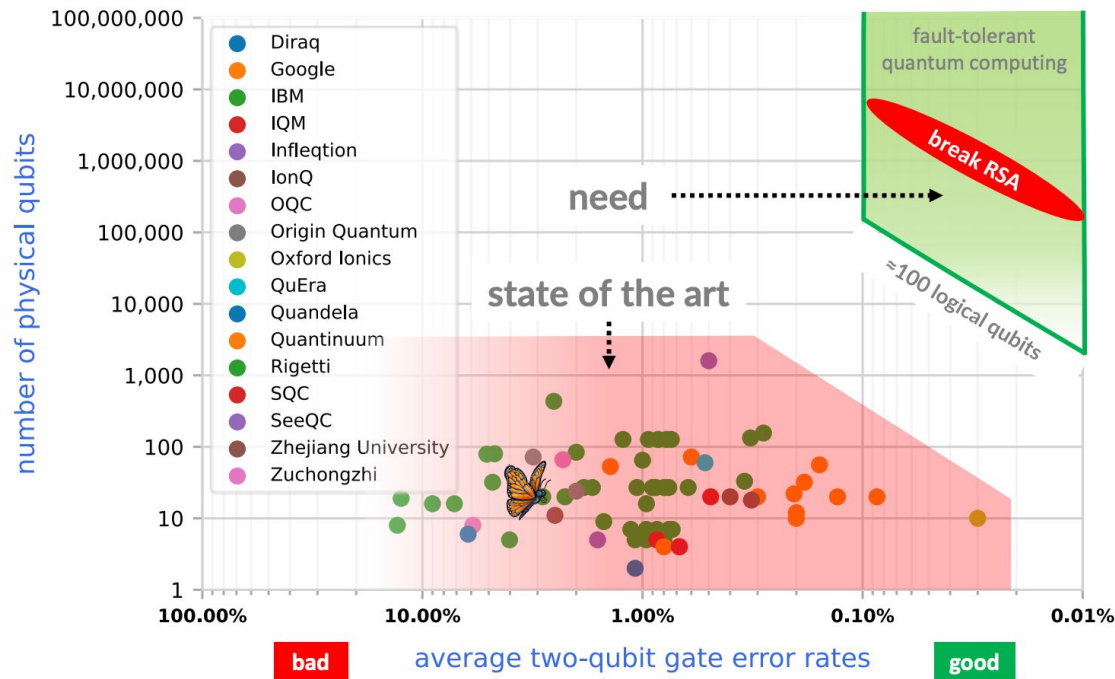


# Chapitre 5 : Calcul hybride et algorithme variationnel

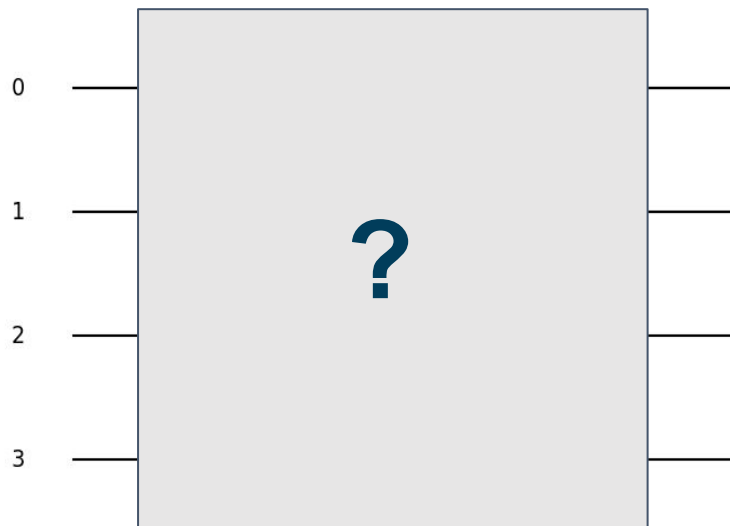
# Que pouvons-nous faire en attendant FTQC?



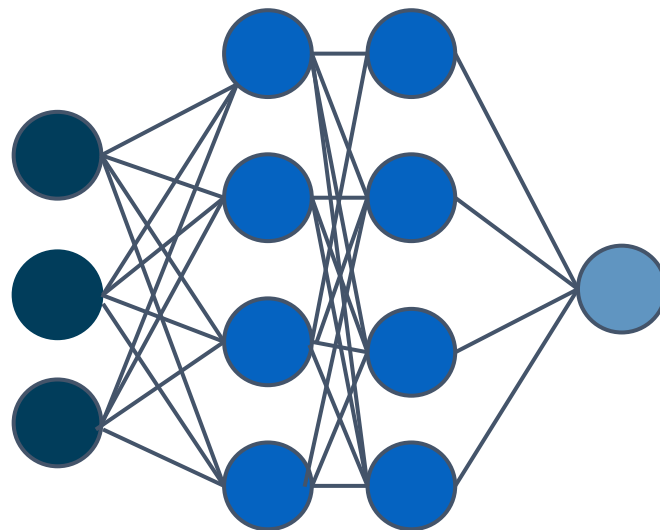
- ~~Algorithme de Shor~~
- ~~Algorithme de Grover~~
- Algorithme variationnel

