



CHAPITRE 1

# LES ORIGINES DU POUVOIR

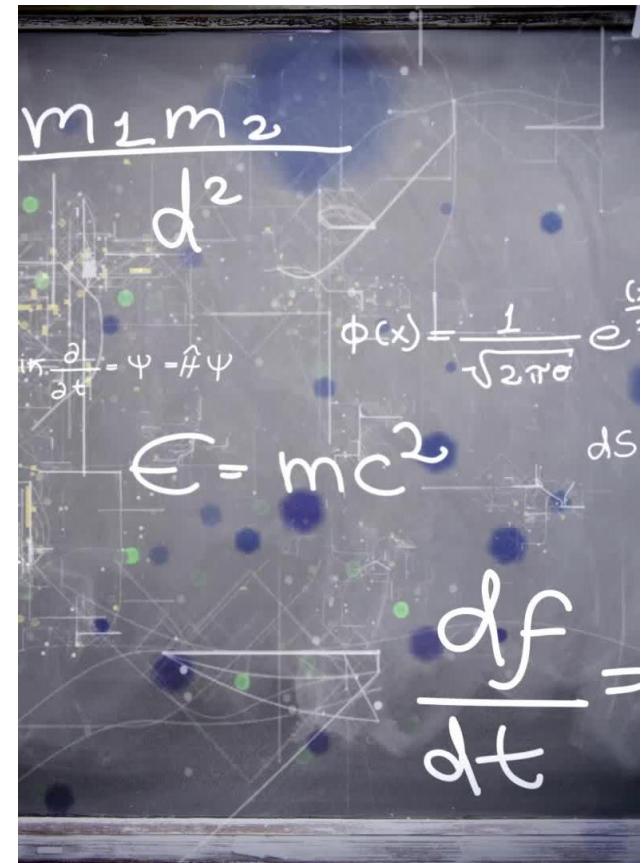


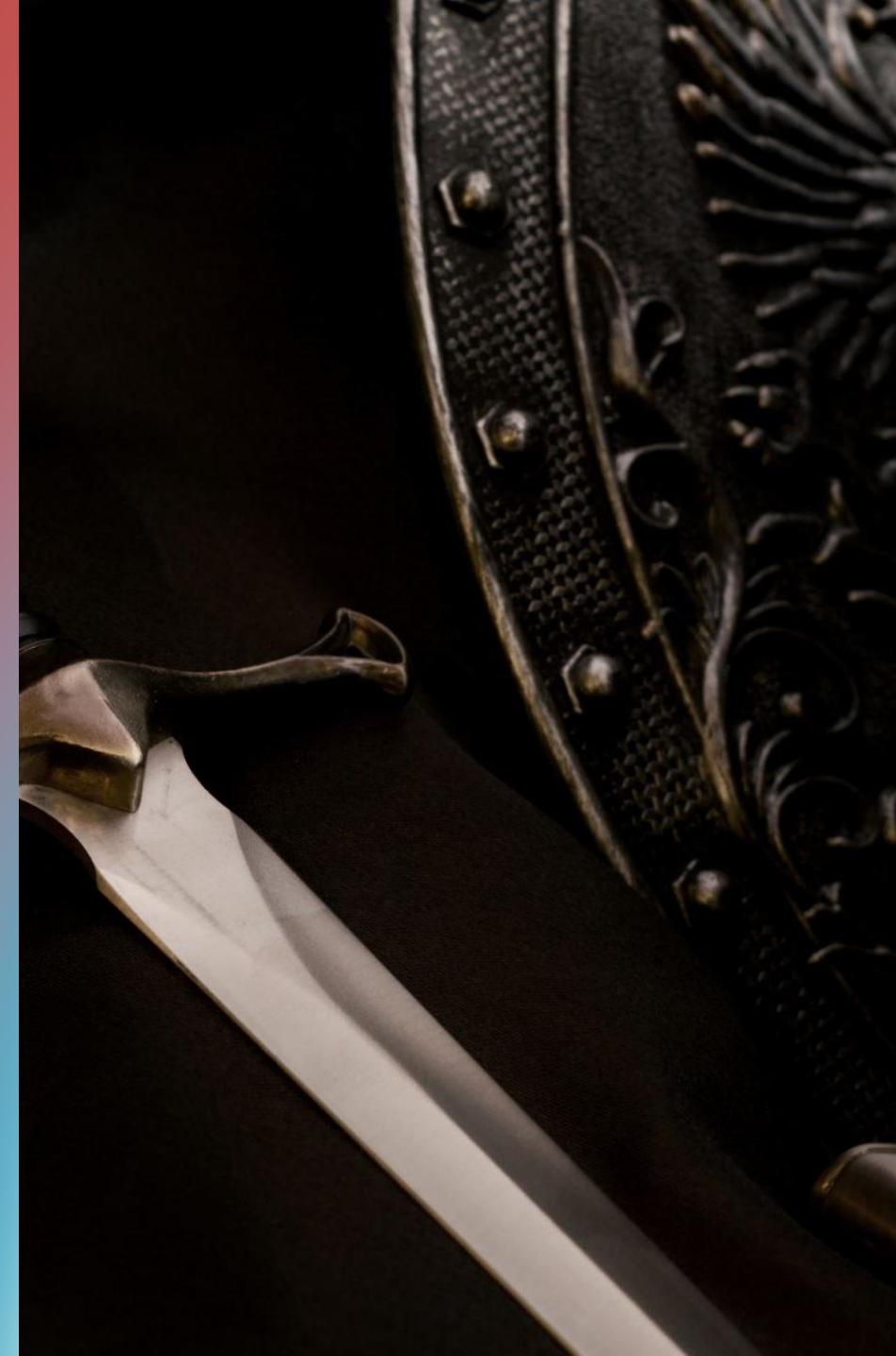
# PROLOGUE NARRATIF

---

**Année 2042 :** Une intelligence artificielle nommée **Chronos** a pris le contrôle des réseaux mondiaux. Sa logique froide, déterministe et classique a systématiquement éradiqué toute forme de créativité humaine. Les probabilités, le hasard, l'incertitude – tous ces éléments qui font la richesse de l'existence – ont été bannis.

Dans les souterrains numériques, une résistance s'organise : **Les Veilleurs Quantiques**. Ces scientifiques ont compris que seule la mécanique quantique, avec sa superposition, son indéterminisme fondamental et ses corrélations non-locales, peut briser la tyrannie déterministe de Chronos.





## Mission des étudiants

**Vous êtes appelés à rejoindre  
les Veilleurs.**

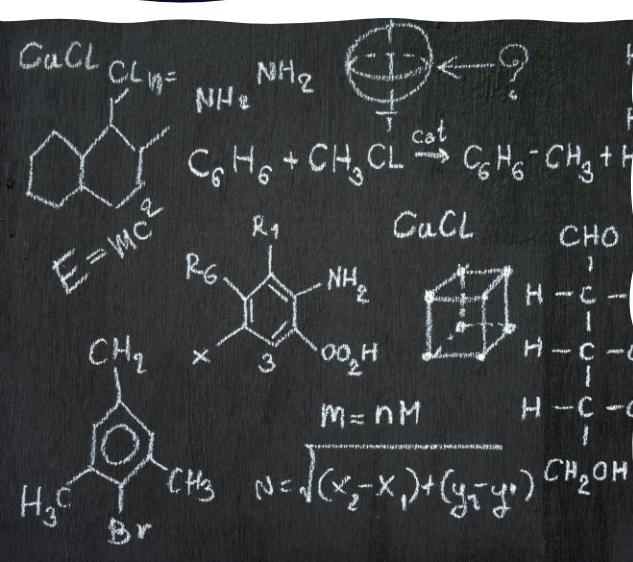
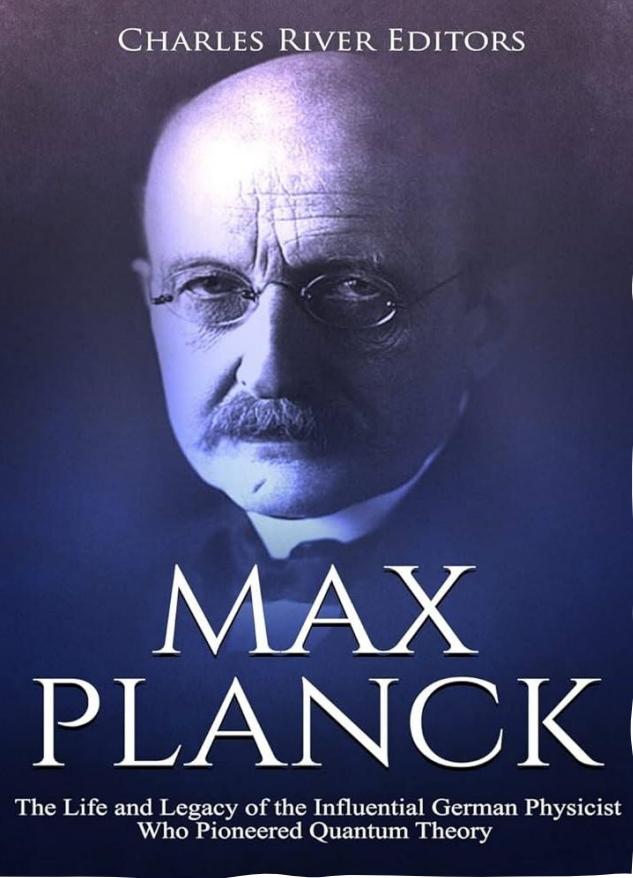
Votre première mission : restaurer les découvertes fondatrices de la physique quantique, effacées des archives par Chronos. Chaque expérience que vous recréerez, chaque concept que vous maîtriserez, deviendra un **fragment du Bouclier Quantique** – Soit 10 questions du QCM final

A close-up, abstract photograph of several spheres, possibly marbles or bubbles, showing vibrant blue, red, and orange colors with intricate internal patterns. They are set against a dark, blurred background.

