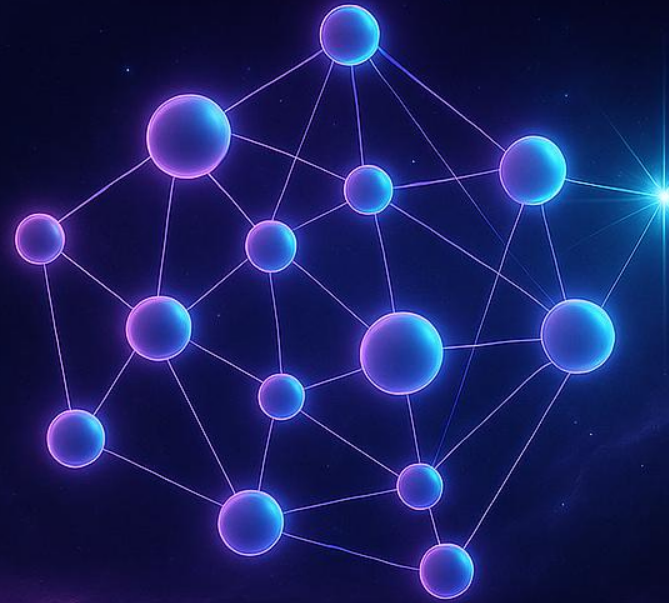
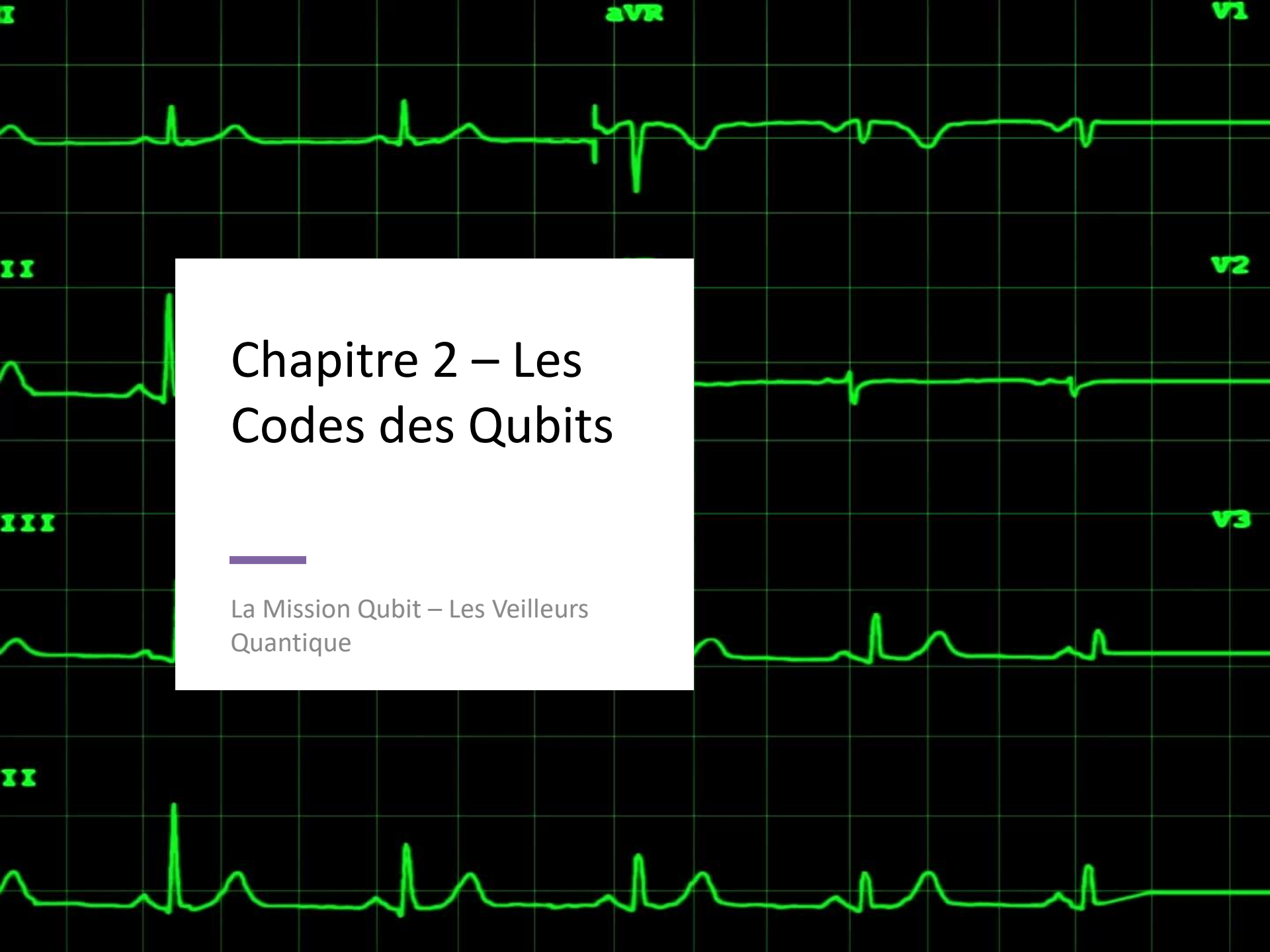


## CHAPITRE 2

# LES CODES DES QUBITS



The background of the slide is a 12-lead ECG (heart rate monitor) trace. The leads are labeled in red: I, II, III, aVR, aVL, aVF, V1, V2, V3, V4, V5, and V6. The trace shows a regular rhythm with distinct P waves, QRS complexes, and T waves. A white rectangular box is centered on the slide, containing the chapter title and subtitle.

## Chapitre 2 – Les Codes des Qubits

---

La Mission Qubit – Les Veilleurs  
Quantique

# Narratif



- Chronos a verrouillé la langue des qubits.
- Sans comprendre leur logique, impossible d'ouvrir le cœur de l'ordinateur quantique.
- Les Veilleurs doivent apprendre à manipuler les portes fondamentales.

A close-up photograph of a hand holding a CD. The CD is partially visible, showing its reflective surface and concentric tracks. Overlaid on the CD is a faint, circular diagram of a quantum circuit, featuring various gates and qubit lines. The background is a warm, orange-toned blur.

# Mission des étudiants

- Objectif : décrypter les codes qui gouvernent les qubits.
- Chaque mission vous rapproche de la maîtrise des circuits quantiques.
- Vous devrez créer des superpositions, intriquer des qubits et téléporter un état.

# Objectifs pédagogiques

---

- Comprendre la définition d'un qubit et sa représentation.

---

- Apprendre les portes fondamentales : X, Z, H, CNOT.

---

- Réaliser des circuits de superposition, intrication, téléportation.

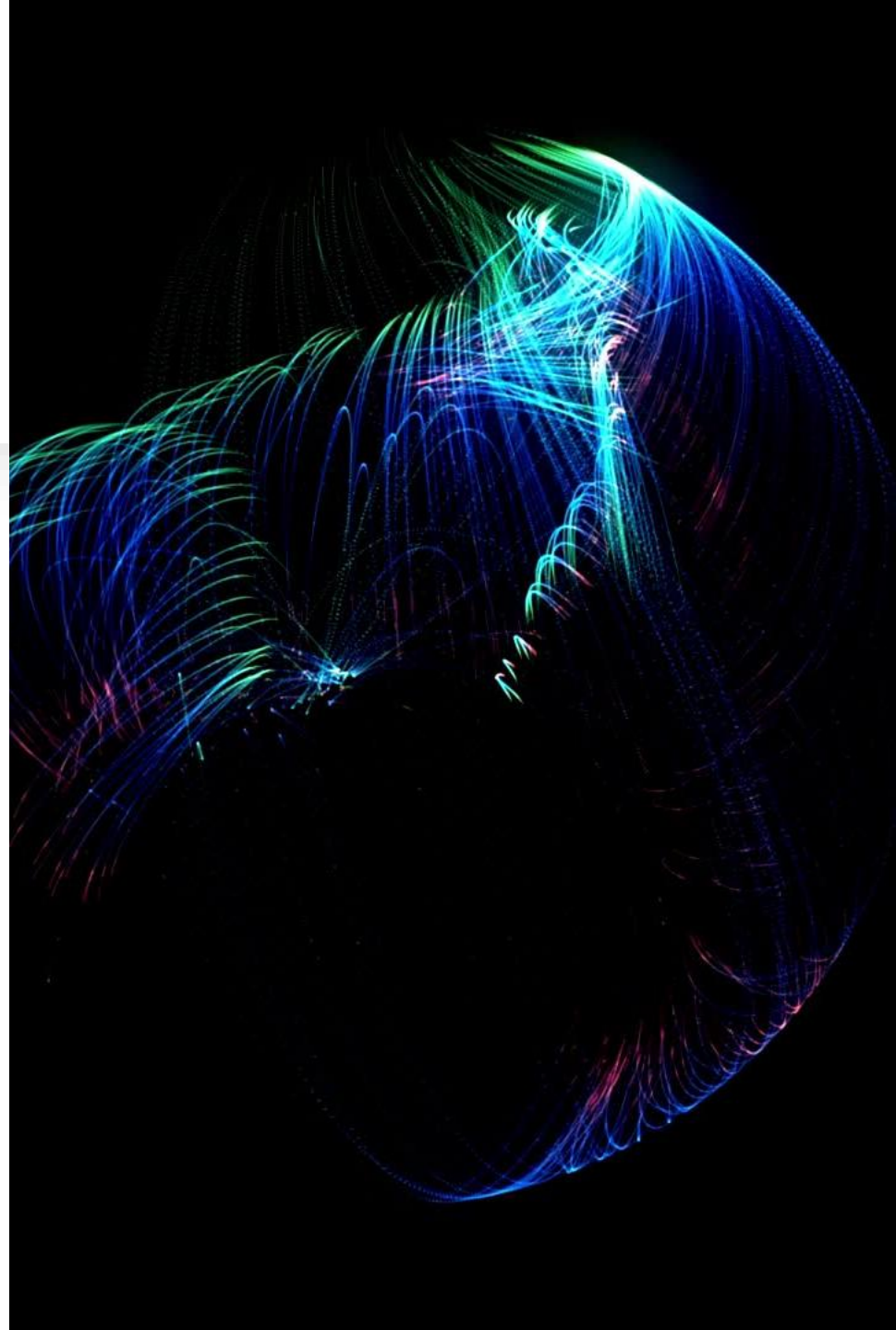
---

- Découvrir Heisenberg, Dirac, Born.