# Intuition : circuits variationnels

Circuit quantique

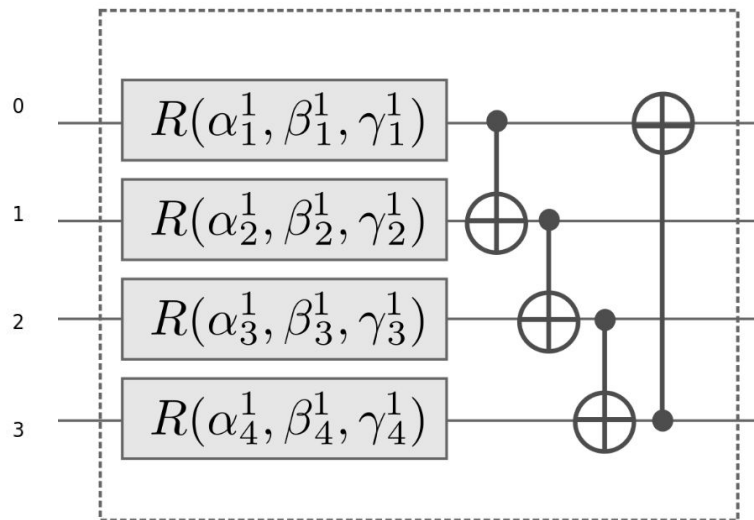


Réseau de neurones

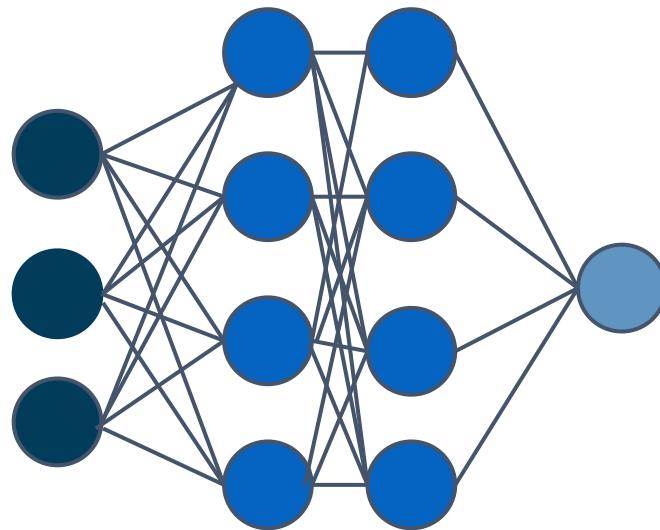


# Intuition : circuits variationnels

Circuit quantique

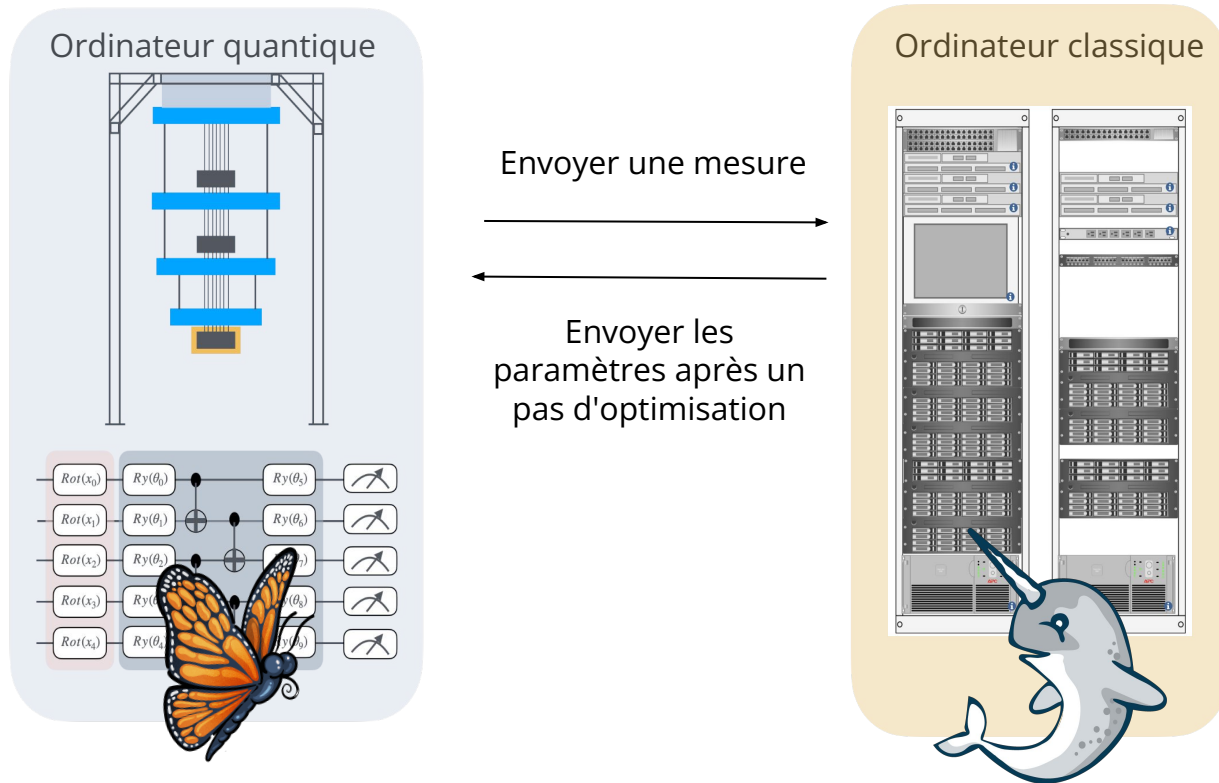


Réseau de neurones