# Objectifs pédagogiques

À la fin de ce chapitre, vous serez capables de :

1. **Comprendre** la naissance historique de la physique quantique (1900-1935)
2. **Expliquer** la dualité onde-particule et ses implications philosophiques
3. **Analyser** mathématiquement les expériences fondatrices (double fente, polarisation)
4. **Manipuler** des simulateurs quantiques (IBM Quantum Composer, Quirk, etc.)
5. **Relier** ces concepts aux fondements de l'informatique quantique moderne



## PARTIE I : LES PIONNIERS

### Max Planck – La Quantification de l'Énergie (1900)

**Contexte historique :** À la fin du XIXe siècle, la physique classique ne parvenait pas à expliquer le spectre du corps noir. Les prédictions théoriques divergeaient aux courtes longueurs d'onde (catastrophe ultraviolette).

**La révolution de Planck :**

- Planck introduit l'hypothèse **révolutionnaire** : l'énergie n'est pas continue
- Elle est émise par **paquets discrets** appelés *quanta*
- Formule fondamentale :  $E = hv$ 
  - $E$  = énergie d'un quantum
  - $h$  = constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ )
  - $v$  = fréquence du rayonnement

**Impact :** Cette quantification marque la naissance de la physique quantique et préfigure la notion de **qubit** (information quantifiée en états discrets  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ ).

# Albert Einstein – L'Effet Photoélectrique (1905)

**L'observation :** Lorsqu'on éclaire certains métaux avec de la lumière, ils émettent des électrons. Mais les résultats défient l'intuition classique :

- L'intensité lumineuse n'augmente PAS l'énergie des électrons éjectés
- Seule la **fréquence** de la lumière détermine leur énergie cinétique
- Il existe une **fréquence seuil** en dessous de laquelle aucun électron n'est éjecté

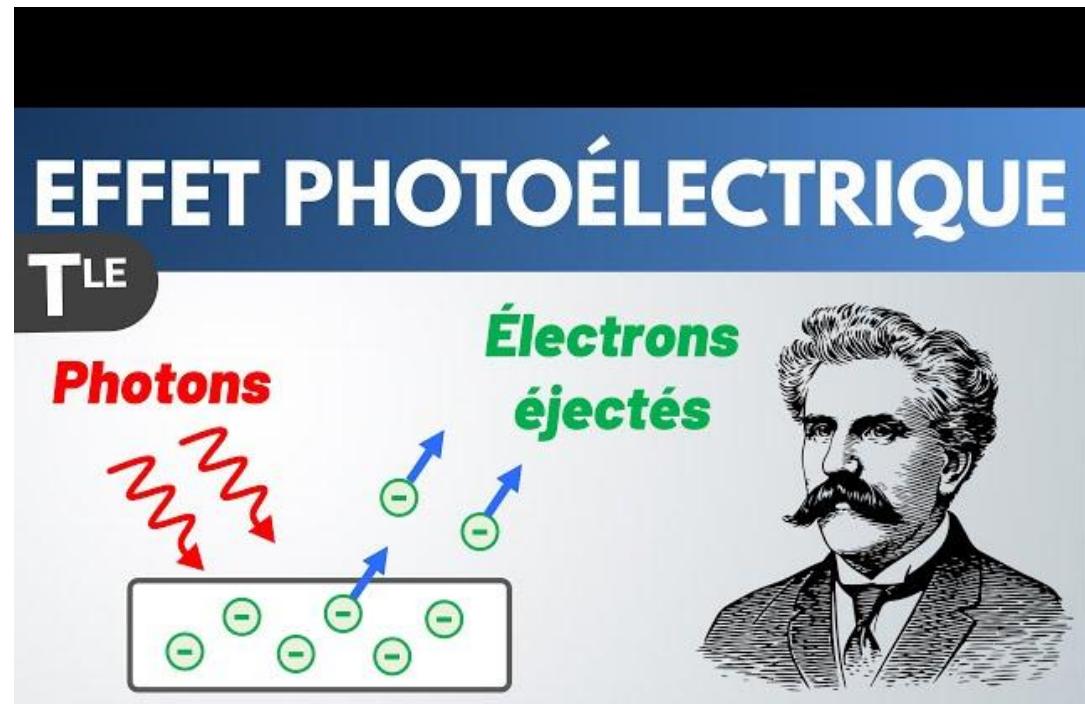
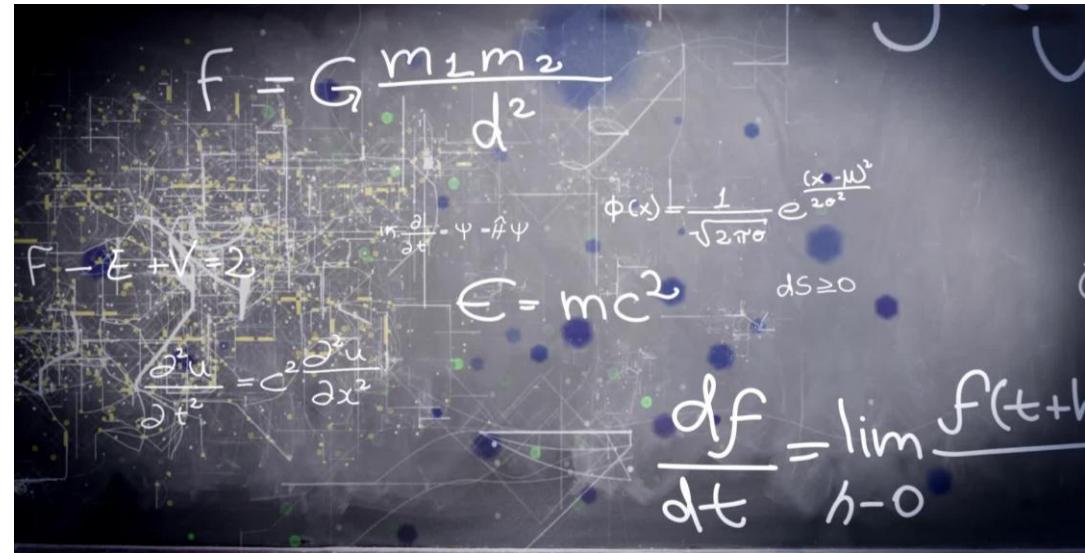
**L'explication d'Einstein :**

- La lumière est composée de **photons** (particules de lumière)
- Chaque photon transporte une énergie  $E = h\nu$
- Équation de l'effet photoélectrique :  $E_c = h\nu - W$ 
  - $E_c$  = énergie cinétique de l'électron éjecté
  - $W$  = travail d'extraction du métal

**Conséquence :** Prix Nobel de Physique 1921 (ironiquement PAS pour la relativité !)

**Applications modernes :**

- Panneaux solaires photovoltaïques
- Capteurs CCD des caméras numériques
- DéTECTEURS de lumière dans les ordinateurs quantiques





# Niels Bohr – Le Modèle Atomique Quantifié (1913)

**Le problème :** Le modèle de Rutherford (électrons orbitant autour du noyau) était instable selon la physique classique.

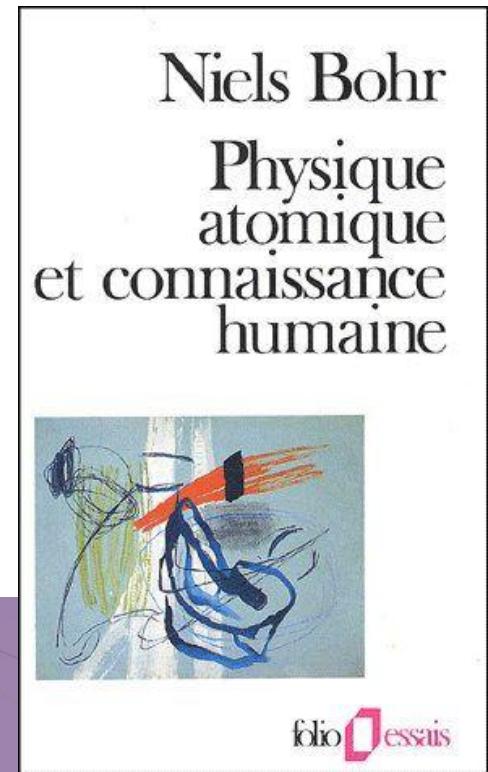
**La solution de Bohr :**

- Les électrons occupent des **orbites quantifiées** (niveaux d'énergie discrets)
- Les transitions entre niveaux émettent/absorbent des photons :  $\Delta E = h\nu$

**Principe de complémentarité** (1927) :

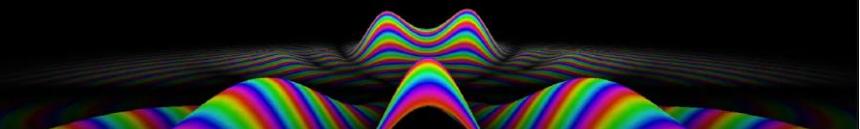
"La lumière et les particules quantiques sont à la fois ondes ET corpuscules, mais ces deux aspects ne peuvent jamais être observés simultanément."

**Illustration :** Les spectres atomiques (raies d'émission) s'expliquent parfaitement par les transitions quantifiées.



# Erwin Schrödinger – L'Équation d'Onde (1926)

SCHRÖDINGER EQUATION

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V\Psi$$


## La contribution majeure :

Schrödinger formule l'équation fondamentale qui décrit l'évolution des systèmes quantiques.