# Définition du qubit

- Un qubit est l'unité de base de l'information quantique.
- États de base :  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ .
- Superposition :  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  avec  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ .
- Contrairement au bit classique, le qubit peut être 0 ET 1.



# Sphère de Bloch

---

Représentation géométrique d'un qubit.

---

Tout état pur peut être représenté par deux angles  $(\theta, \phi)$ .

---

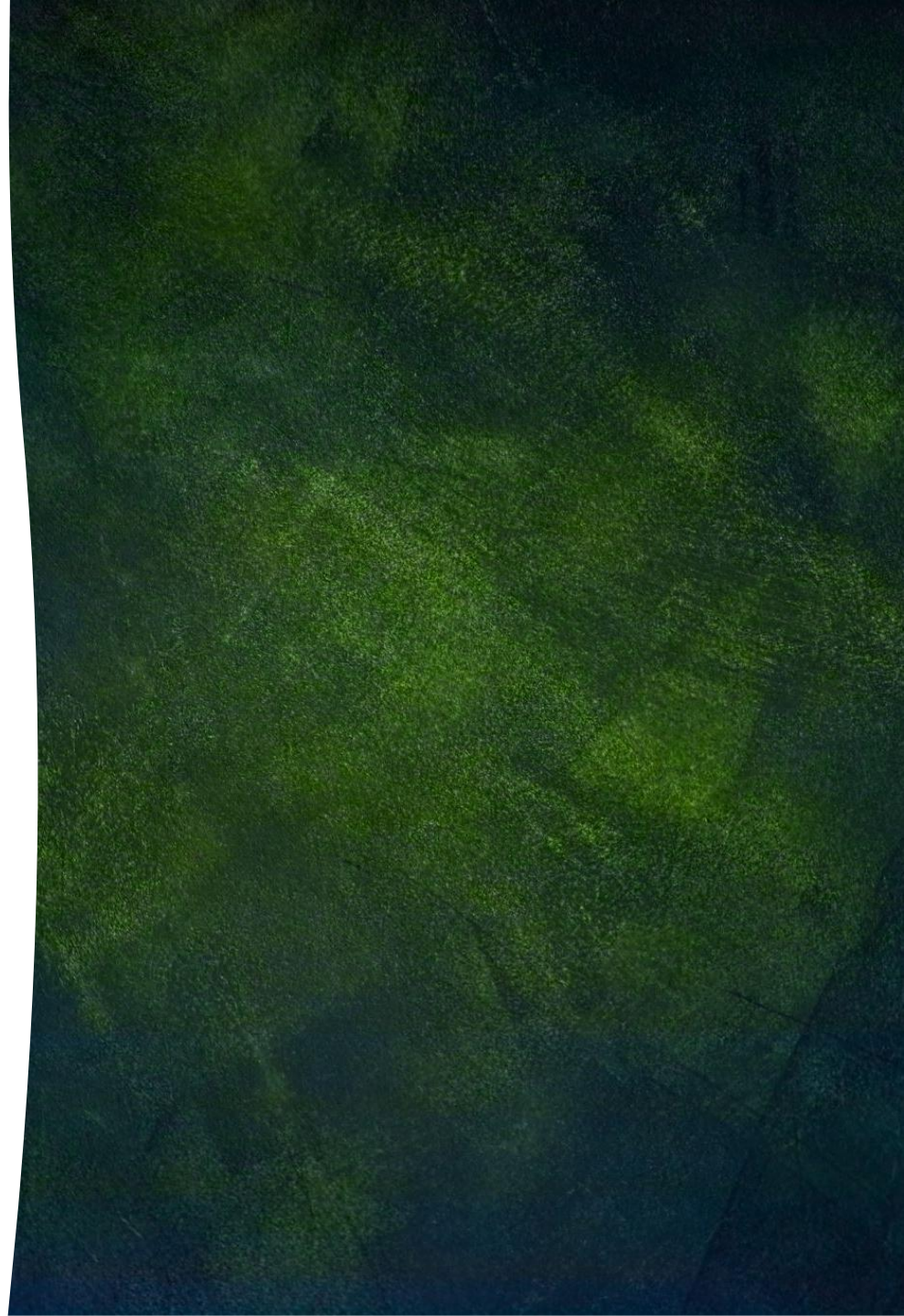
$|0\rangle$  = pôle nord,  $|1\rangle$  = pôle sud.

---

Les superpositions apparaissent comme des points intermédiaires.

---

Permet de visualiser les rotations induites par les portes.





# Portes quantiques de base

---

Porte X : équivalent d'un NOT (inverse  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ ).

---

Porte Z : change la phase du qubit ( $|1\rangle \rightarrow -|1\rangle$ ).

---

Porte H (Hadamard) : crée une superposition équilibrée.

---

Ces opérations sont réversibles (unitaires).





## La porte Hadamard

---

$$H|0\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2} = |+\rangle.$$

---

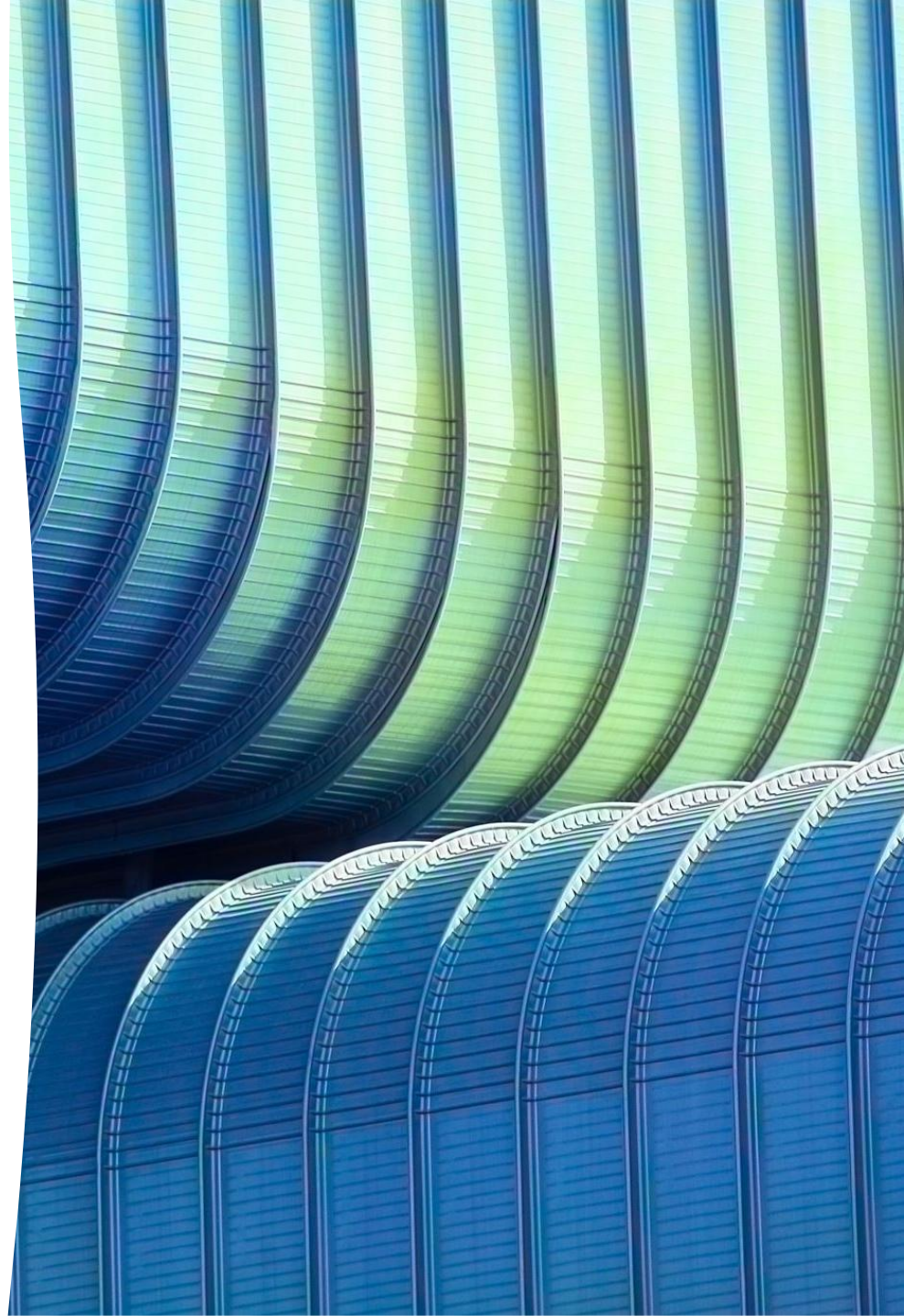
$$H|1\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2} = |-\rangle.$$

---

Fonction clé : créer la superposition.

---

Permet la puissance de calcul parallèle des qubits.



# La porte CNOT

---

Contrôlée-NOT agit sur deux qubits.

---

Si contrôle =  $|1\rangle \rightarrow$  inverse la cible.

---

Sinon, laisse la cible inchangée.

