

Introduction à la cryptographie Post-Quantique



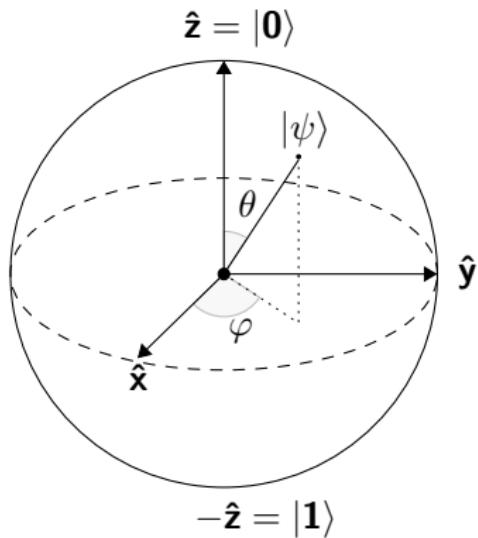
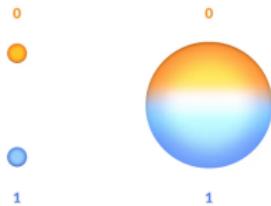
Pascal Lafourcade



Nuit de la Lecture Clermontech 22 janvier 2026

Qubit dans les années 80 ... Benjamin Schumacher 1995

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \text{ avec } (\alpha, \beta) \in \mathbb{C}, \text{ tel que } \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = 1$$
$$\|\psi\|^2 = |\alpha|^2 + |\beta|^2 = \alpha.\overline{\alpha} + \beta.\overline{\beta} = 1$$



Ordinateurs quantiques

- 1998 : 2 qbits, IBM
- 1999 : 3 qbits, IBM
- 2001 : 7 qbits, IBM
- 2017 : 50 qbits, IBM Q50
- 2019 : 53 qbits, Google Sycamore
- 2021 : 90 qbits, Rigetti Aspen-9
- 2021 : 127 qbits, IBM Eagle
- 2022 : 433 qbits, IBM Osprey
- Dec 2023 : 1 121 qubits, IBM Condor

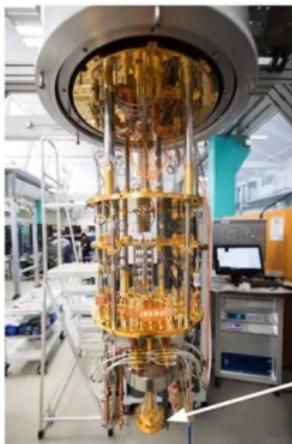


- 2011 : 128 qbits, One
- 2013 : 512 qbits, Two
- 2015 : 1152 qbits, 2X
- 2017 : 2048 qbits, 2000Q
- 2020 : 5760 qbits, Advantage
- 2024 : 7440 qbits, Advantage 2

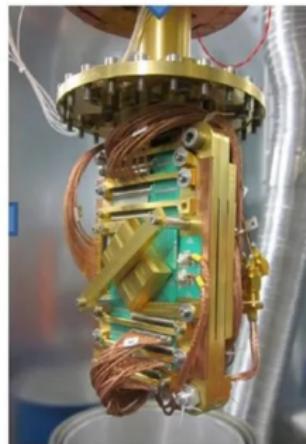
Ordinateurs quantiques



IBM



rigetti



D-Wave

Portes quantiques

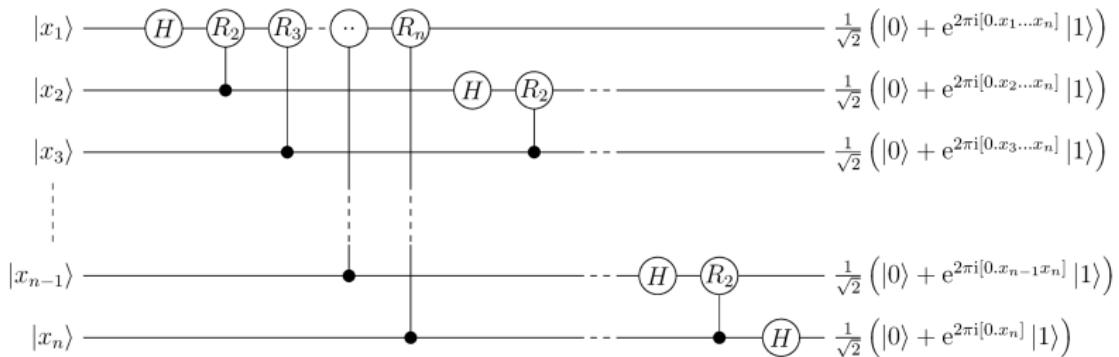
$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Circuits quantiques