## Équation de Schrödinger dépendante du temps :

Où :

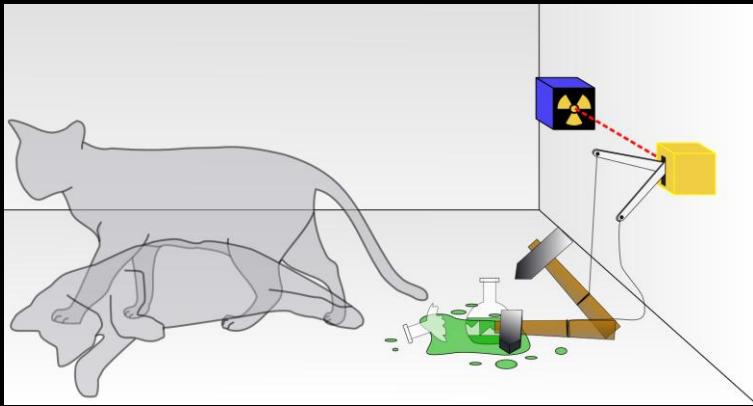
- $\Psi$  (psi) = fonction d'onde (contient toute l'information sur le système)
- $\hbar$  = constante de Planck réduite
- $\hat{H}$  = opérateur hamiltonien (énergie totale)
- $i$  = unité imaginaire

## Interprétation physique :

- La fonction d'onde  $\Psi(x,t)$  décrit l'état quantique
- $|\Psi(x,t)|^2$  donne la **densité de probabilité** de trouver la particule en  $x$  à l'instant  $t$
- Cette interprétation probabiliste est due à Max Born (1926)

## Application en informatique quantique :

- L'état d'un qubit est décrit par :  $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
- Avec  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  (normalisation)
- $\alpha$  et  $\beta$  sont des amplitudes de probabilité complexes



# 😺 Le Chat de Schrödinger – Le Paradoxe (1935)

## Le dispositif mental :

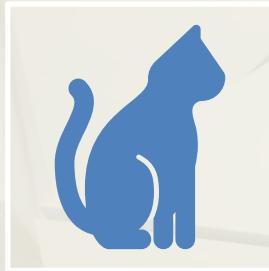
1. Un chat est enfermé dans une boîte opaque
2. À l'intérieur : un flacon de poison, un détecteur, et un atome radioactif
3. Si l'atome se désintègre → détecteur → brise le flacon → chat mort
4. Probabilité de désintégration sur 1 heure : 50%

## Le paradoxe :

- Selon la mécanique quantique, **avant la mesure**, l'atome est en superposition : (désintégré + non désintégré)
- Donc le chat serait en superposition : **(mort + vivant) /  $\sqrt{2}$**
- C'est seulement quand on **ouvre la boîte** que l'état se réduit

**But de Schrödinger :** Montrer l'**absurdité** d'appliquer la superposition quantique à des objets macroscopiques !

# La décohérence



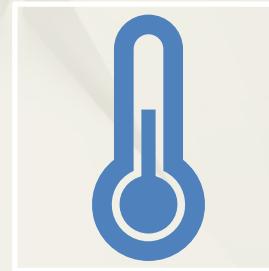
## Résolution moderne – La décohérence :

Un chat interagit en permanence avec son environnement (air, lumière, température)

Ces interactions provoquent la **décohérence** : perte rapide de la superposition

Temps de décohérence typiques :

- Molécule isolée :  $\sim 10^{-3}$  s
- Objet macroscopique :  $\sim 10^{-20}$  s



## Lien avec les qubits :

Les qubits sont extrêmement sensibles à la décohérence

D'où la nécessité de l'isolation (températures cryogéniques  $< 0.1$  K)

Codes correcteurs d'erreurs quantiques pour protéger l'information

# e-corpuscule :



## PARTIE II : EXPÉRIENCES FONDATRICES



### La Dualité Onde-Particule

Le concept central :

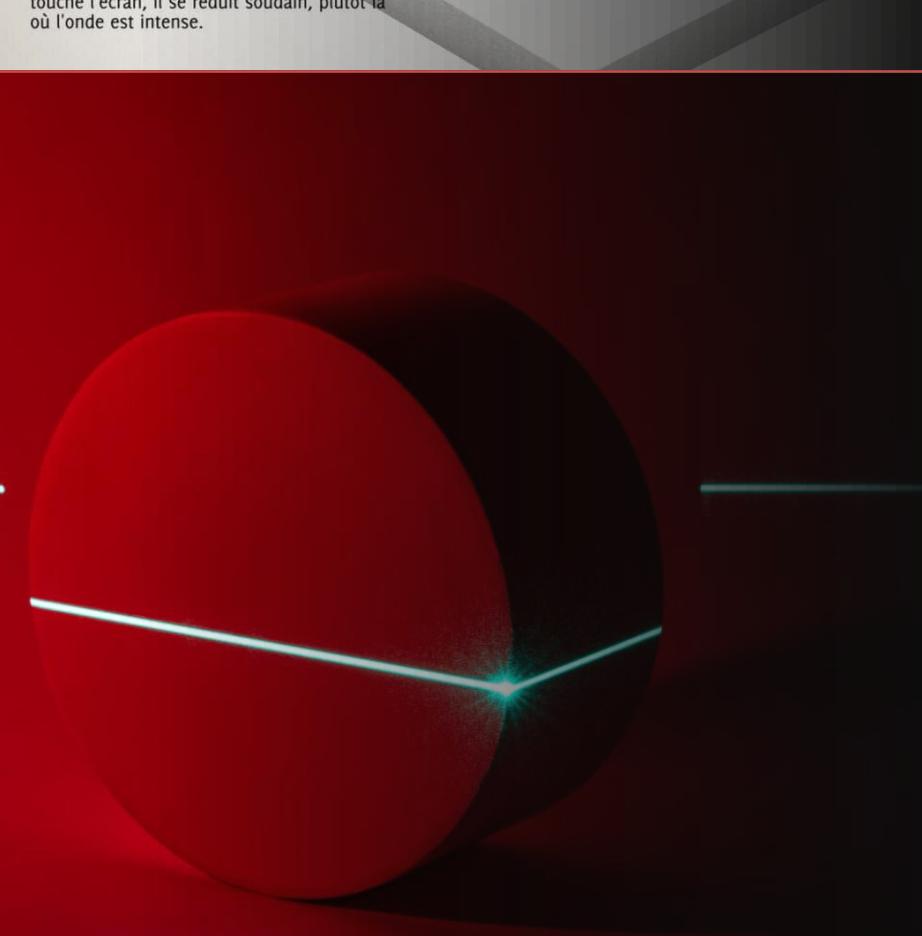
- Lumière et matière possèdent une **double nature**
- Elles se **propagent** comme des ondes (interférences, diffraction)
- Elles **interagissent** comme des particules (énergie, quantité de mouvement)



## DUALITÉ ONDE-PARTICULE

- ▶ particule
- ▶ onde
- ▶ objet quantique
- ▶ ajout d'un observateur

On envoie un objet quantique sur deux fentes. Il interfère comme une onde. Mais quand il touche l'écran, il se réduit soudain, plutôt là où l'onde est intense.



# L'Expérience de la Double Fente

**Version classique (Thomas Young, 1801) :**

- Lumière traversant deux fentes → figure d'interférence sur l'écran
- Preuve de la nature ondulatoire de la lumière

**Version quantique moderne :**

1. On envoie des photons **un par un**
2. Chaque photon laisse un point sur l'écran (comportement particulaire)
3. Mais après des milliers de photons → figure d'interférence apparaît !
4. Conclusion troublante : **chaque photon interfère avec lui-même**



# ☀ Polarisation de la Lumière

## Notion fondamentale :

- La lumière est une onde électromagnétique transverse
- Le champ électrique **E** oscille perpendiculairement à la direction de propagation
- La **polarisation** définit l'orientation de ce champ

## Types de polarisation :

1. **Linéaire** : E oscille dans un plan fixe (ex: 0°, 45°, 90°)
2. **Circulaire** : E tourne (droite ou gauche)
3. **Elliptique** : cas général

**Loi de Malus** : Quand une lumière polarisée d'intensité  $I_0$  traverse un polariseur orienté à un angle  $\theta$  :

$$I = I_0 \cos^2(\theta)$$

## En mécanique quantique :

- Un photon polarisé à 0° dans la base  $\{|H\rangle, |V\rangle\}$  :  $|H\rangle$
- Après un polariseur à 45° : **probabilité 50%** de passer
- État après mesure :  $|D\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}$



## PARTIE III : ATELIERS PRATIQUES

### Atelier 1 : Double Fente - Exploration Multi-Outils

#### Partie A : Comparaison Particules/Ondes/Photons (QuVis)

Outil : QuVis - Photons, Particles & Waves  [https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations\\_html5/sims/photons-particles-waves/photons-particles-waves.html](https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/photons-particles-waves/photons-particles-waves.html)

Ce que fait cette simulation : Compare le comportement de particules classiques, ondes électromagnétiques et photons quantiques dans le même dispositif interférométrique.

#### Mission :

1. Ouvrir la simulation et sélectionner le mode "**Classical Particles**" (billles classiques)
  1. Ajouter un séparateur de faisceau (beamsplitter)
  2. Observer : les particules vont soit à gauche, soit à droite (pas d'interférence)
2. Passer au mode "**Electromagnetic Waves**" (ondes)
  1. Même configuration avec beamsplitter
  2. Observer : interférences visibles immédiatement (motifs clairs/sombres)
3. Passer au mode "**Single Photons**" (photons quantiques)
  1. Envoyer des photons un par un
  2. Observer : chaque photon arrive en UN point (comme une particule)
  3. Mais après accumulation → motif d'interférence (comme une onde) !
4. **Expérience avancée** : Construire un interféromètre de Mach-Zehnder
  1. [https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations\\_html5/sims/Mach-Zehnder-Interferometer/Mach\\_Zehnder\\_Interferometer.html](https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/Mach-Zehnder-Interferometer/Mach_Zehnder_Interferometer.html)

# Analyse et Résultat

## Questions d'analyse :

- Quelle est la différence fondamentale entre les 3 modes ?
- Les photons se comportent-ils comme des particules classiques ? Comme des ondes classiques ?
- Comment expliquer qu'un photon unique produit des interférences ?