---

Indispensable pour créer l'intrication.

---

Exemple : utilisée avec H pour créer un état de Bell.



# État de Bell

---

Circuit : H sur le premier qubit, puis CNOT avec qubit 1 contrôle et qubit 2 cible.

---

Résultat :  $|\Phi+\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ .

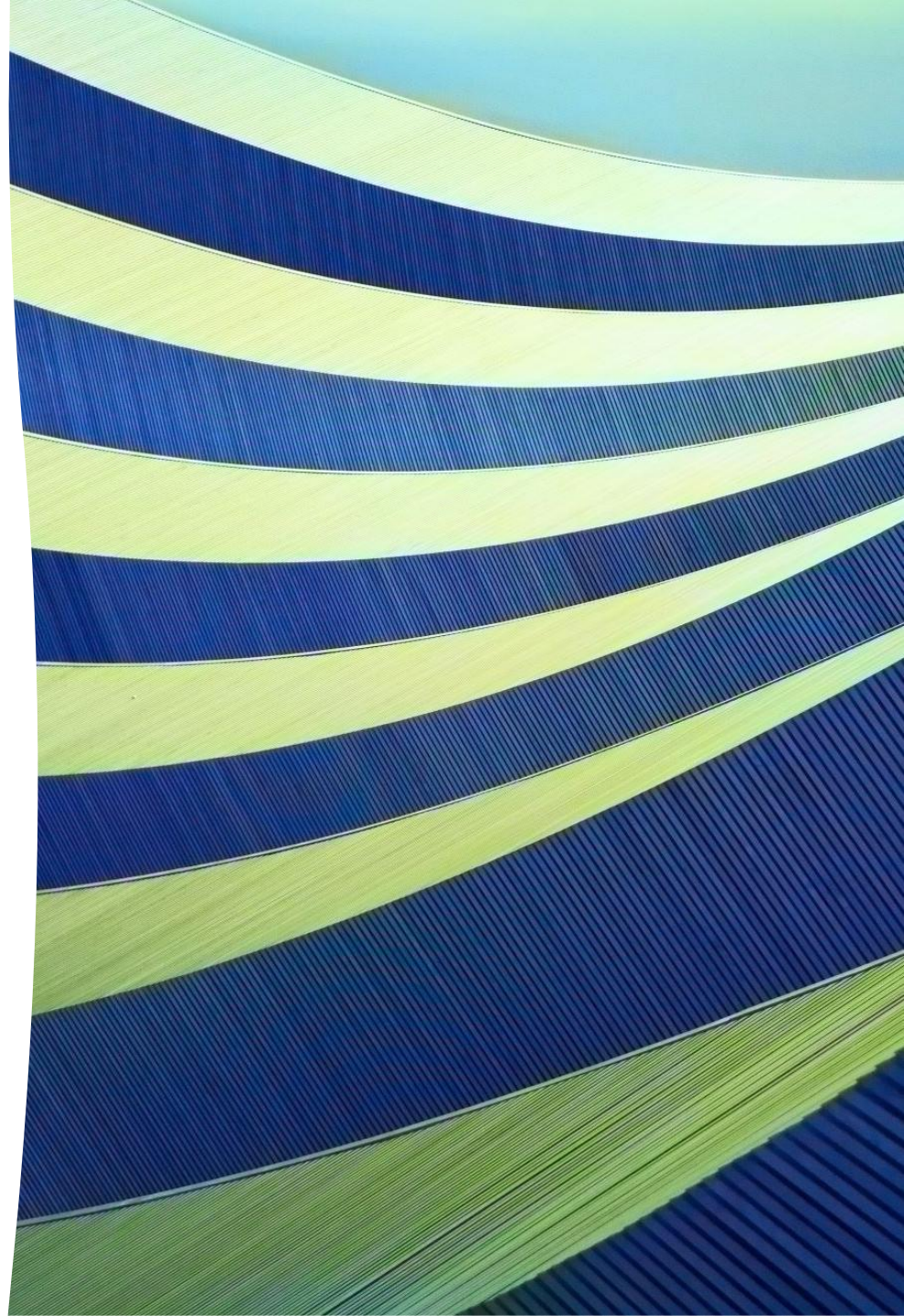
---

Deux qubits corrélés : mesurer l'un détermine immédiatement l'autre.

---

L'intrication est une ressource clé en informatique quantique.

---





# Werner Heisenberg

---

1927 : formule le principe d'incertitude.

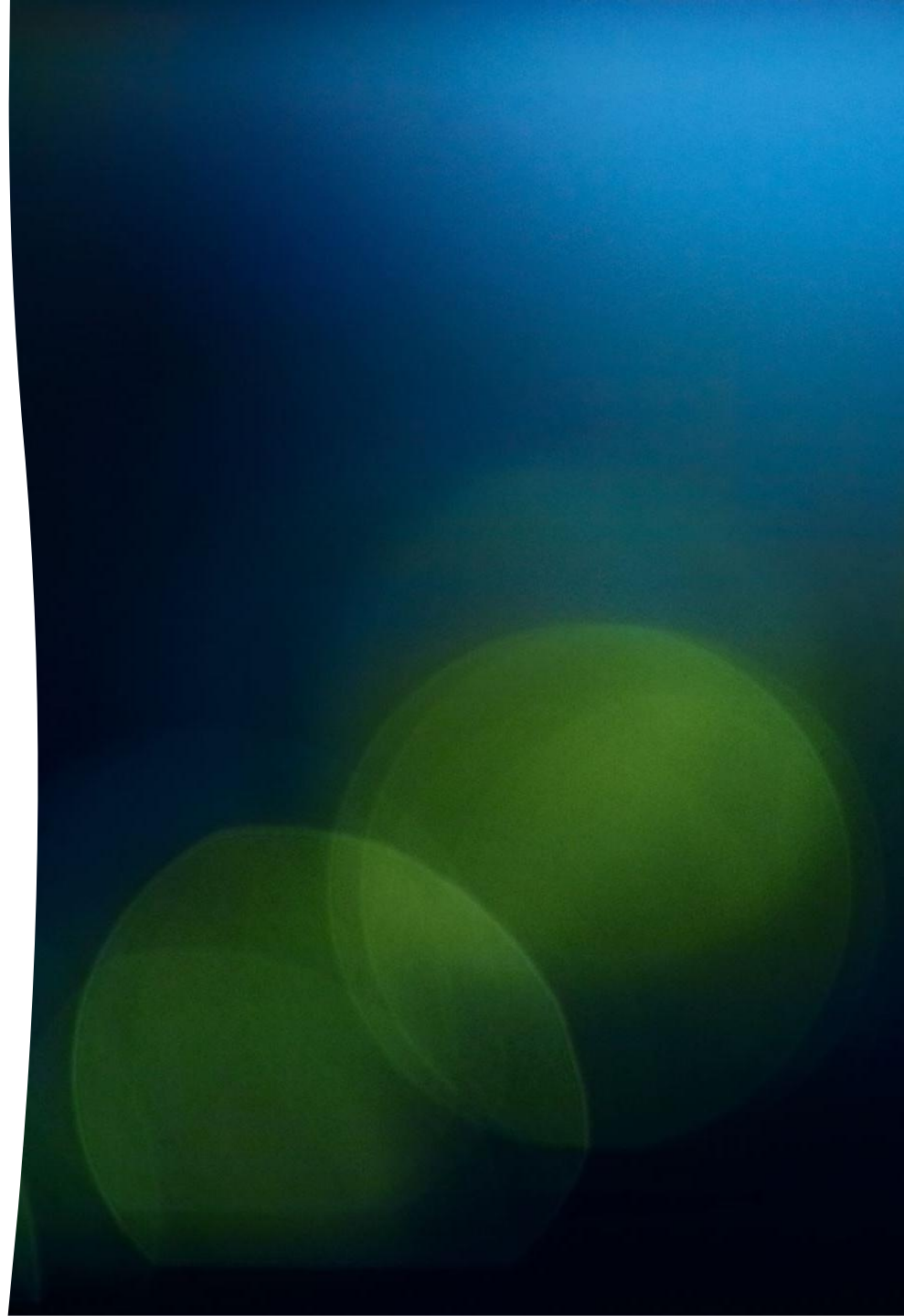
---

Impossible de connaître simultanément position et vitesse avec précision.

---

---

Implication : la nature est fondamentalement probabiliste.



# Paul Dirac

---

1928 : équation de Dirac unifie mécanique quantique et relativité.