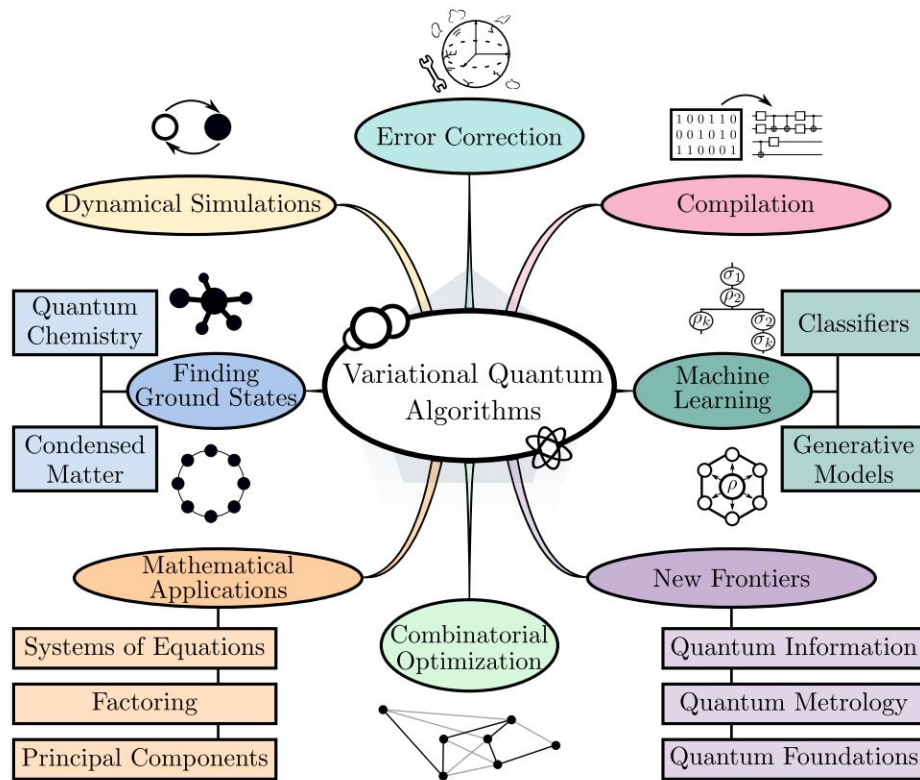


Algos variationnels : Convertir un problème en une tâche d'optimisation et utiliser un algorithme **classique** pour entraîner un modèle d'apprentissage **quantique** paramétré.

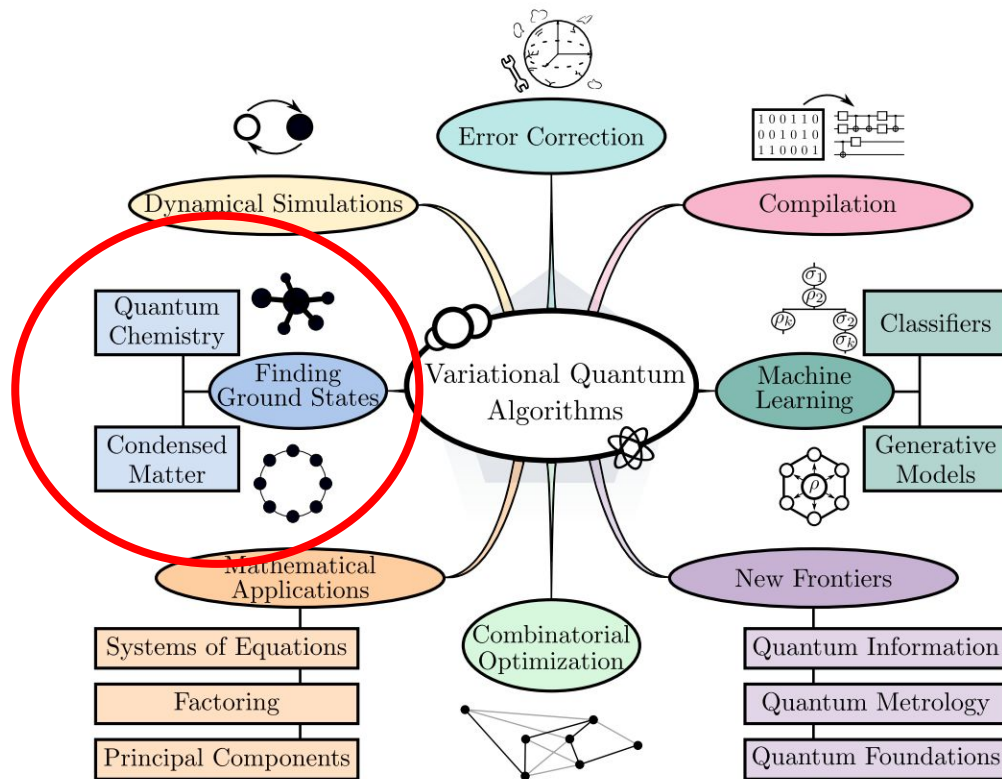
# Algorithme quantique - classique (calcul hybride)