Transformée de Fourier quantique

Algorithmes quantiques

- Algorithme de Deutsch (1985) et Deutsch-Jozsa (1992)
- Algorithme de Simon (1994)
- Algorithme de Shor (1994)
- Algorithme de Grover (1996)



Shor et Grover

Algorithme de Shor (1994)

Calcule l'ordre d'un nombre en temps polynomial.

Définition de l'ordre

L'ordre de a est le plus petit entier r tel que $a^r \equiv 1 \pmod{N}$

Algorithme de Grover (1996)

Trouver efficacement un élément qui satisfait une propriété dans une liste donnée.



Plan

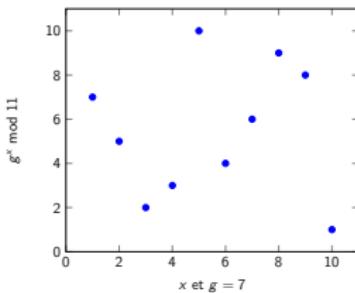
1. Ordinateur quantique
2. Impact de l'ordinateur quantique sur la cryptographie
3. Cryptographie Post-Quantique
4. Conclusion

Cryptographie Pré-quantique



Deux problèmes :

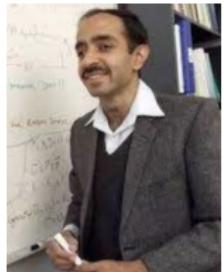
- Factorisation : $n = p \times q$ difficile de trouver p et q .
- Logarithme discret : $g, p, g^x \text{ mod } p$ difficile de trouver x .



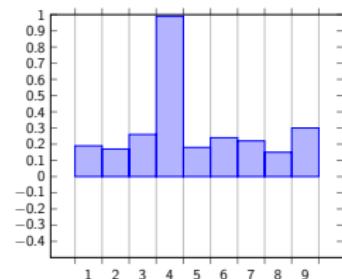
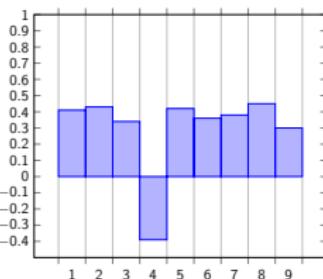
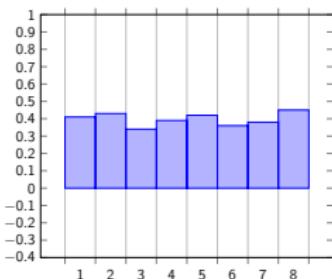
C'est deux problèmes sont cassés par l'algorithme de **Shor** !

“**Store-now, decrypt-later**”

Grover 1996



Trouver $x \in \{0, 1\}^n$ avec $F(x)$ en $\sqrt{2^n}$ évaluations de F



Oracle quantique qui détermine x

Diminue légèrement la sécurité pour :

- les fonctions de hachages de $O(2^{\frac{N}{2}})$ à $O(2^{\frac{N}{3}})$
- les chiffrements symmétriques de $O(2^n)$ à $O(2^{\frac{n}{2}})$

Plan

1. Ordinateur quantique
2. Impact de l'ordinateur quantique sur la cryptographie
3. Cryptographie Post-Quantique
4. Conclusion

Cryptographie Post-Quantique



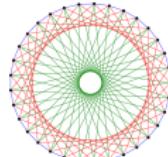
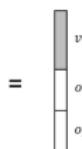
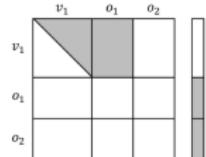
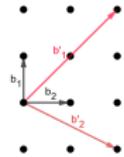
- Fonctionne sur les ordinateurs classiques
- Résiste à un ordinateur quantique



Les problèmes difficiles sous-jacents sont différents !