---

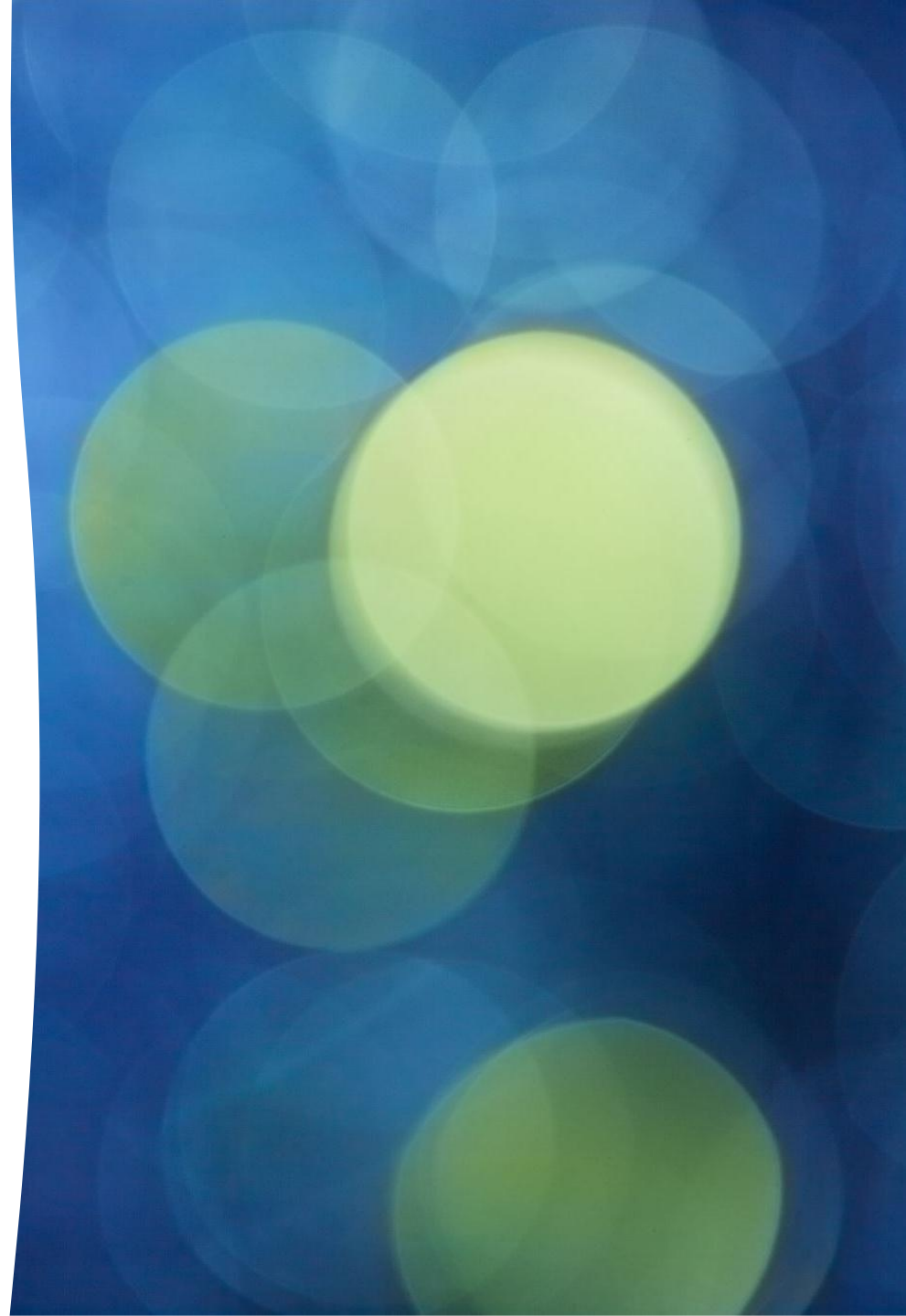
Prédit l'existence de l'antimatière (positron).

---

Conséquence : découverte confirmée en 1932.

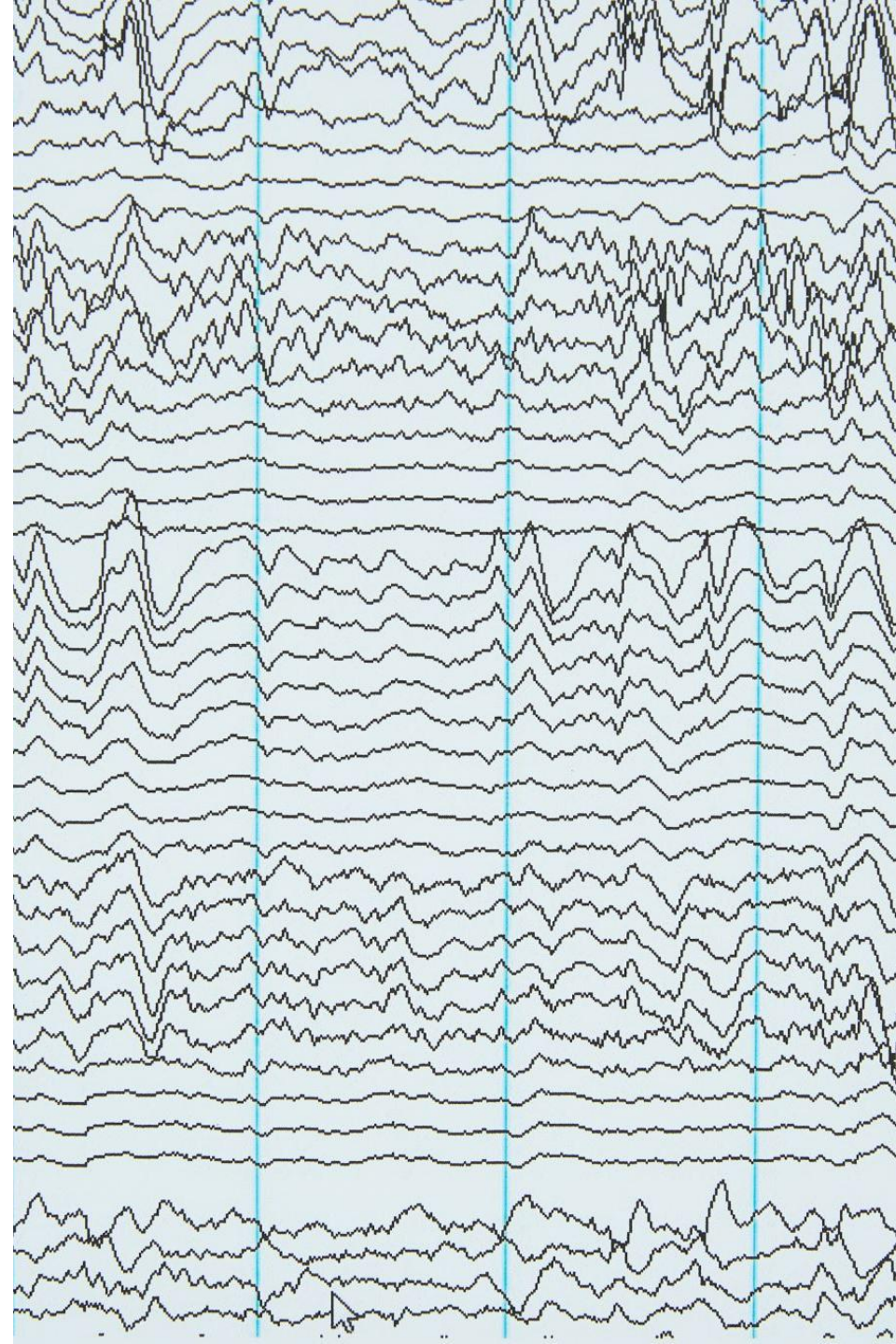
---

Impact : ouvre la voie à la physique des particules.



# Max Born

- Interprétation statistique de la fonction d'onde.
- La probabilité de mesurer un état =  $|\psi|^2$ .
- Ceci explique les résultats aléatoires mais prévisibles en moyenne.
- Fondement de toute la mécanique quantique expérimentale.





# Mission Quirk : superposition

---

Objectif : créer un état  $|+\rangle$ .

---

1. Démarrer avec  $|0\rangle$ .

---

2. Appliquer H.

---

3. Observer que la mesure donne 0 ou 1 avec probabilité 50%.

# Mission Quirk : intrication

---

Objectif : créer un état de Bell.

---

1. Préparer  $|00\rangle$ .

---

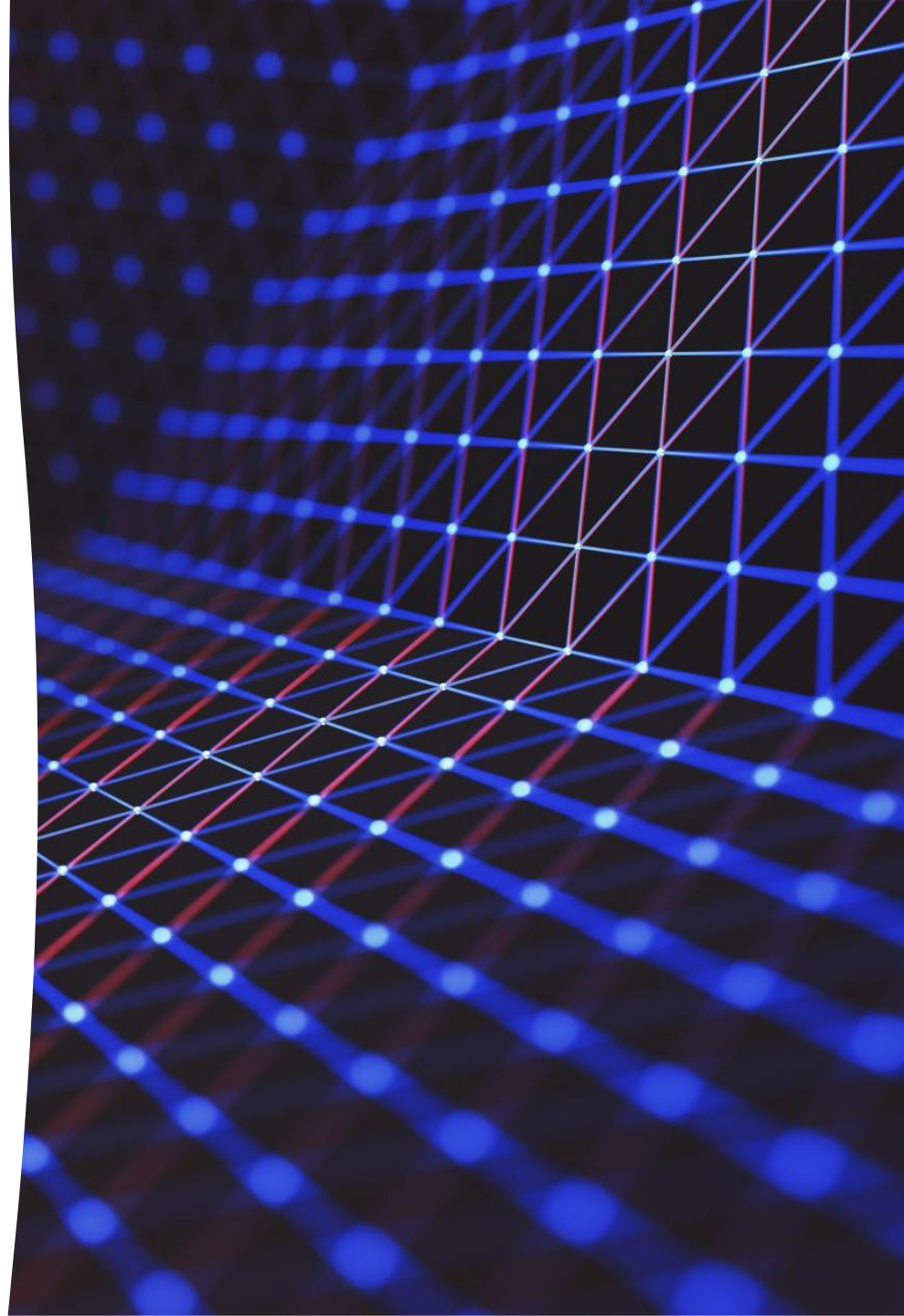
2. Appliquer H sur le premier qubit.