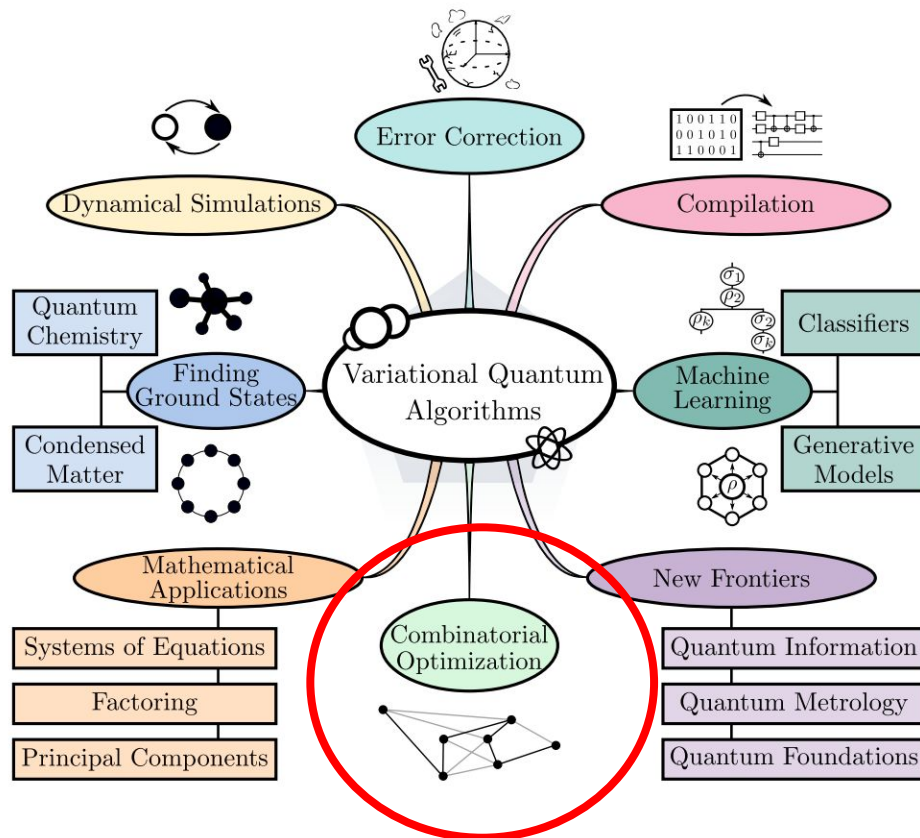






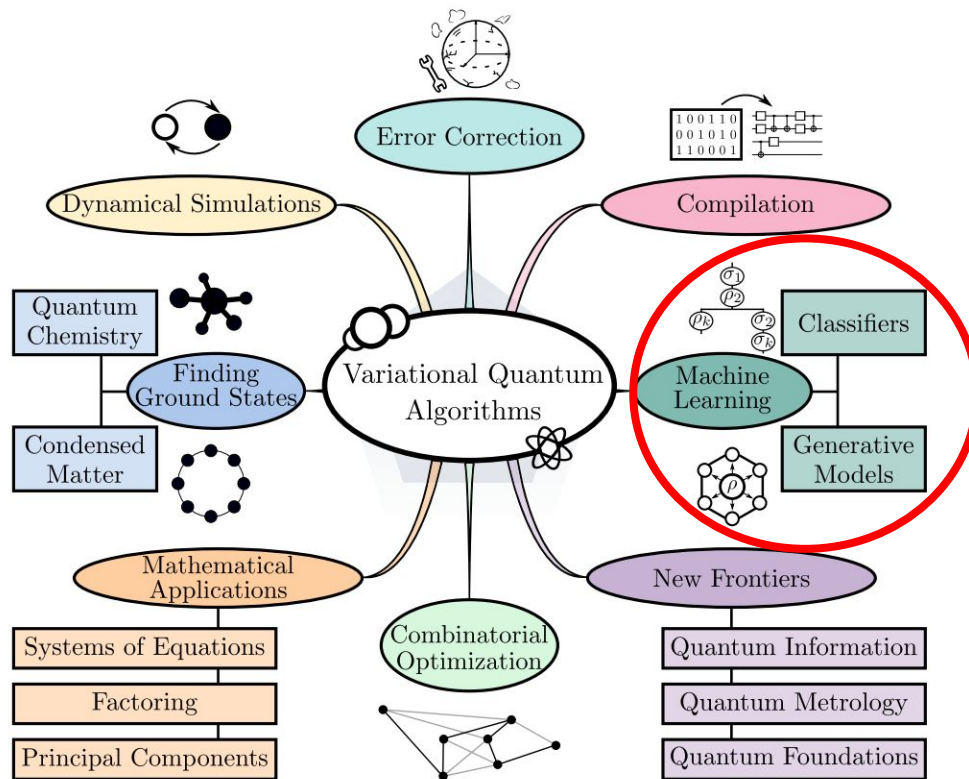
# Variational Quantum Eigensolver (VQE)





Quantum Approximate  
Optimization Algorithm (QAOA)

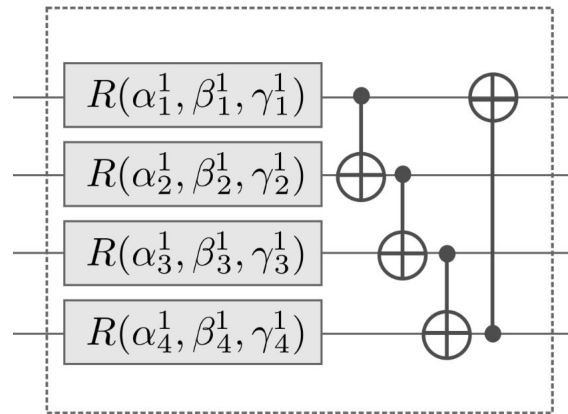
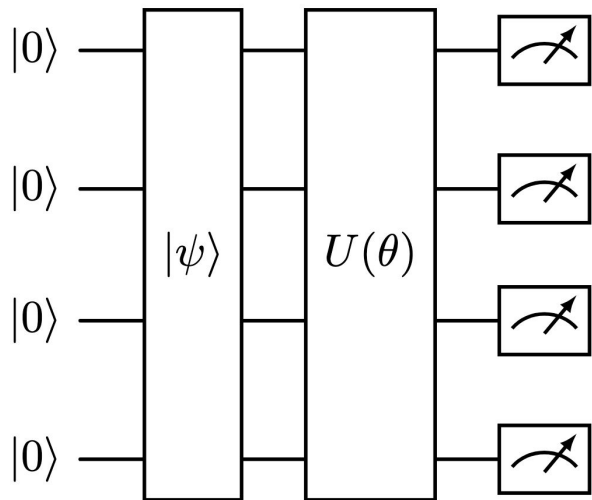