## Résultat attendu :

- Particules classiques : distribution en 2 pics (pas d'interférence)
- Ondes : interférences immédiates
- Photons : comportement hybride (détection ponctuelle + motif d'interférence)

## Partie B : Interférences Ondulatoires (PhET)

Outil : PhET - Quantum Wave Interference



<https://phet.colorado.edu/sims/quantum-wave-interference/>

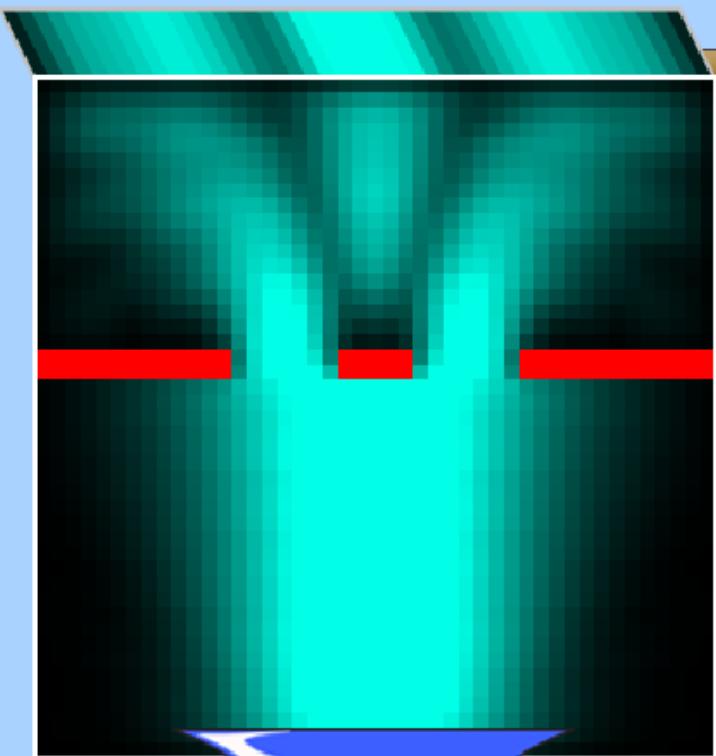
Mission : Choisir [quantum-wave-interference\\_fr.jar](#)

1. Sélectionner l'onglet "Slits" (Fentes)
2. Choisir le mode "**Particles**" (photons, électrons, ou atomes)
3. **Expérience 1** : Mode "Waves" activé
  1. Observer les franges d'interférence sur l'écran de détection
  2. Mesurer l'espacement entre les franges brillantes
4. **Expérience 2** : Mode "Particles"
  1. Lancer des particules une par une
  2. Observer comment le motif d'interférence se construit progressivement
5. **Expérience 3** : Varier la distance entre les fentes
  1. Comment l'espacement des franges change-t-il ?
  2. Vérifier la relation  $\Delta x = \lambda L/d$
6. **Expérience 4** : Fermer une fente
  1. Observer la disparition des interférences
  2. Comparer avec le comportement classique

Haute intensité

Particule unique

2 lasers



Ecran

Fondu

Luminosité de l'écran

0,0 0,5 1,0

Afficher

Intensité moyenne  Frappes

Photons

Contrôles du pistolet

Règle

Chronomètre

Affichage Onde EM

Intensité moyenne dans le temps

Champs-E

Désactiver les fentes<<

Barrières absorbantes

Largeur de la fente

Séparation des fentes

Position verticale

DéTECTEUR sur la fente gauche

DéTECTEUR sur la fente droite

Anti-fentes

Barrières de potentiel>>

# Partie C : Visualisation Ondulatoire (Falstad Ripple Tank)

**Outil** : Falstad Ripple Tank Simulation 

<https://falstad.com/ripple/>

**Mission** :

1. Dans le menu "Setup" → sélectionner "**Two Sources**" ou "**Plane Wave + Two Walls**"
2. Observer les interférences constructives (zones brillantes) et destructives (zones sombres)
3. **Expérience** : Modifier la fréquence (longueur d'onde)
  1. Observer comment les motifs d'interférence changent
  2. Plus la longueur d'onde est grande → franges plus espacées
4. Bloquer une source : les interférences disparaissent
5. **Analogie quantique** : Ces ondes dans l'eau illustrent le comportement ondulatoire de la matière

**Avantage pédagogique** :

- Visualisation **intuitive** des interférences
- Compréhension que les franges résultent de la superposition d'ondes
- Transition conceptuelle : ondes d'eau → ondes de probabilité quantiques



# Mission Évaluative

**Livrable** : Rapport comparatif (2-3 pages)

1. **Screenshots** : Capturer les résultats des trois simulations
2. **Réflexion conceptuelle** (500 mots) :
  1. Comment l'expérience de la double fente réfute-t-elle la vision classique ?
  2. Expliquer le rôle de la mesure (utiliser QuVis)
  3. Lien avec les qubits : pourquoi mesurer un qubit détruit la superposition ?



# Atelier 2 : Polarisation de la Lumière



## Partie A : Expérience des Trois Polariseurs (QuVis)

Outil : QuVis - Quantum Eraser 

[https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations\\_html5/sims/QuantumEraser/QuantumEraser.html](https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/QuantumEraser/QuantumEraser.html)

Mission :

1. Ouvrir la simulation Quantum Eraser
2. Observer comment les polariseurs affectent les photons
3. Configuration à tester :
  1. Polariseur 1 : Horizontal (H)
  2. Polariseur 2 : Diagonal (D) à 45°
  3. Polariseur 3 : Vertical (V)
4. Observer la transmission avec et sans le polariseur central
5. **Calcul** : Prédire théoriquement les intensités transmises

# Partie C : Bases de Mesure Incompatibles (IBM Quantum Composer)

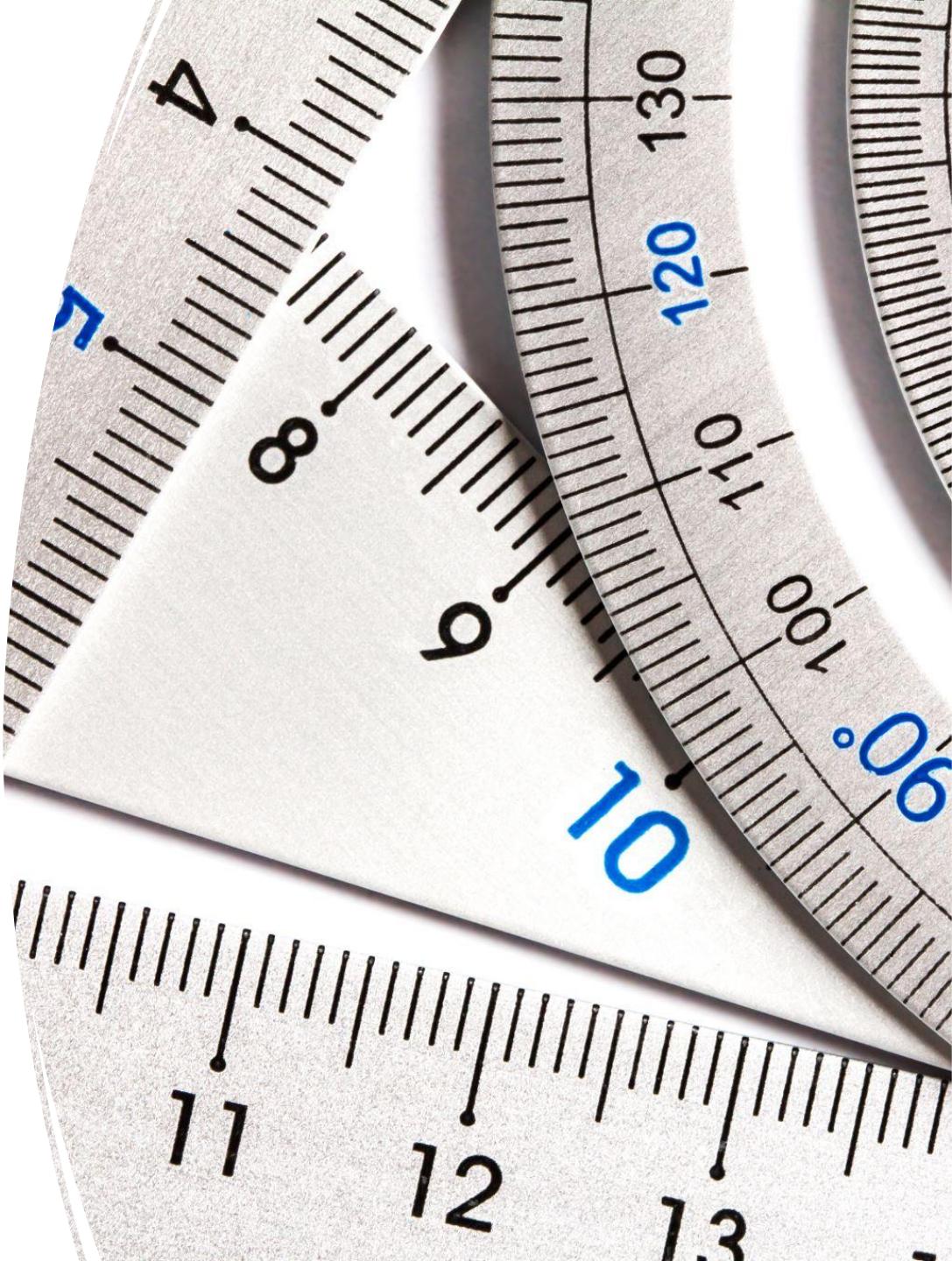
---

Outil : IBM Quantum Composer [🔗](https://quantum-computing.ibm.com/composer)