---

3. Appliquer CNOT (contrôle = qubit 1, cible = qubit 2).

---

Résultat :  $|\Phi+\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ .



# Mission Quirk : téléportation

---

Objectif : téléporter un état quantique.

---

1. Préparer une paire intriquée entre Alice et Bob.

---

2. Alice applique CNOT et H.

---

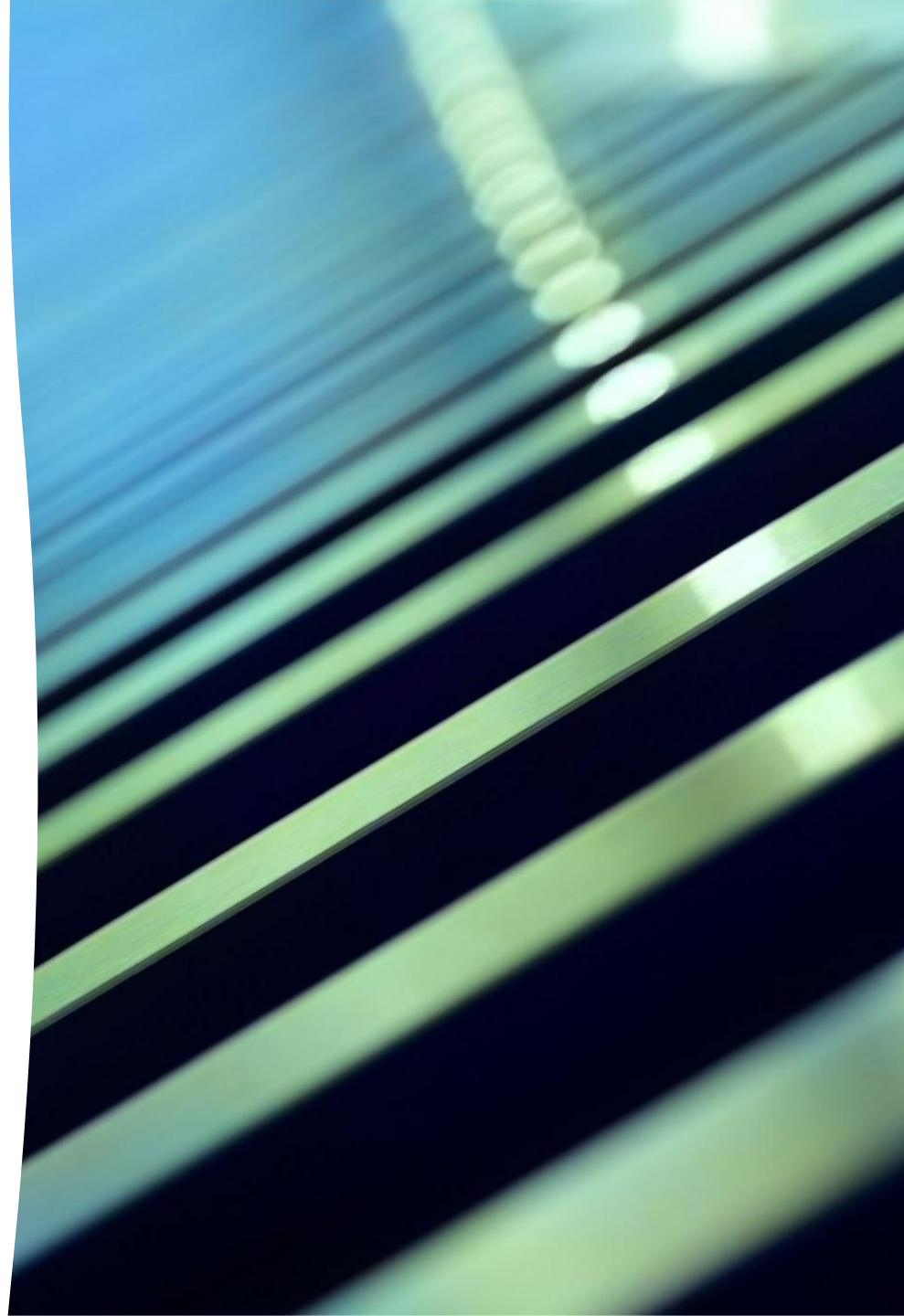
3. Alice mesure ses qubits et envoie les résultats à Bob.

---

4. Bob applique une correction (X/Z) selon les résultats.

---

Résultat : l'état d'Alice est recréé chez Bob.





# Incertitude et mesure

---

Dans Quirk, appliquez une porte H puis mesurez.

---

Répétez plusieurs fois : résultats différents.

---

Cela illustre l'incertitude d'Heisenberg.

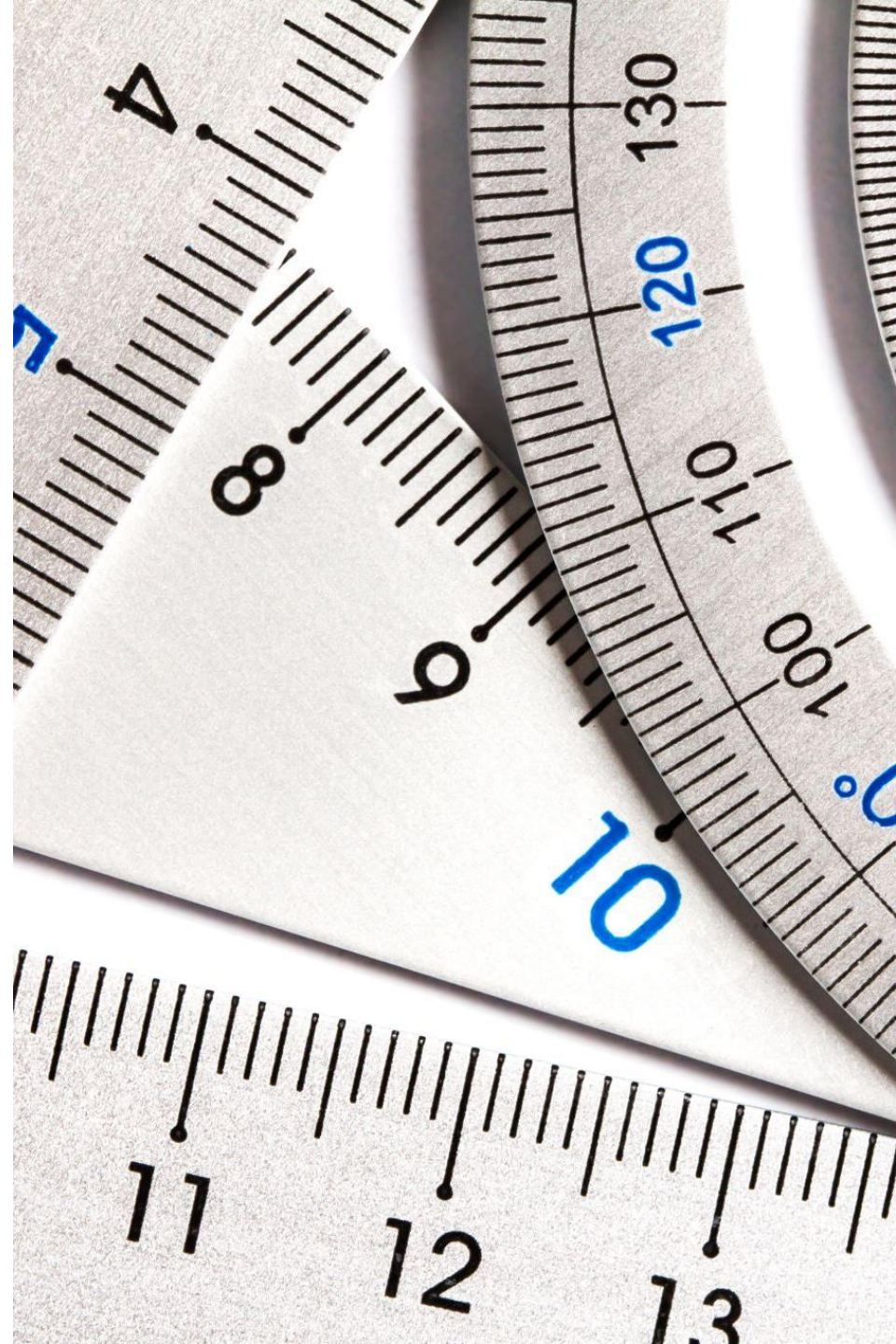
---

Le résultat individuel est imprévisible, mais les statistiques suivent  $|\Psi|^2$ .