QML (Quantum neural networks, quantum kernel methods etc)

# Ingrédients d'un circuit variationnel

1. Préparation d'un état initial  $|\psi\rangle$
2. Circuit quantique paramétré  $U(\theta)$
3. Mesurer une observable

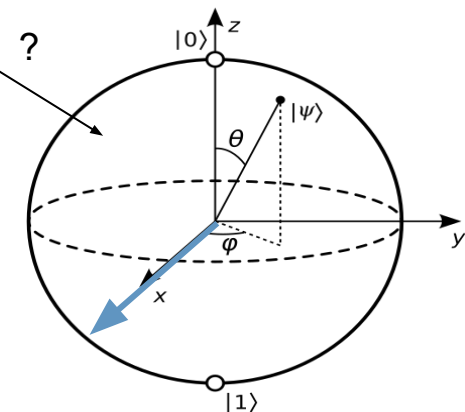
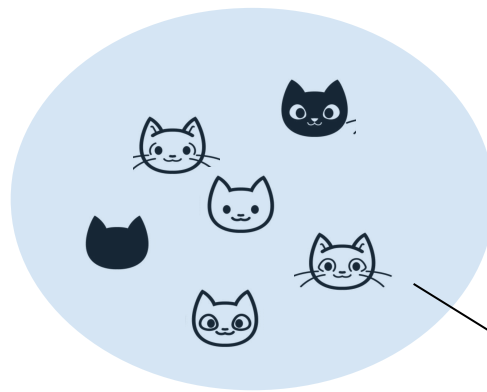
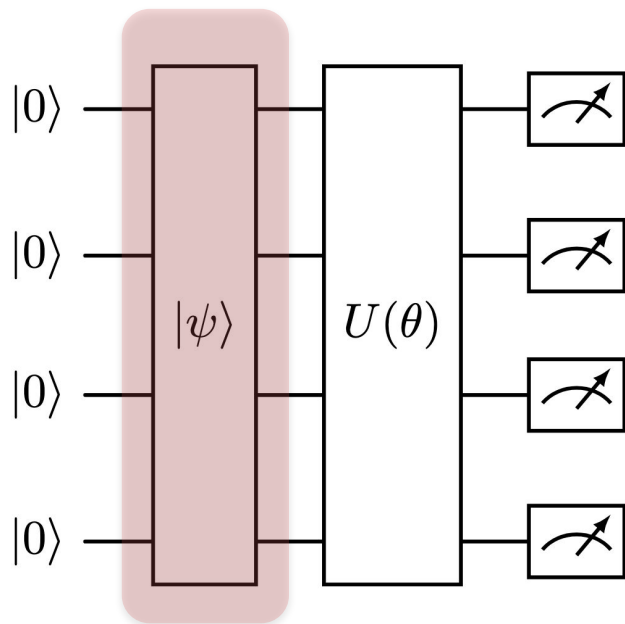


$$\langle\psi|U^\dagger(\theta)ZU(\theta)|\psi\rangle$$

# Encodage de données classiques

## 1. Préparation d'un état initial $|\psi\rangle$

Comment introduire des données classiques dans un circuit variationnel ?

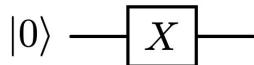
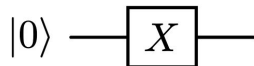
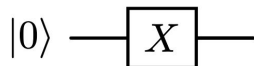


# Encodage exemples simples

## Données discrètes (int)

Encoder une chaîne binaire dans l'état de base d'un qubit

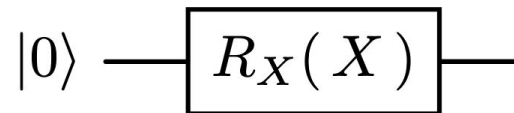
Ex:  $111 \rightarrow |111\rangle$



## Données continues (float)

Encoder une valeur continue dans l'angle de rotation du qubit

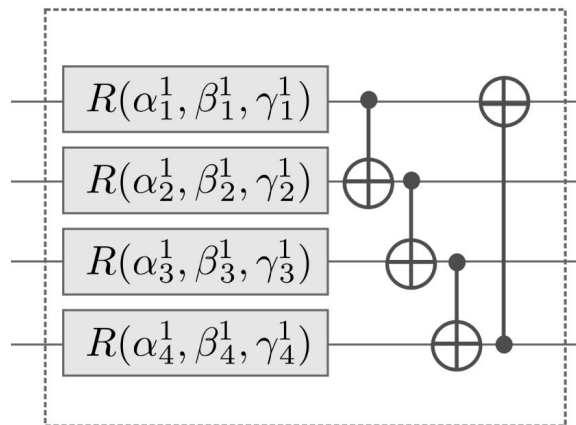
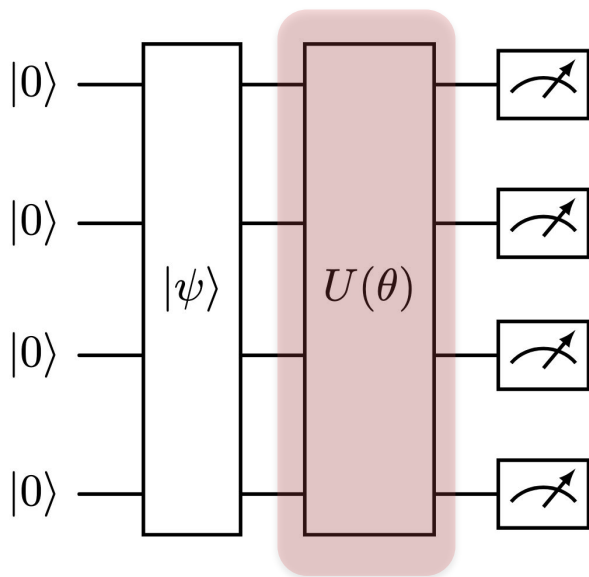
Ex:  $x \in \mathbb{R} \rightarrow R_x(x)|0\rangle$