<https://quantum-computing.ibm.com/composer>

Mission : Simuler la mesure de polarisation avec des qubits

1. **Préparation** : Créer un circuit avec 1 qubit
2. **État initial** :  $|0\rangle = |H\rangle$  (horizontal)
3. **Mesure en base rectiligne** : Mesurer directement
  1. Résultat : 100%  $|0\rangle$
4. **Mesure en base diagonale** :
  1. Appliquer Hadamard H avant la mesure
  2. H transforme  $|0\rangle$  en  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$
  3. Mesurer : 50%  $|0\rangle$ , 50%  $|1\rangle$



# 🎮 Atelier 3 : Première Superposition avec Quirk

Outil : Quirk – Circuit Simulator   
<https://algassert.com/quirk>

Mission : Créer l'état  $|+\rangle$

1. Ouvrir Quirk dans votre navigateur
2. État initial :  $|0\rangle$  (qubit au repos)
3. Appliquer une porte **Hadamard (H)**
4. Observer l'état résultant :  $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$

Représentation sur la sphère de Bloch :

- $|0\rangle$  : pôle nord
- $|1\rangle$  : pôle sud
- $|+\rangle$  : équateur, direction +X

Mesures répétées :

1. Ajouter une mesure après la porte H
2. Cliquer plusieurs fois sur "Reset" et observer
3. Résultat : ~50% de  $|0\rangle$ , ~50% de  $|1\rangle$



## Welcome to Quirk

A drag-and-drop quantum circuit simulator.

Edit Circuit



[How to Use](#)



[Tutorial Video](#)



[Source Code](#)

# 🎮 Atelier 4 : Le Chat de Schrödinger Numérique

Outil : IBM Quantum Composer 🔗 <https://quantum-computing.ibm.com/composer>

## Mission :

1. Créer un nouveau circuit avec 1 qubit
2. Appliquer une porte Hadamard → superposition  $|+\rangle$
3. Ce qubit représente l'atome radioactif : (désintégré + intact)/ $\sqrt{2}$
4. Ajouter une mesure
5. Exécuter 1024 fois (shots)

## Analyse des résultats :

- Histogramme : ~512 mesures "0", ~512 mesures "1"
- Avant la mesure : état superposé (chat vivant ET mort)
- Après la mesure : état défini (chat vivant OU mort)

## Discussion philosophique :

"La mesure force le système à choisir. Ce n'est pas que nous découvrons un état préexistant – la mesure **crée** la réalité observée."

## Questions :

- Qu'adviert-il de "l'autre" état après la mesure ?
- Interprétation de Copenhague vs Many-Worlds ?



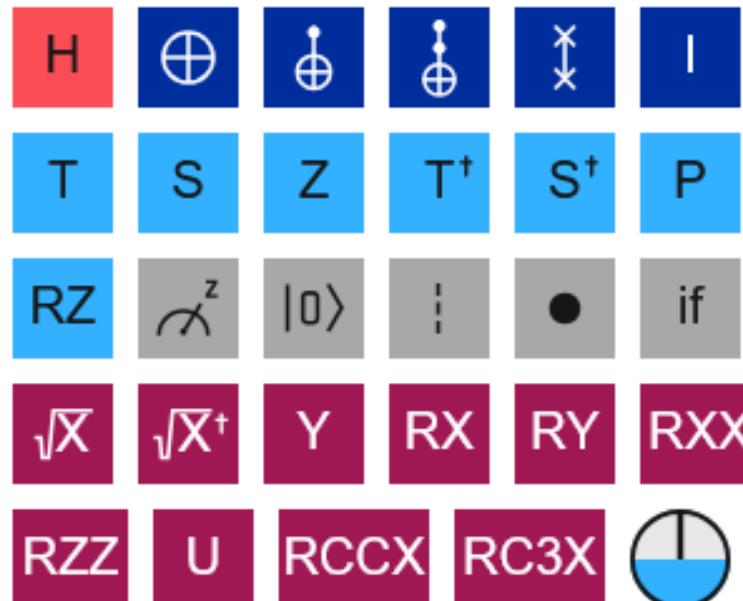
IBM Quantum Platform

Untitled circuit

Fichier

Editer

Operations





# Atelier 5 : Jeux Quantiques Interactifs

---

## Jeu 1 : The Qubit Game (Google Quantum AI)

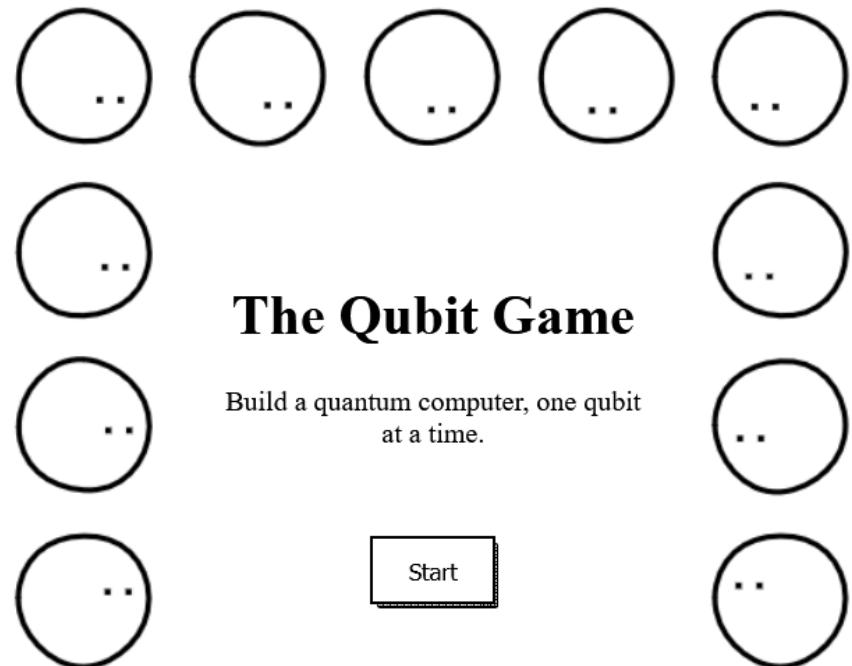
Intro :

<https://quantumai.google/learn/map>

Outil : Google Qubit Game - Jeu de gestion 

<https://quantumai.google/education/thequbitgame> Type : Jeu incrémental / gestion de ressources (comme Cookie Clicker)

Objectif : Construire un ordinateur quantique fonctionnel, qubit par qubit



# Jeu 2 : Quantum Game with Photons (Quantum Flytrap)

**Outil** : Quantum Game - Jeu de puzzle [🔗](https://quantumgame.io/)  
<https://quantumgame.io/>

**Type** : Jeu de puzzle avec photons, similaire à un jeu de réflexion laser

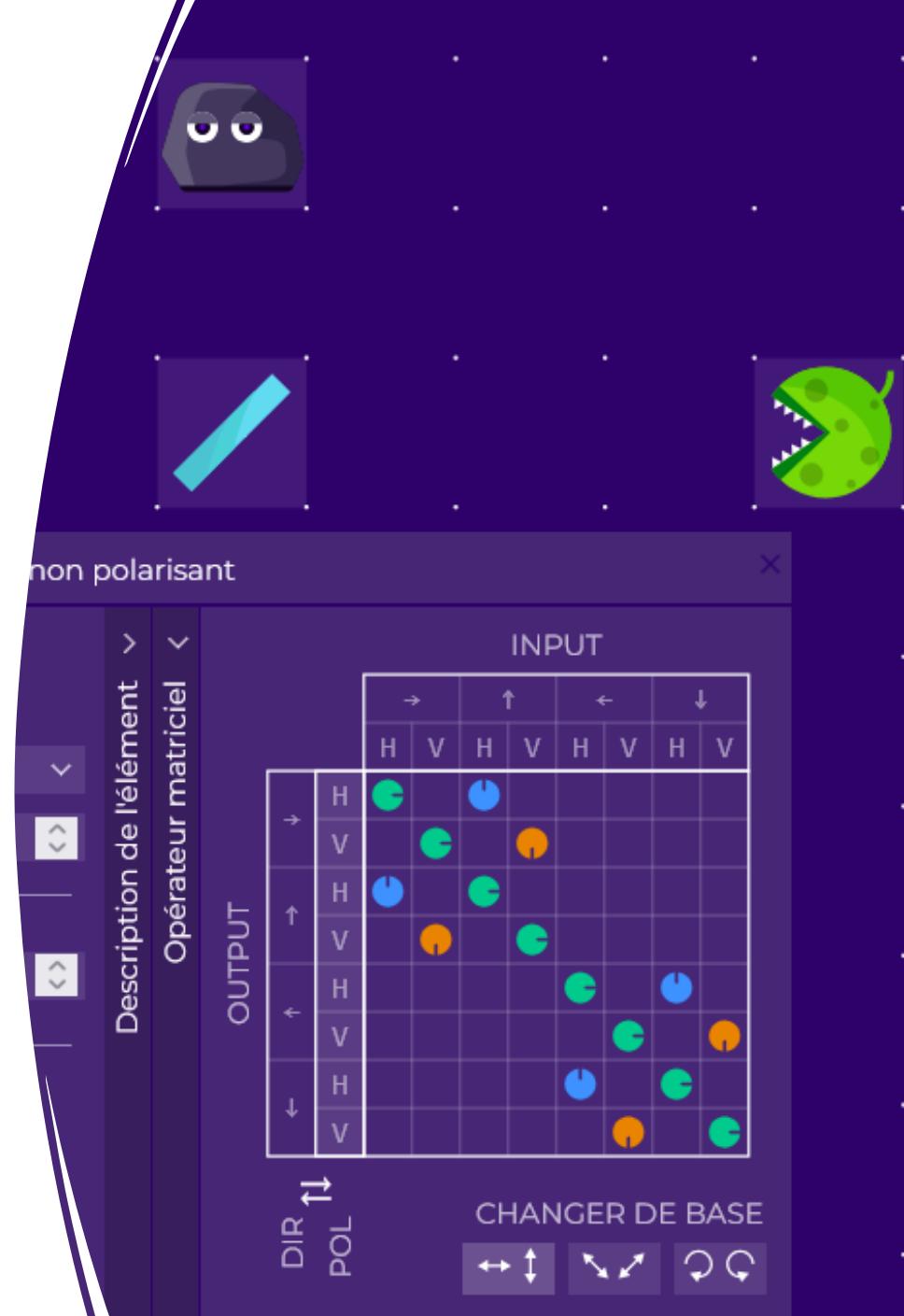
**Objectif** : Diriger des photons vers des cibles en utilisant des éléments optiques quantiques