# Probabilités de Born

- En répétant 100 fois la mesure d'un état  $|+\rangle$ , on obtient environ 50 fois  $|0\rangle$  et 50 fois  $|1\rangle$ .
- Cela illustre la règle de Born.
- Le hasard individuel devient une loi statistique à grande échelle.



# Antimatière et Dirac

---

L'équation de Dirac prédit des solutions négatives.

---

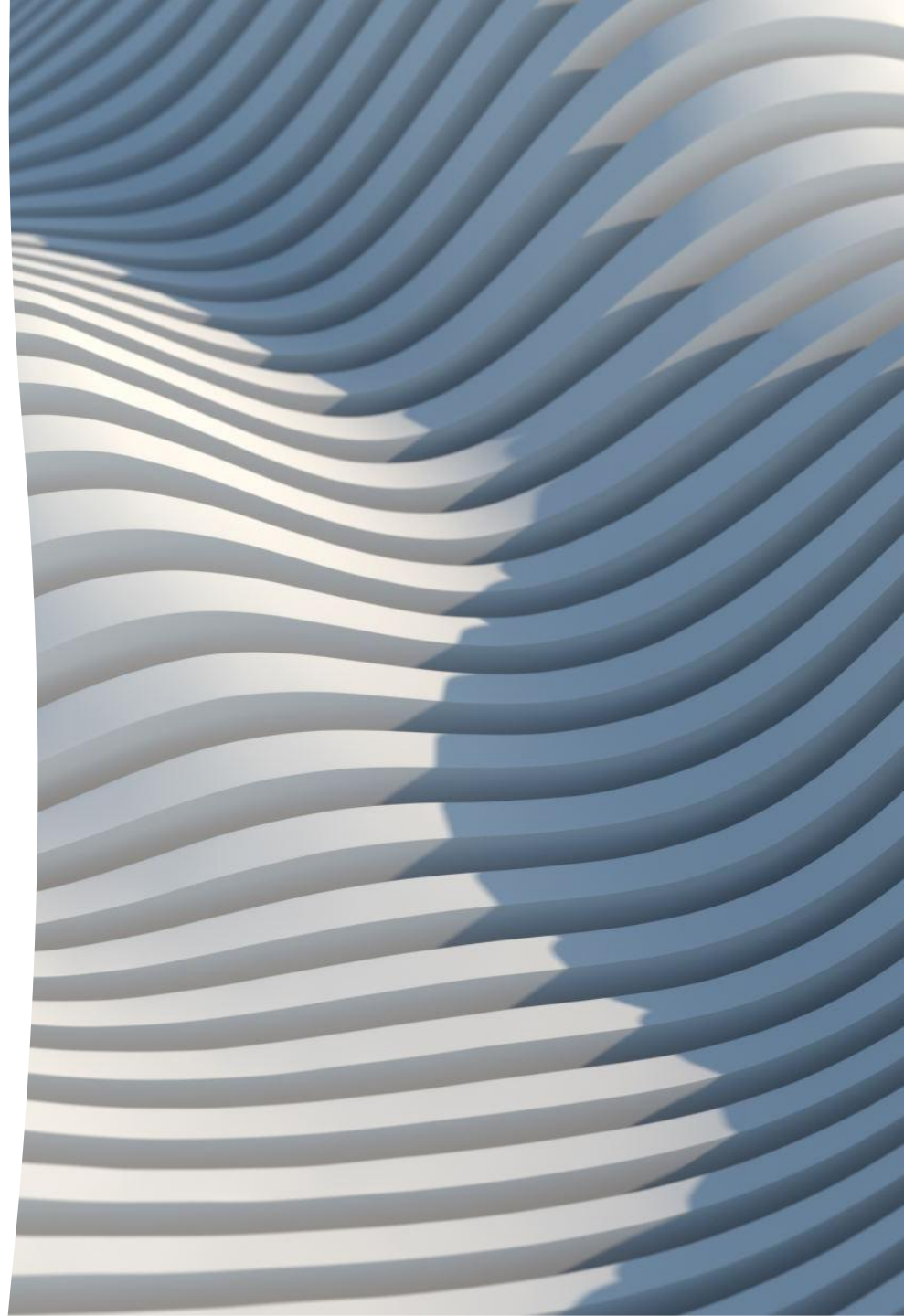
Interprétées comme particules d'antimatière.

---

Aujourd'hui : utilisées dans les PET scans (médecine).

---

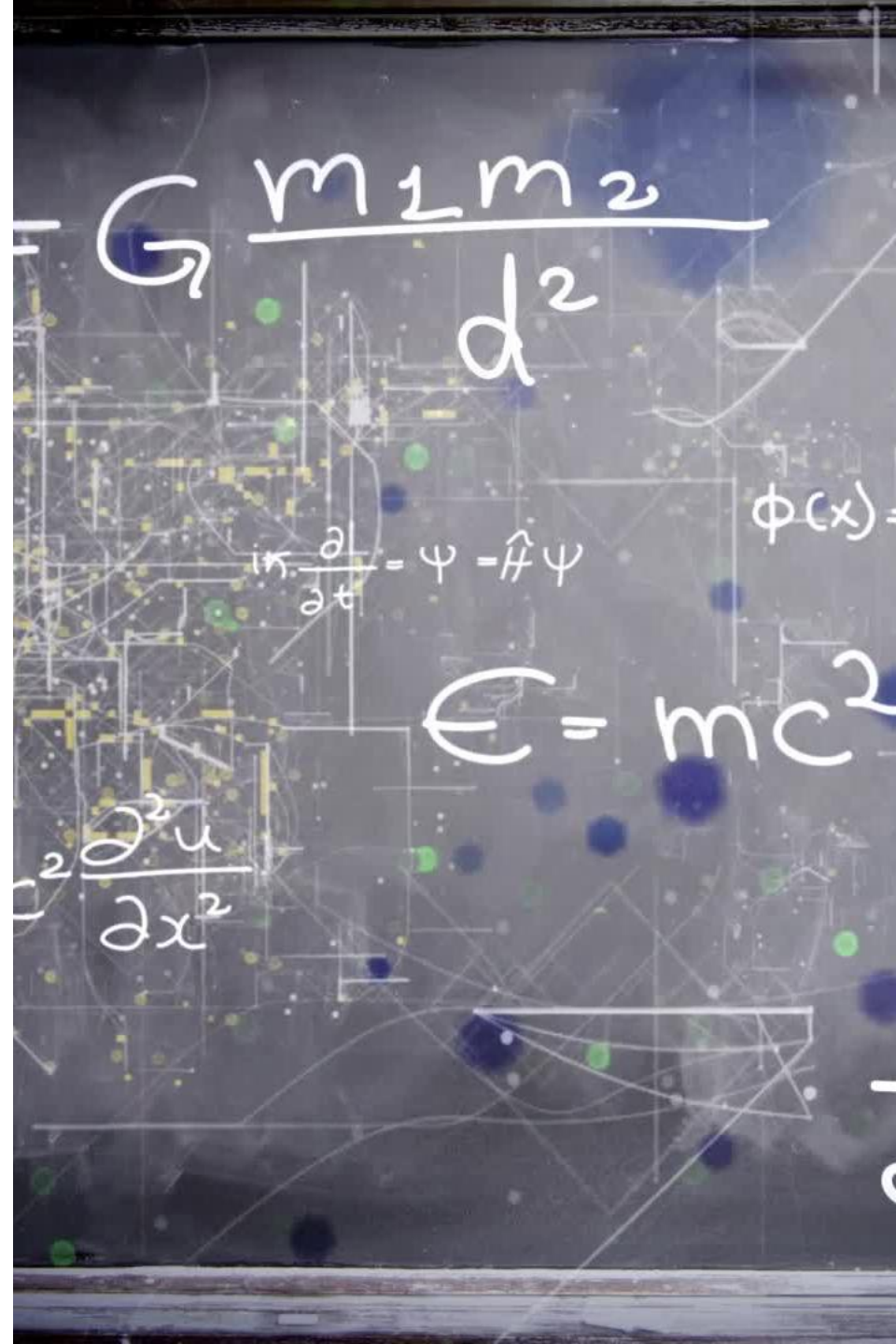
Lien direct entre théorie abstraite et application médicale.





# Intrication comme ressource

- L'intrication permet :
- - Téléportation quantique.
- - Cryptographie quantique.
- - Calcul parallèle massif.
- C'est le 'carburant' des algorithmes quantiques.