Il existe également des méthodes plus complexes. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients.

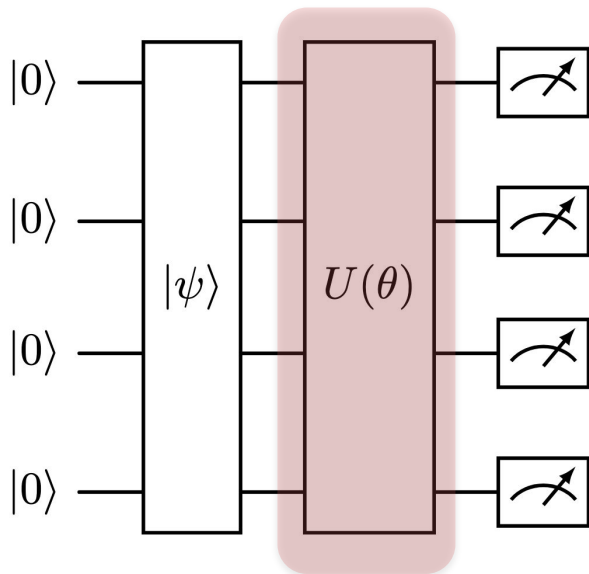
# Circuit variationnel : ingrédients de la portion quantique

## 2. Circuit quantique paramétré $U(\theta)$

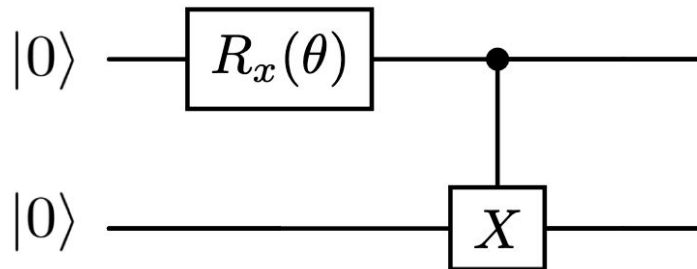




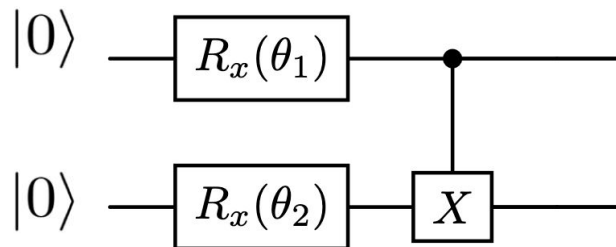
# Exemples : circuit quantique paramétré



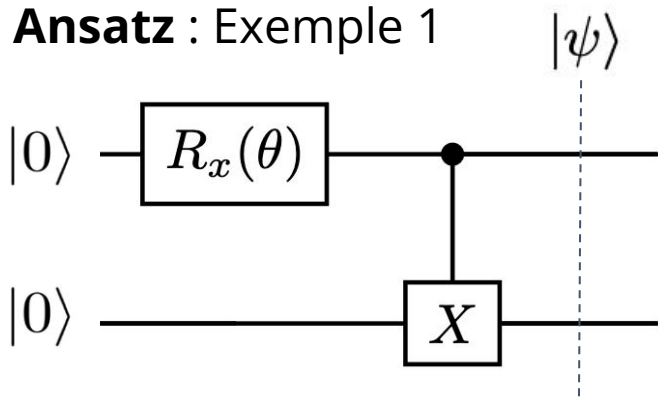
Exemple 1



Exemple 2



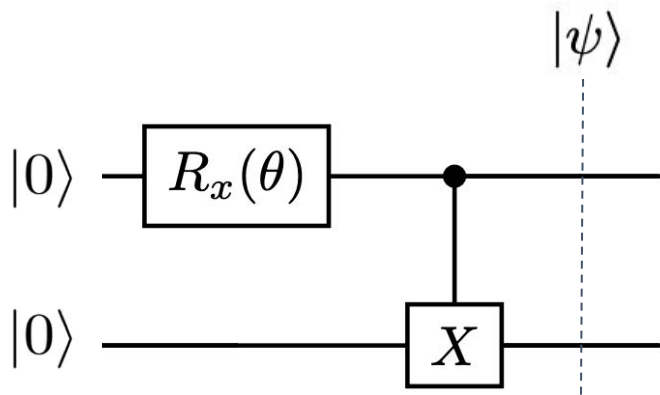
## Ansatz : Exemple 1



$$|\psi\rangle = ?$$

Porte	Symbole	Action sur les états
CNOT		$\text{CNOT}  00\rangle =  00\rangle$ $\text{CNOT}  01\rangle =  01\rangle$ $\text{CNOT}  10\rangle =  11\rangle$ $\text{CNOT}  11\rangle =  10\rangle$
$RX(\theta)$		$RX(\theta)  0\rangle = \cos \frac{\theta}{2}  0\rangle - i \sin \frac{\theta}{2}  1\rangle$ $RX(\theta)  1\rangle = -i \sin \frac{\theta}{2}  0\rangle + \cos \frac{\theta}{2}  1\rangle$