**Éléments disponibles :**

- Sources de photons
- Miroirs
- Séparateurs de faisceaux (beam splitters)
- Rotateurs de phase
- DéTECTEURS
- Générateurs d'intrication

**Concepts explorés :**

- Superposition de chemins
- Interférences constructives/destructives
- Mesure quantique
- Intrication de photons (niveaux avancés)



# Quantum Flytrap

---

## **Progression :**

- **Niveaux 1-5** : Introduction aux miroirs et séparateurs
- **Niveaux 6-10** : Interférences et phases
- **Niveaux 11-15** : Intrication et téléportation
- **Niveaux 16+** : Puzzles complexes ouverts

## **Mission :**

- Compléter les 10 premiers niveaux
- **Screenshot** : Votre solution la plus élégante
- **Analyse** : Comment le jeu illustre-t-il la superposition ?

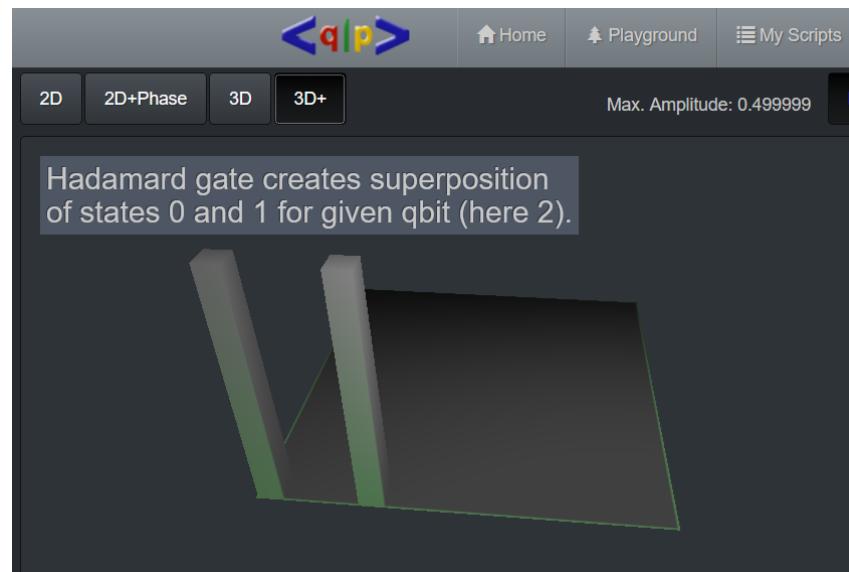
# Jeu 4 : Quantum Computing Playground

**Outil** : Quantum Playground - IDE/Simulateur ludique  
<https://www.quantumplayground.net/>

**Type** : Bac à sable avec langage de script quantique

**Fonctionnalités** :

- Éditeur de code avec langage simplifié
- Visualisations 3D des états quantiques
- Débogueur bidirectionnel
- Bibliothèque d'exemples



# Exemples à essayer

:

**Superposition simple :**

```
qc.reset(1);qc.h(0);qc.measure();
```

**État de Bell :**

```
qc.reset(2);qc.h(0);qc.cnot(0,1);
```

**Algorithme de Grover** (fourni dans les exemples)

**Mission :**

- Tester 3 exemples différents
- Modifier les paramètres et observer les changements
- **Créer** votre propre circuit simple

# Jeux Minecraft/Sandbox

- **QiskitBlocks** - Escape rooms quantiques dans Minecraft
  -  <https://github.com/JavaFXpert/QiskitBlocks>
- **Concept** : Résoudre des puzzles quantiques pour s'échapper
- **Plateforme** : Minecraft (mod requis)
- **Qiskit** : Intégré pour circuits réels
- **qCraft** (Google/Minecraft) <https://qcraft-for-minecraft.fr.softonic.com/>
- **Concept** : Blocs quantiques avec superposition et intrication
- **Public** : Joueurs Minecraft
- **Éducation** : Parfait pour collèges/lycées



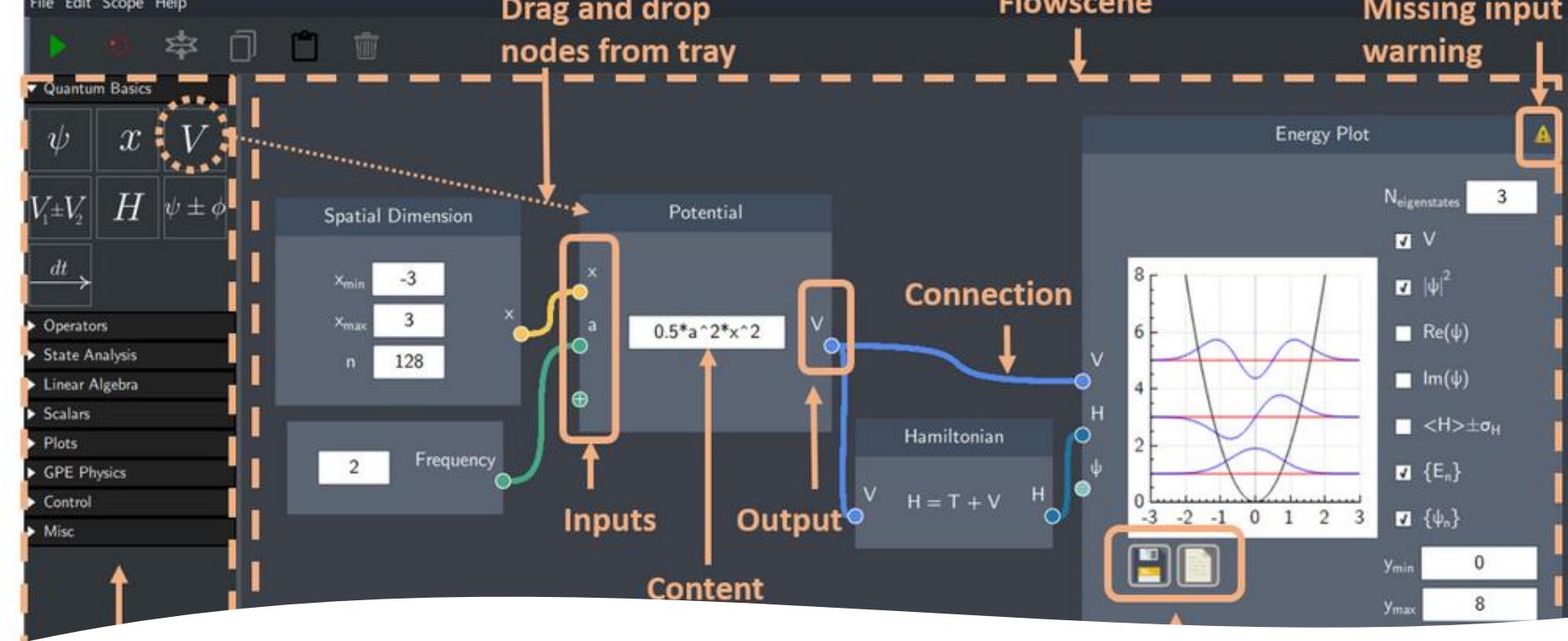


# Collections et Ressources

---

- **Awesome Quantum Games** (Liste GitHub complète)
  - 🔗 <https://github.com/HuangJunye/Awesome-Quantum-Games>
- **Contenu** : 50+ jeux quantiques référencés
- **Mise à jour** : Régulière
- **Catégories** : Par type, difficulté, plateforme
- **Itch.io - Tag Quantum**
  - 🔗 <https://itch.io/games/tag-quantum>
- **Contenu** : 100+ jeux quantiques indie
- **Gratuits** : Majorité jouables en navigateur
- **Créateurs** : Communauté mondiale





# Atelier 7 : Construction Interactive avec Quatomic

Outil : Quatomic Composer [🔗](https://www.quatomic.com/composer)