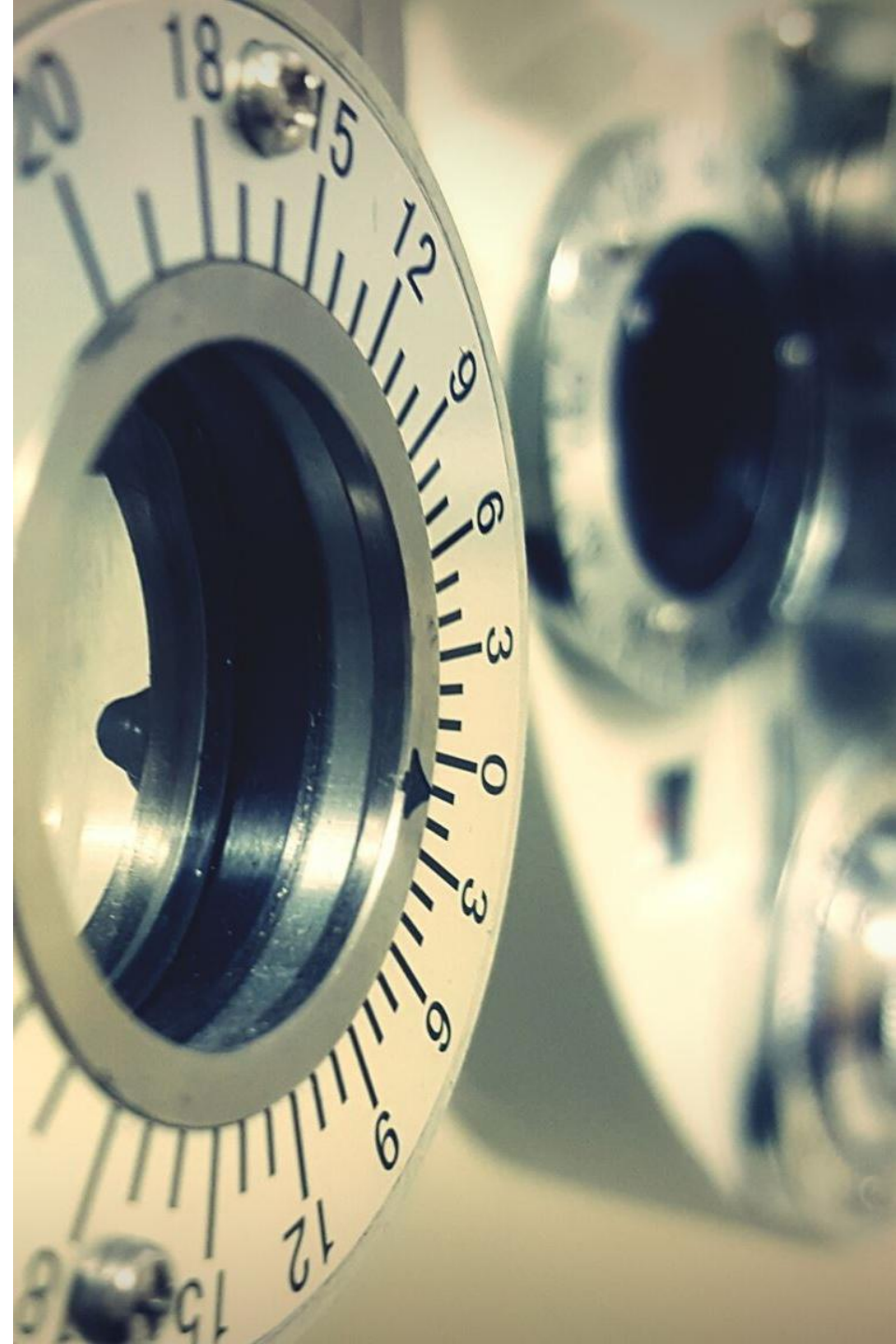
# Téléportation quantique

- Exemple : Alice téléporte un état à Bob.
- Sans transmettre physiquement le qubit.
- Nécessite : intrication + communication classique.
- Application : réseaux quantiques sécurisés.



# Limites de la mesure

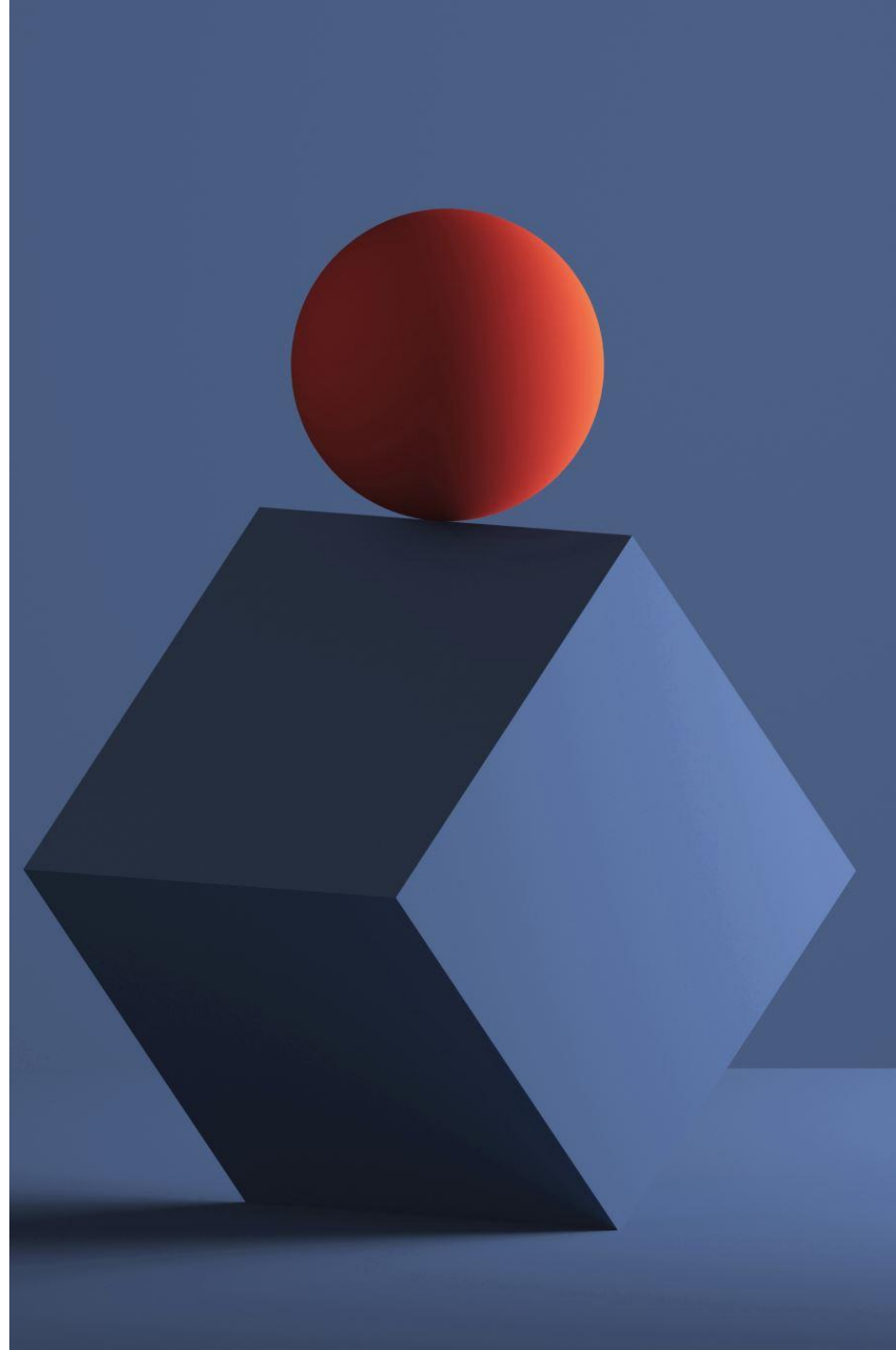
- Mesurer détruit la superposition.
- On ne peut pas cloner un état inconnu.
- Ceci impose des limites aux copies de qubits.
- Conséquence : sécurité intrinsèque des communications quantiques.





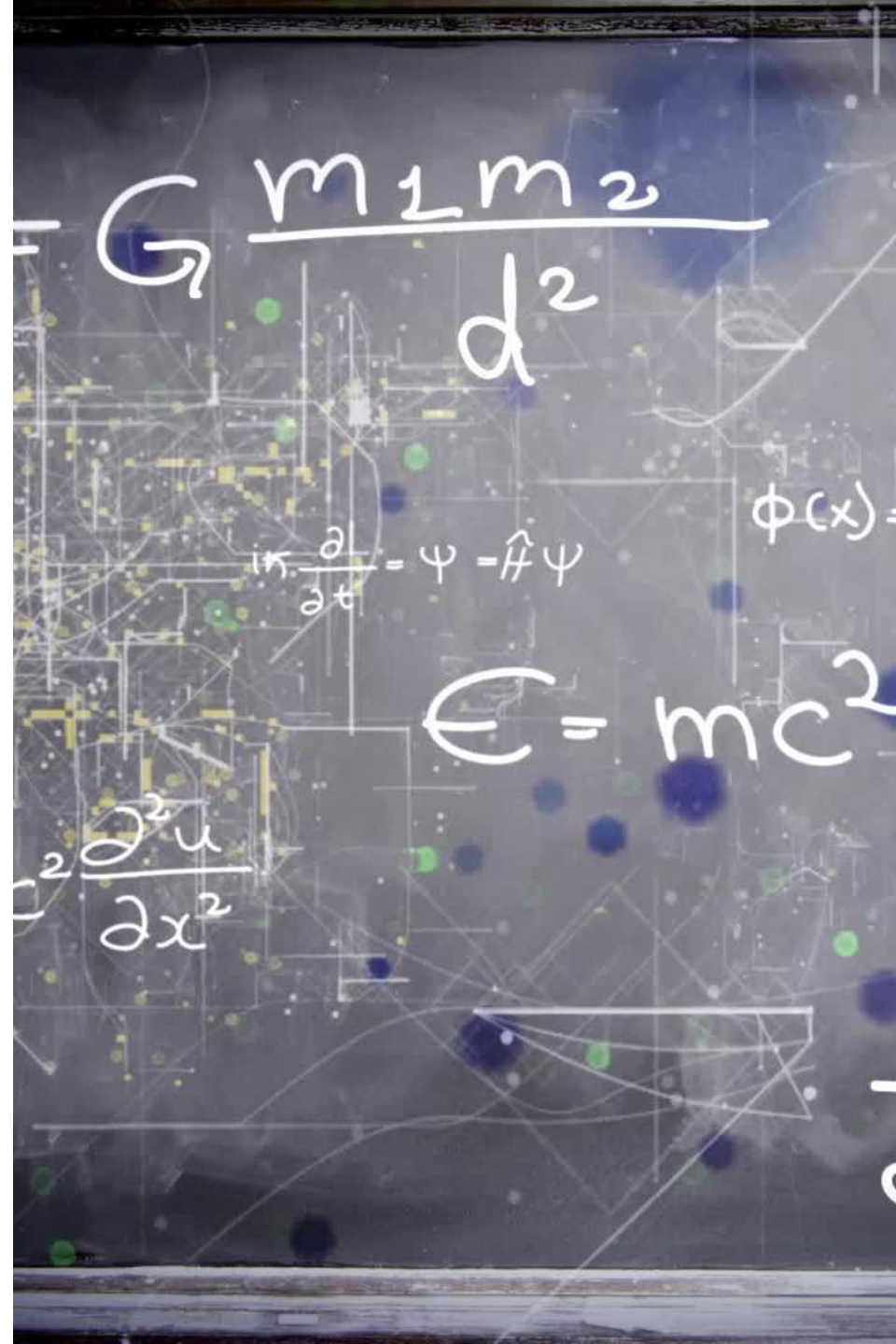
# Synthèse : qubit et sphère de Bloch

- Un qubit = superposition d'états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ .
- La sphère de Bloch offre une visualisation géométrique.
- Portes = rotations sur cette sphère.