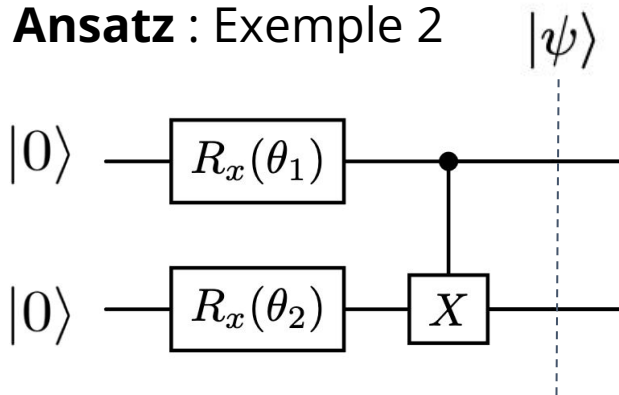
## Ansatz : Exemple 1



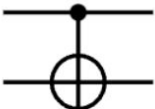
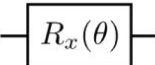
$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|00\rangle - i \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|11\rangle$$

Ce circuit n'est pas très expressif

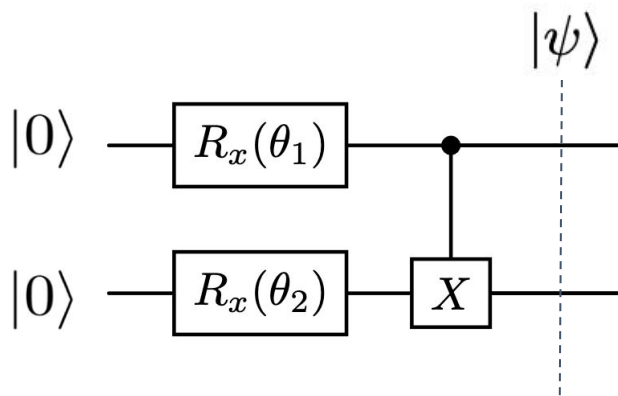
## Ansatz : Exemple 2



$$|\psi\rangle = ?$$

Porte	Symbole	Action sur les états
CNOT		$\text{CNOT }  00\rangle =  00\rangle$ $\text{CNOT }  01\rangle =  01\rangle$ $\text{CNOT }  10\rangle =  11\rangle$ $\text{CNOT }  11\rangle =  10\rangle$
$\text{RX}(\theta)$		$\text{RX}(\theta)  0\rangle = \cos \frac{\theta}{2}  0\rangle - i \sin \frac{\theta}{2}  1\rangle$ $\text{RX}(\theta)  1\rangle = -i \sin \frac{\theta}{2}  0\rangle + \cos \frac{\theta}{2}  1\rangle$

## Ansatz : Exemple 2



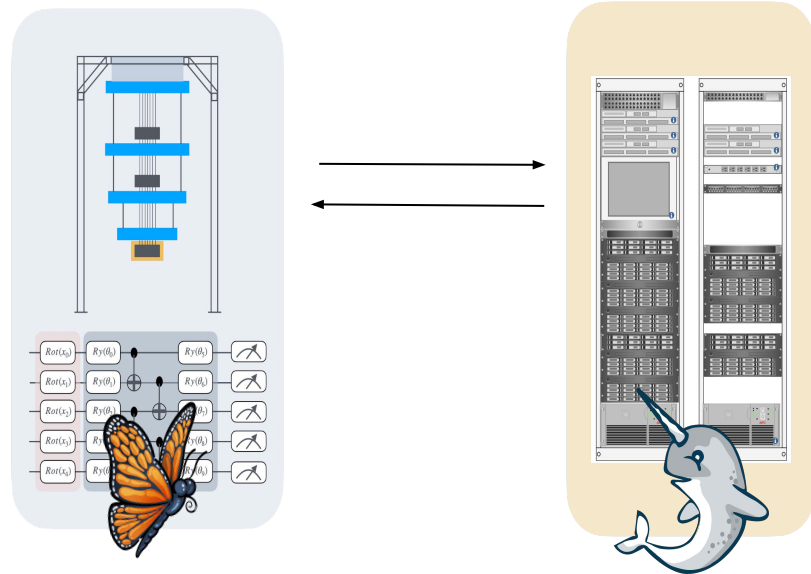
$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) |00\rangle - i \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) |01\rangle - \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) |10\rangle - i \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) |11\rangle$$

Ce circuit est plus expressif!