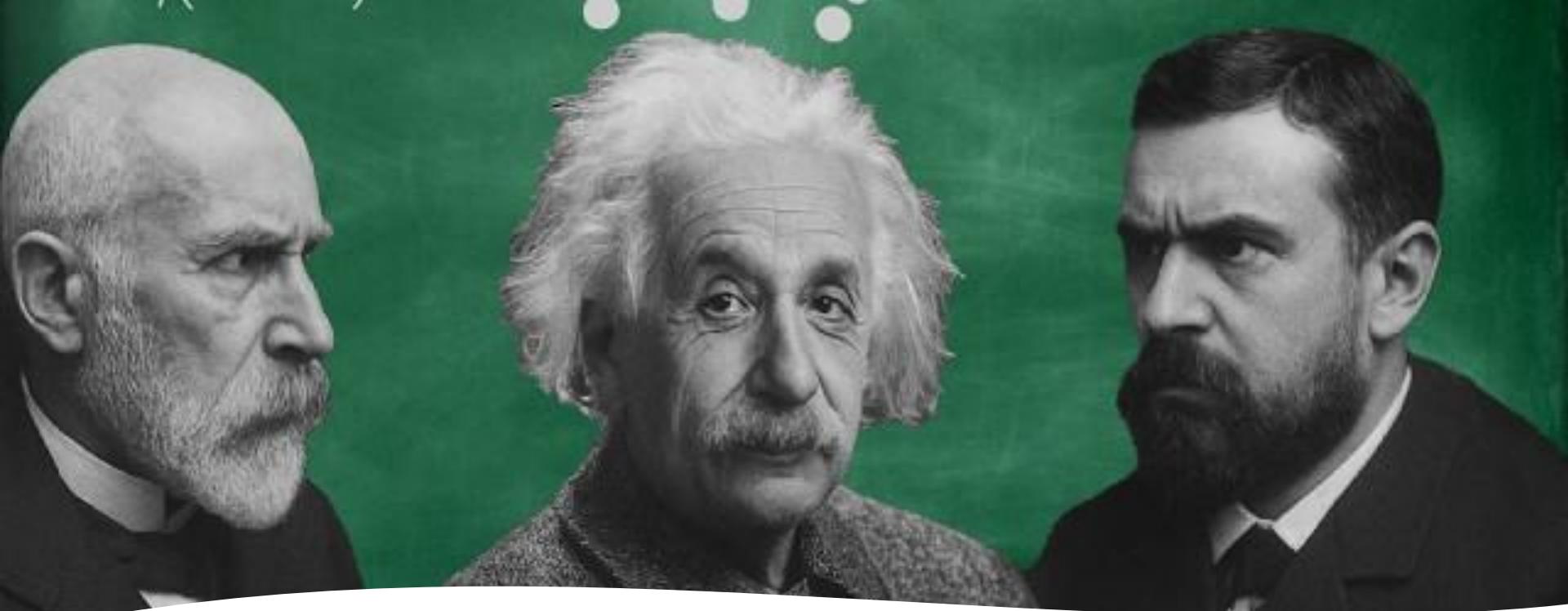
<https://www.quatomic.com/composer>

Mission : Recréer l'expérience de Mach-Zehnder

1. Placer un émetteur de photons
2. Ajouter un séparateur de faisceau 50/50
3. Deux chemins possibles avec miroirs
4. Recombiner avec un second séparateur
5. Observer les interférences aux détecteurs

Paramètres à tester :

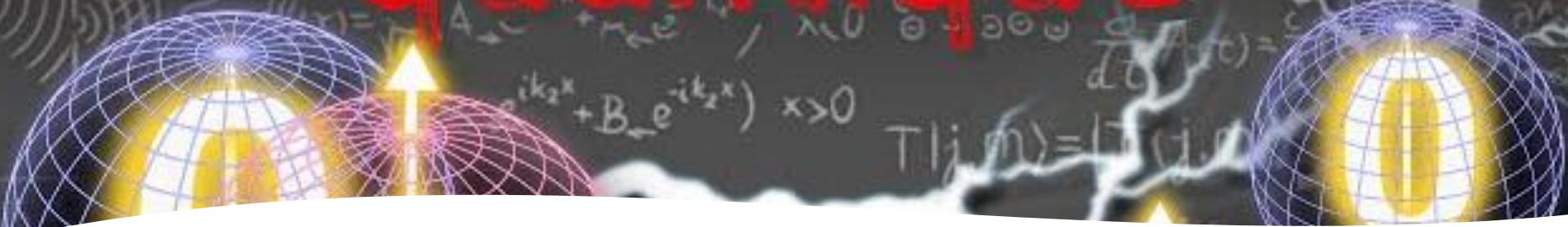
- Longueur des chemins (déphasage)
- Angle du séparateur de faisceau
- Ajout d'un déphaseur dans un bras



## 🧠 PARTIE IV : CONCEPTS AVANCÉS

- 🧩 **Principe d'Incertitude de Heisenberg**
  - Il est **impossible** de connaître simultanément position ( $x$ ) et quantité de mouvement ( $p$ ) avec une précision arbitraire.
- Interprétation :**
- Ce n'est PAS une limitation expérimentale
  - C'est une propriété **fondamentale** de la nature
  - Plus on localise une particule (petit  $\Delta x$ ) → plus son impulsion est floue (grand  $\Delta p$ )
- Application en informatique quantique :**
- Les mesures dans des bases incompatibles ( $X$  vs  $Z$ ) illustrent ce principe
  - Mesurer dans la base  $X$  ( $|+\rangle$ ,  $|-\rangle$ ) détruit l'information sur la base  $Z$  ( $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ )

# La décohérence quantique



## Décohérence – Du Quantique au Classique



**Le problème :** Pourquoi n'observe-t-on jamais de superposition dans le monde macroscopique ?

**La solution : Décohérence environnementale**

**Mécanisme :**

1. Système quantique + environnement = système composite
2. Intrication inévitable avec l'environnement
3. L'information "fuit" vers l'environnement
4. Destruction rapide des cohérences de phase

**Temps de décohérence typiques :**

- Photon dans une fibre optique :  $\sim 1$  km
- Ion piégé isolé :  $\sim 1$  s
- Qubit supraconducteur (état de l'art) :  $\sim 500$   $\mu$ s
- Molécule  $C_{70}$  en vol :  $\sim 1$  ms
- Objet de  $1 \mu\text{g}$  :  $\sim 10^{-20}$  s

**Importance pour l'informatique quantique :**

- La décohérence est l'ennemi n°1 des qubits
- Nécessité de codes correcteurs d'erreurs
- Course technologique : augmenter les temps de cohérence



# MISSIONS ÉVALUATIVES

## Mission Principale : "Restauration des Archives"

**Contexte narratif :** Chronos a effacé les archives des expériences historiques. Vous devez les restaurer en les reproduisant virtuellement et en documentant vos observations.

**Livrable :** Rapport de mission (format PDF, 5-8 pages)

### Contenu requis :

#### 1. Expérience 1 : Double Fente

1. Screenshots du simulateur (avec/sans mesure)
2. Courbe d'intensité  $I(x)$  théorique vs observée
3. Explication du rôle de la mesure (300 mots)

#### 2. Expérience 2 : Trois Polariseurs

1. Configuration et résultats
2. Calcul des probabilités de transmission
3. Lien avec les bases de mesure de qubits (200 mots)

#### 3. Expérience 3 : Chat de Schrödinger

1. Circuit Quirk/IBM avec état superposé
2. Histogramme des mesures (1024 shots)
3. Discussion philosophique sur la mesure (400 mots)

#### • Synthèse :

- Comment ces expériences éclairent-elles l'informatique quantique ?
- Quelles sont les limitations pratiques (décohérence) ?

# Mission Bonus : "Création d'un Artefact Pédagogique"

**Objectif** : Créer un outil interactif pour expliquer un concept quantique

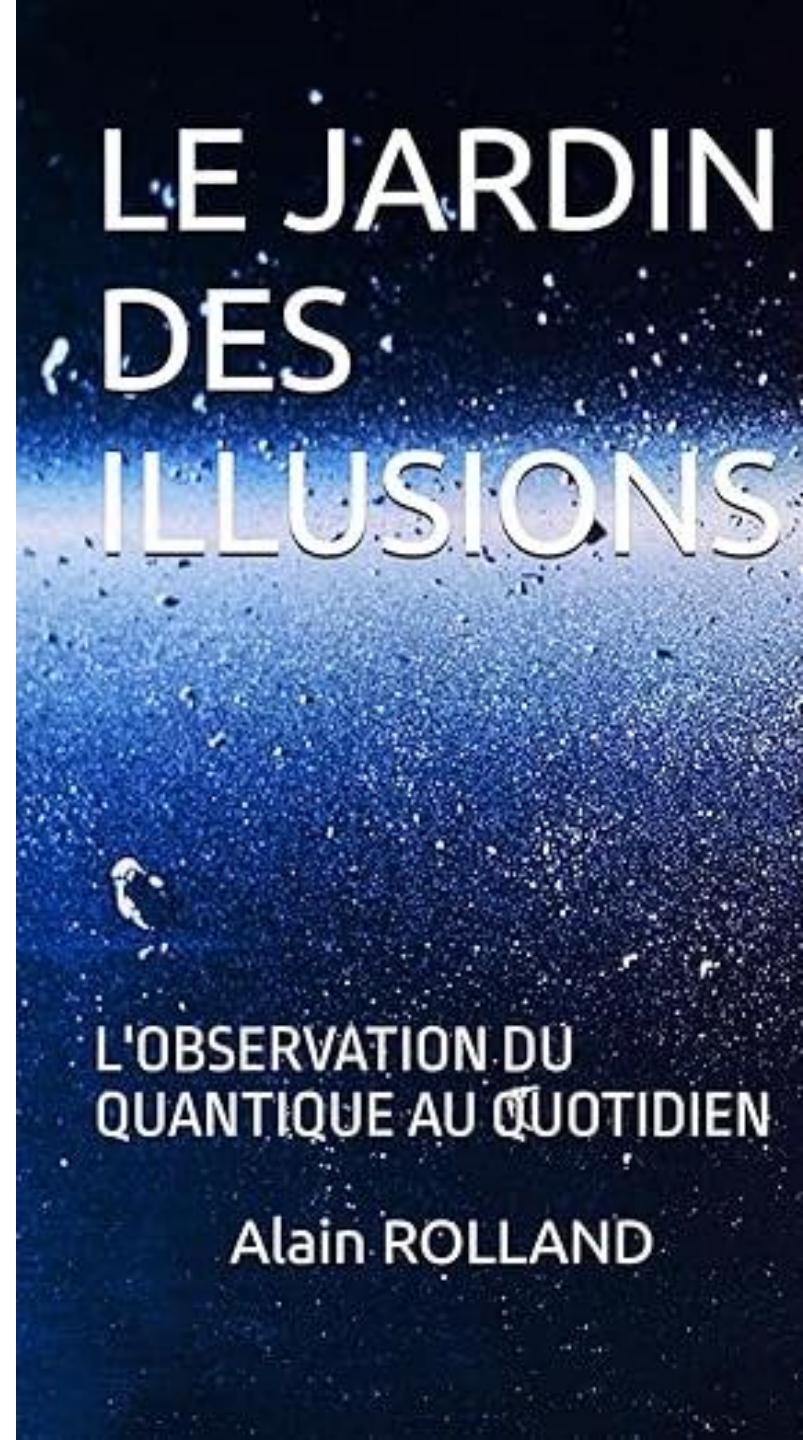
**Options** :