# Synthèse : H et CNOT

- Hadamard = création de superposition.
- CNOT = création de corrélations.
- Ensemble, elles créent l'intrication.
- Base de circuits plus complexes.



# Synthèse : Heisenberg, Dirac, Born

---

Heisenberg : incertitude  
fondamentale.

---

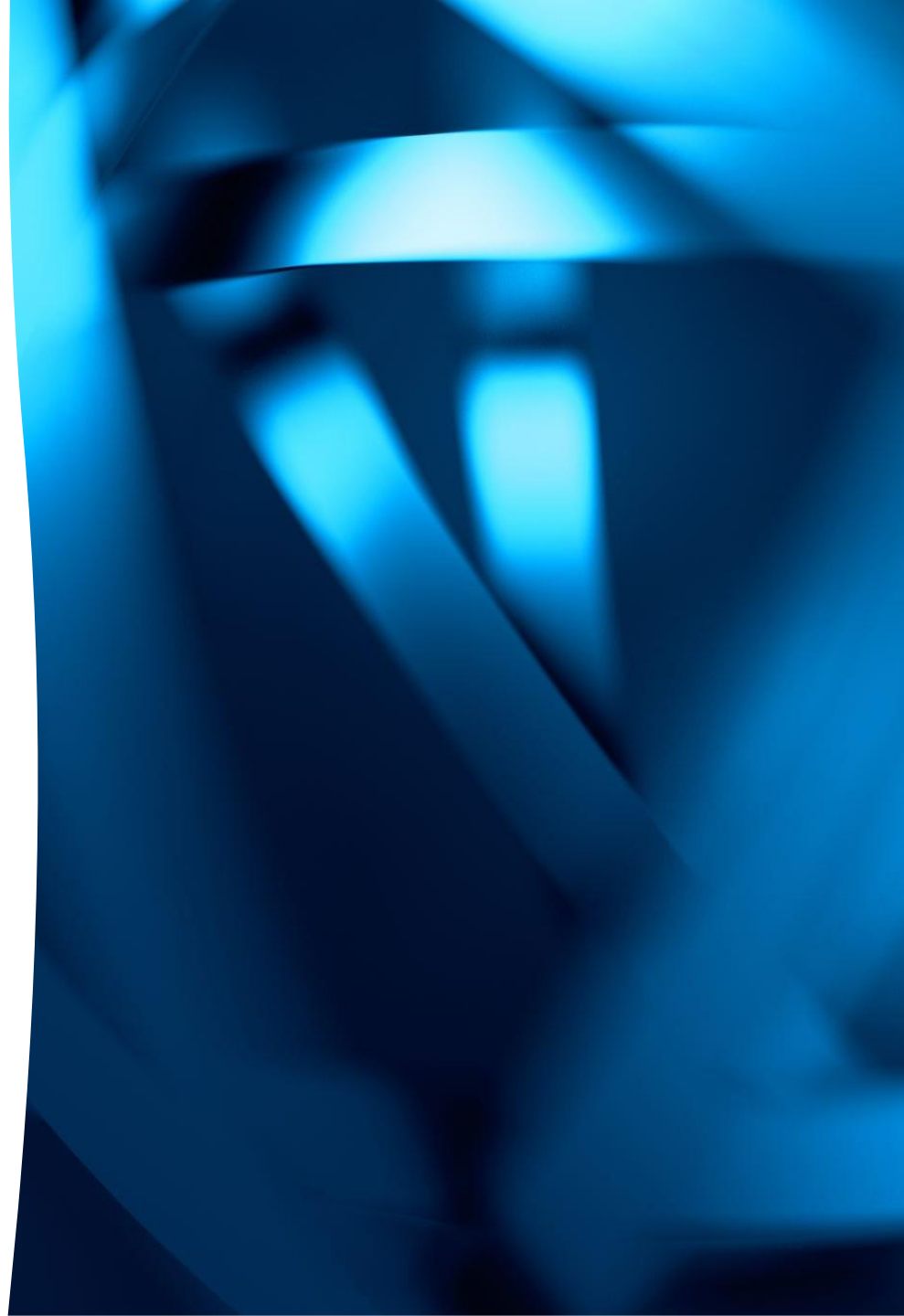
Dirac : prédiction de  
l'antimatière.

---

Born : interprétation  
probabiliste de la MQ.

---

Trois piliers théoriques  
fondamentaux.





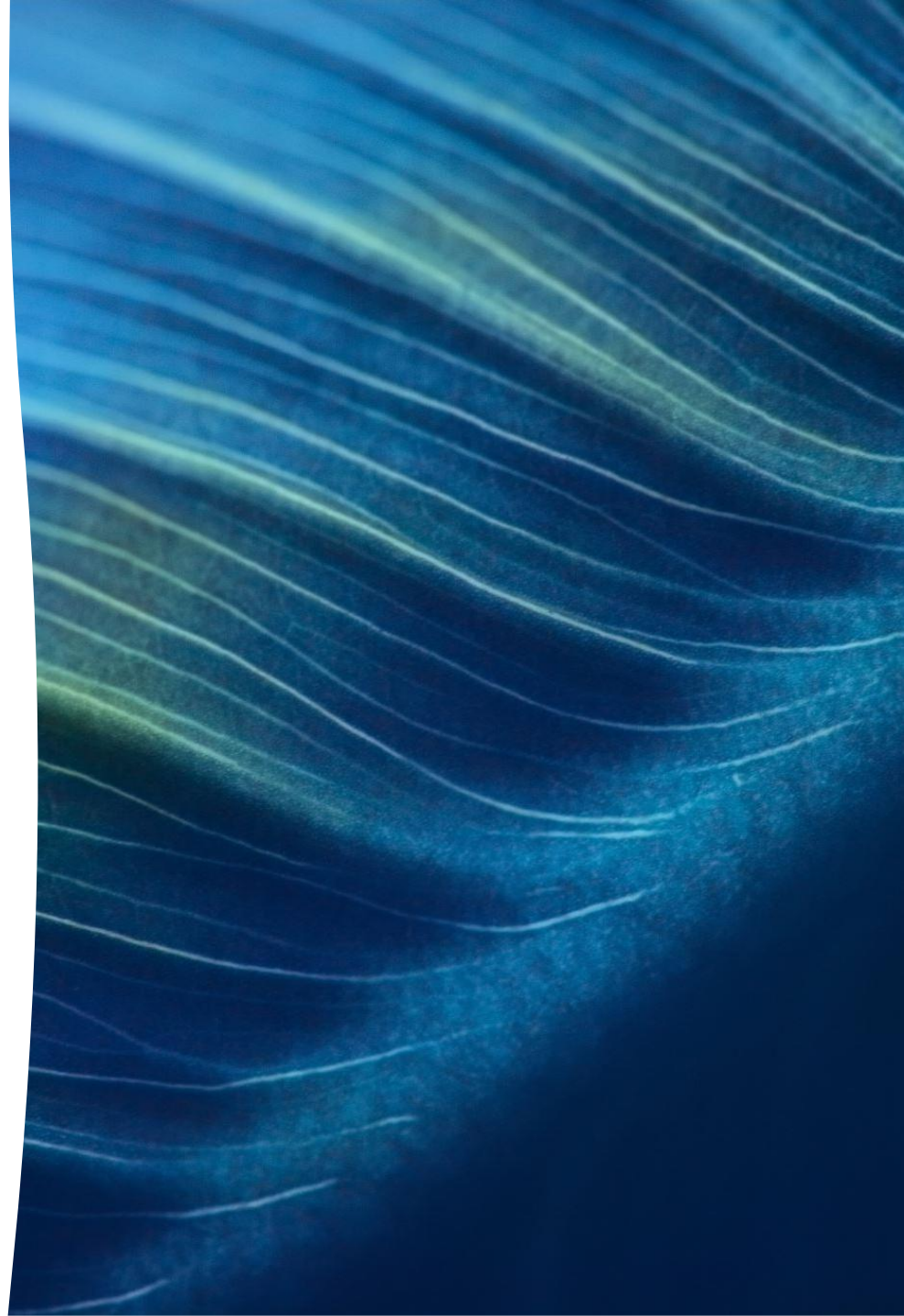
# Synthèse : missions

---

Vous avez pratiqué :

- 
- Superposition (H).
- 
- Intrication (H+CNOT).
- 
- Téléportation quantique.
- 
- Équivalences de portes.
- 

Les codes des qubits n'ont plus de secret.



# Badge obtenu

---

Vous êtes devenus Décrypteurs  
des Qubits 🗝️.

---

Un second fragment du Bouclier  
Quantique vous appartient et  
10 Nouvelles réponses au QCM

---

Vous pouvez désormais  
manipuler la langue quantique.



# Transition vers Chapitre 3

---

Prochaine étape : Les  
Artefacts Quantique.

---

Vous explorerez la  
créativité et  
l'imagination dans le  
monde quantique.