5 familles de problèmes difficiles

- Fonctions de hachage
- Réseaux Euclidiens (Lattices)
- Codes
- Systèmes Multivariés
- Isogénies



Compétition du NIST lancée en 2017



- 30 novembre 2017 : 69 sousmissions Round 1
- 30 janvier 2019 : 26 sousmissions choisies pour le Round 2
- 22 juillet 2020 : 7+8 sousmissions choisies pour le Round 3
- 5 juillet, 2022 :
 - KEM : KyberThe logo for Kyber, consisting of seven blue diamond shapes arranged in a hexagonal pattern. The letters "K", "Y", "B", "E", and "R" are written vertically along the edges of the diamonds.
 - Signature : Dilithium, Falcon, SPHINCS+
- 13 août 2024, NIST publie les standards :
 - FIPS 203 (Kyber),
 - FIPS 204 (Dilithium)
 - FIPS 205 (SPHINCS+)
 - FIPS 206 (FALCON à venir)
- 10 mars 2025, NIST annonce le vainqueur du Round 4 : KEM HQC

Autres compétitions

Corée du Sud (2016 - 2018), 2025 (Lattice based)

- KEM : SMAUG-T et NTRU+
- DSA : AIMer et HAETAE (Similaire à Dilithium).

Chine, 3 janvier 2020 (Lattice based)

- Aigis-sig et Aigis-enc
- LAC.PKE

Ukraine a standardisé (Lattice based)

- KEM : DSTU 8961:2019 Skelya, proche de CRYSTALS-KYBER.
- Signature : Falcon

Russie 2019 -

- KEM : FORZITSIYA (forsythia) et LIMMONITSA (citronnelle) (Isogénies)
- Signature : SHIPOVNIK (églantine) et KRYZHUVNIK (groseille à maquereau) une variante optimisée de Dilithium.

Plan

1. Ordinateur quantique
2. Impact de l'ordinateur quantique sur la cryptographie
3. Cryptographie Post-Quantique
4. Conclusion

Changements en cours

- 2014 : La Fondation Linux a créé la Post-Quantum Cryptography Alliance (PQCA)



- Septembre 2023 : PQXDH protocol (Signal)



- Février 2024 : PQ3 protocol (imessage)



- Avril 2024 : Chrome > 124 utilise Kyber768 pour TLS 1.3



- Mai 2024 : migre vers Kyber pour l'échange de clés TLS.



- Le 7 juin 2024, ont proclamé 2025 comme l'Année Internationale de la Science et de la Technologie Quantiques



- Février 2025 : annonce 1 million de qubits topologiques, Majorana



- Le 10 juin 2025, IBM annonce Quantum Starling pour 2029 !



Hybridation



Le meilleur des deux mondes

- ML-KEM : CRYSTALS-Kyber
- KEM : HQC
- ML-DSA : CRYSTALS-Dilithium
- SLH-DSA : SPHINCS+
- FN-DSA : Falcon

| | Taille en bytes | | Temps en cycles | |
|-------------|-----------------|---------|-----------------|---------------|
| | Clé publique | Chiffré | Encapsulation | Décapsulation |
| ML-KEM-512 | 800 | 2 420 | 45 200 | 34 572 |
| HQC-KEM 256 | 7 245 | 14 485 | 753 000 | 1 469 000 |
| RSA | 512 | 512 | 400 000 | 4 000 000 |

| | Taille en bytes | | Temps en cycles | |
|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------------|
| | Clé publique | Signature | Signature | Vérification |
| ML-DSA | 1 312 | 2 420 | 333 013 | 118 412 |
| FN-DSA | 897 | 666 | 386 678 | 82 340 |
| SLH-DSA | 32 | 17 088 | 1 100 000 000 | 1 190 000 |
| DSA | 521 | 64 | 4 000 000 | 400 000 |

A retenir



Novembre 2024

| Algorithmes | Transition |
|-------------|---------------------|
| ECDSA | Déprécié après 2030 |
| | Interdit après 2035 |
| RSA | Déprécié après 2030 |
| | Interdit après 2035 |

Conclusion

Merci pour votre attention



pascal.lafourcade@uca.fr