-qubit

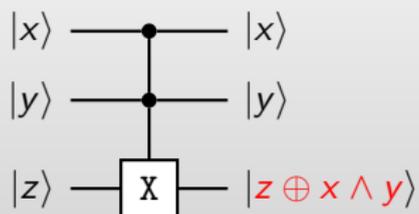
$$\sqrt{\text{SWAP}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(1+i) & \frac{1}{2}(1-i) & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(1-i) & \frac{1}{2}(1+i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Portes quantiques universelles I

Porte de TOFFOLI

La porte **TOFFOLI** ou porte **Controlled-Controlled-NOT (CCNOT, C²NOT)** est une porte à trois bits d'entrée et de sortie



z est inversé lorsque $x=y=1$

N°	x	y	z	x	y	$z \oplus x \wedge y$
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	1
3	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	0	1	1
5	1	0	0	1	0	0
6	1	0	1	1	0	1
7	1	1	0	1	1	1
8	1	1	1	1	1	0

La porte CCNOT nous donne la connectivité logique nécessaire à l'arithmétique

- Lorsque le qubit cible $|z\rangle$ est dans l'état $|0\rangle$ (lignes 1, 3, 5, 7), la porte de CCNOT effectue l'opération AND

$$\text{CCNOT } |x\rangle |y\rangle |0\rangle = |x\rangle |y\rangle |x \wedge y\rangle$$



Portes quantiques universelles II

Porte de TOFFOLI

- Lorsque le qubit cible $|z\rangle$ est dans l'état $|1\rangle$ (lignes 2, 4, 6, 7), la porte de CCNOT effectue l'opération NAND

$$\text{CCNOT } |x\rangle |y\rangle |1\rangle = |x\rangle |y\rangle |x \bar{\wedge} y\rangle$$

- Lorsque le premier qubit de contrôle $|x\rangle$ est dans l'état $|1\rangle$ (lignes 5-8), la porte de CCNOT effectue l'opération CNOT

$$\text{CCNOT } |1\rangle |y\rangle |z\rangle = |1\rangle |y\rangle |z \oplus y\rangle$$

- Lorsque le premier qubit de contrôle $|x\rangle$ est dans l'état $|1\rangle$ et le qubit cible $|z\rangle$ est dans l'état $|0\rangle$ (lignes 5 et 7), la porte de CCNOT effectue l'opération COPY

$$\text{CCNOT } |1\rangle |y\rangle |0\rangle = |1\rangle |y\rangle |y\rangle$$

La porte de CCNOT, avec l'initialisation de valeur constante, est une porte universelle pour toutes les opérations réversibles de la logique booléenne.