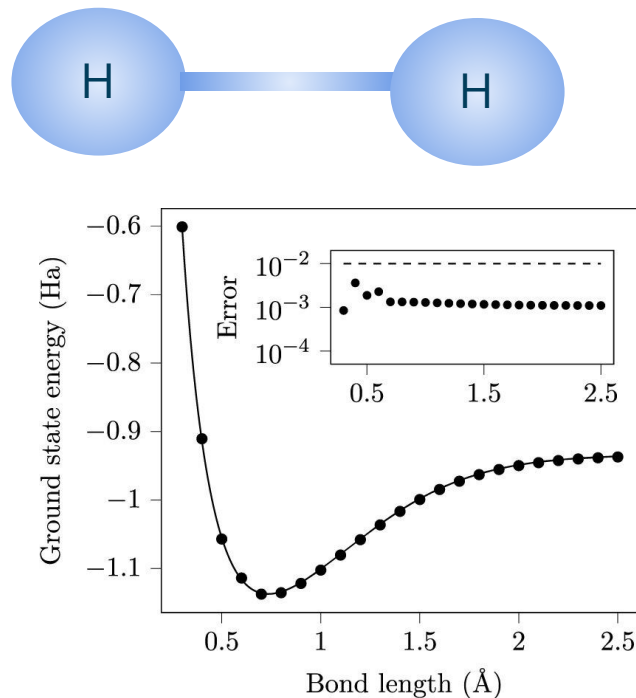
# Algorithme variationnel : quantique - classique

1. Un **ansatz** de circuit variationnel
2. Une fonction de **coût**
3. Un algorithme d'**apprentissage**



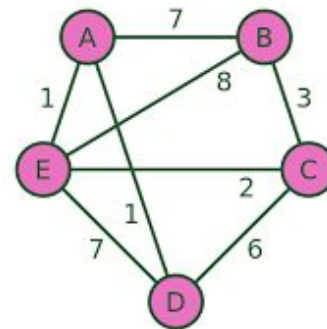
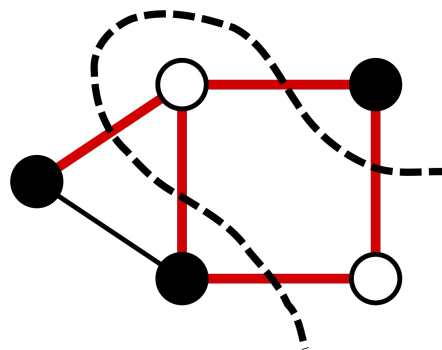
# Algorithme variationnel : Variational Quantum Eigensolver (VQE)

1. Un **ansatz** de circuit variationnel  
Unitary coupled cluster singles and doubles excitations (UCCSD)
2. Une fonction de **coût**  
L'énergie d'une molécule (valeur d'attente de l'hamiltonien)
3. Un algorithme d'**apprentissage**  
Descente de gradient



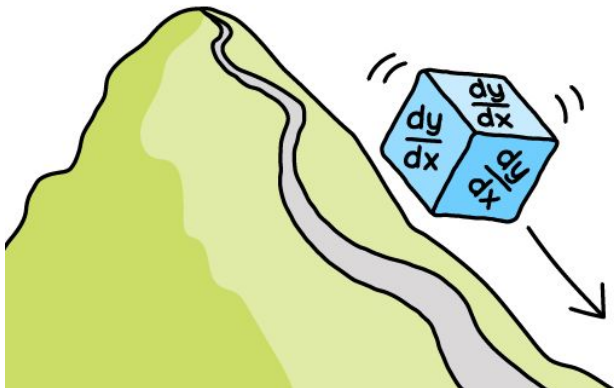
# Algorithme variationnel : Quantum approximate optimization algorithm (QAOA)

1. Un **ansatz** de circuit variationnel  
Based on “cost” and “mixer” Hamiltonian time-evolution
2. Une fonction de **coût**  
Valeur d'attente de l'hamiltonien de coût
3. Un algorithme d'**apprentissage**  
Descente de gradient



# Optimiser un circuit quantique

Un circuit quantique peut être optimisé avec des méthodes de descente de gradient grâce à la règle de “parameter shift” .



`AdagradOptimizer`

Gradient-descent optimizer with past-gradient-dependent learning rate in each dimension.

`AdamOptimizer`

Gradient-descent optimizer with adaptive learning rate, first and second moment.

`AdaptiveOptimizer`

Optimizer for building fully trained quantum circuits by adding gates adaptively.

`GradientDescentOptimizer`

Basic gradient-descent optimizer.

`MomentumOptimizer`

Gradient-descent optimizer with momentum.

`NesterovMomentumOptimizer`

Gradient-descent optimizer with Nesterov momentum.

`QNGOptimizer`

Optimizer with adaptive learning rate, via calculation of the diagonal or block-diagonal approximation to the Fubini-Study metric tensor.

`RiemannianGradientOptimizer`

Riemannian gradient optimizer.

`RMSPropOptimizer`

Root mean squared propagation optimizer.

# Perspectives d'avenir et limitations

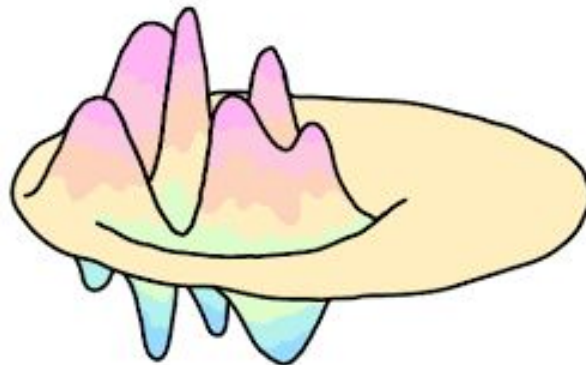
## Entraînement - “Barren plateau”

Un plateau stérile (barren plateau) est une région de l'espace des paramètres de la fonction de coût où le gradient de la fonction de coût devient exponentiellement petit avec le nombre de qubits.

Causes :

- Ansatz trop profond
- Fonction de coût globale
- Initialisation des paramètres
- Matériel quantique bruité

## Latence - Calcul hybride peu efficace





## Pause programmation



## Notebook 5 : Circuits variationnels