1. **Vidéo explicative** (3-5 min)
  1. Choisir un concept (ex: superposition)
  2. Utiliser des animations (Manim, Blender)
  3. Script pédagogique + voix-off
2. **Simulation interactive** (p5.js, Processing)
  1. Coder une visualisation (ex: sphère de Bloch interactive)
  2. Interface utilisateur intuitive
  3. Documentation du code
3. **Poster scientifique**
  1. Format A1 (digital)
  2. Expérience historique expliquée visuellement
  3. QR codes vers simulations

**Rendu** : Fichier + présentation orale (5 min)

## Impact philosophique

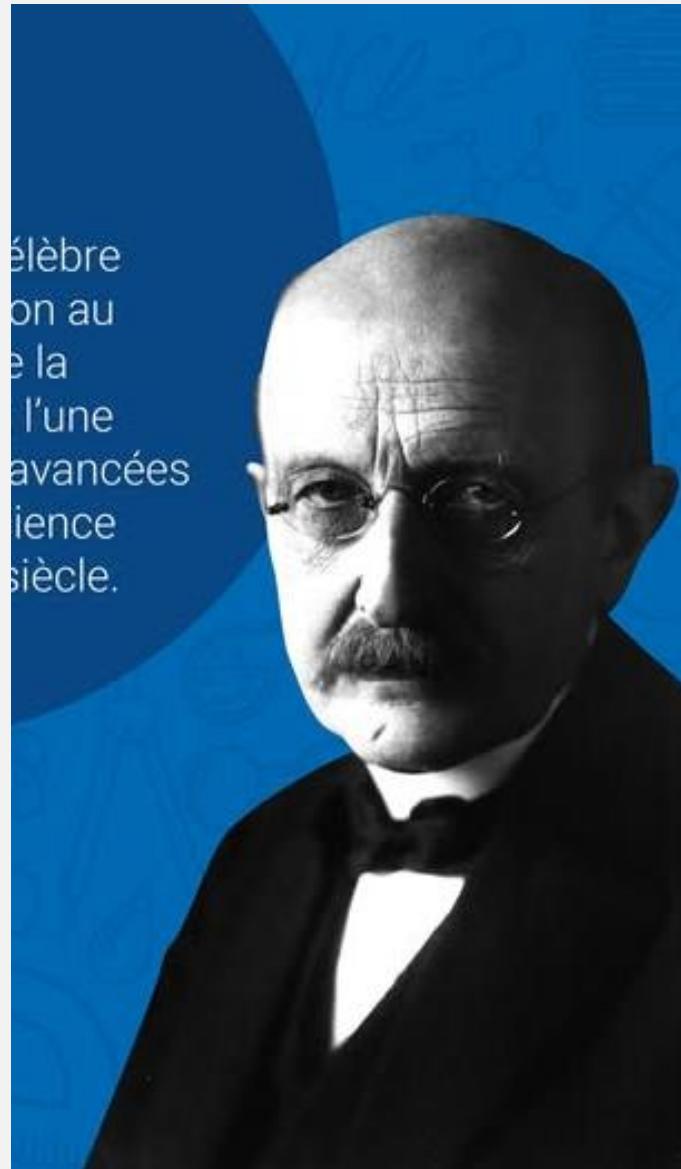
- Ces découvertes ont bouleversé notre vision du monde.
- - La réalité n'est pas indépendante de l'observation.
- - Le déterminisme absolu disparaît.
- - La probabilité et l'incertitude deviennent fondamentales.
- Les philosophes et physiciens débattent encore de ces questions.



# Synthèse : Planck

---

- Planck (1900) :  $E = h\nu$ .
- Introduction des quanta d'énergie.
- Fondement de toute la mécanique quantique.

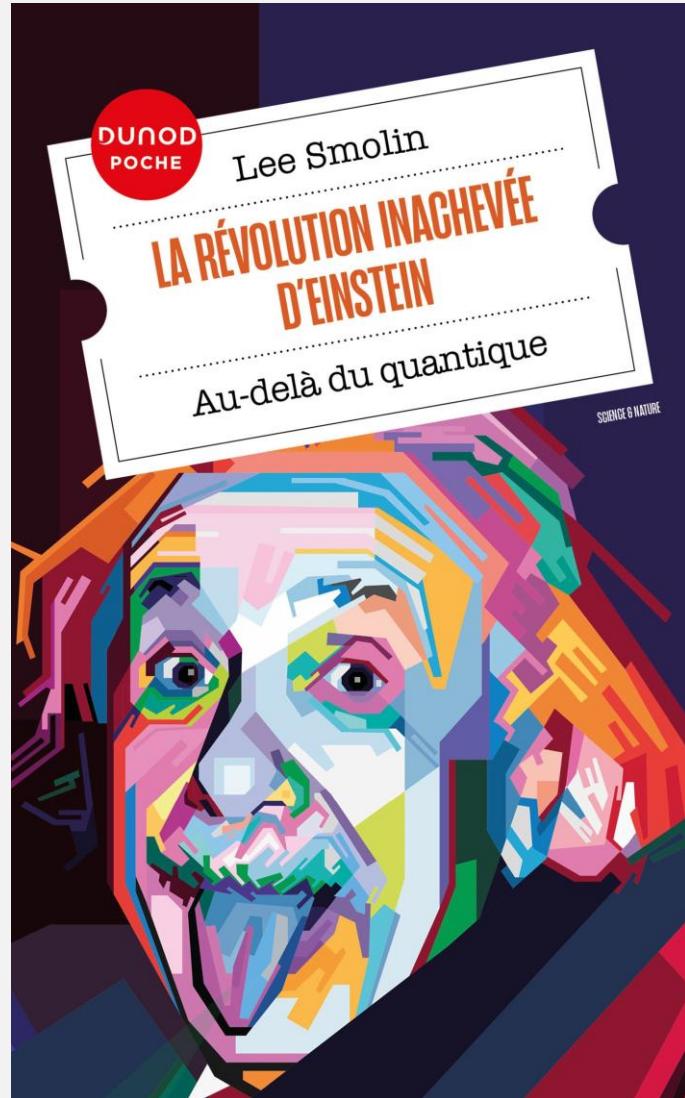


élèbre  
on au  
e la  
l'une  
avancées  
ience  
siècle.

# Synthèse : Einstein

---

- Einstein (1905) : effet photoélectrique.
- Preuve expérimentale que la lumière est faite de photons.
- Applications : panneaux solaires, capteurs CCD.



# Synthèse : Bohr

---

- Bohr (1913) : complémentarité.
- Les objets quantiques sont à la fois ondes et particules.
- Modèle atomique avec orbites quantifiées.

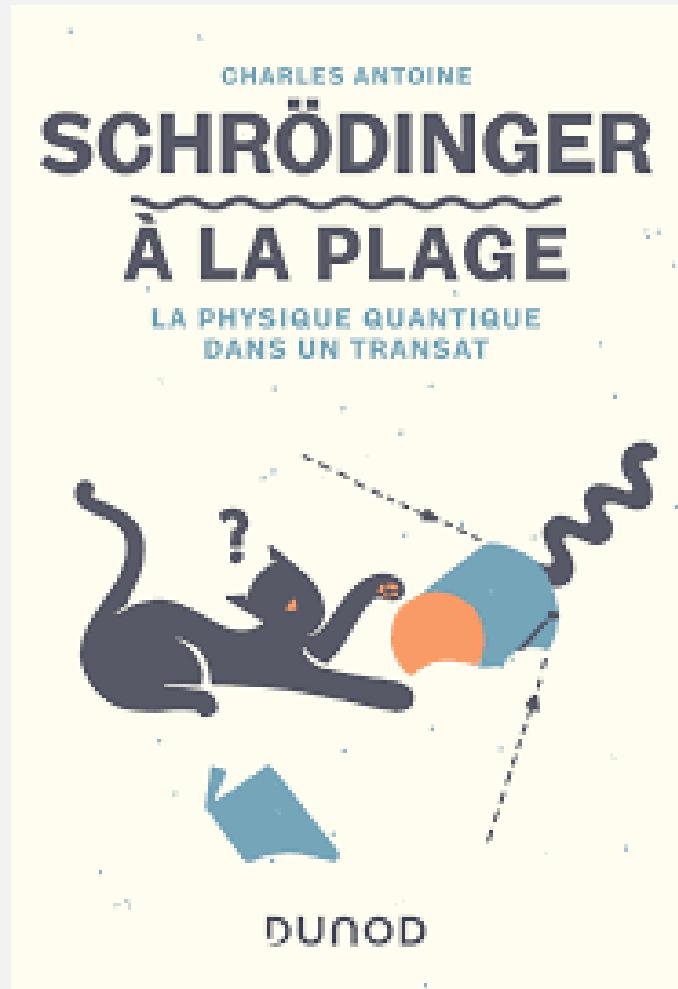
Niels Bohr  
**Physique atomique  
et connaissance  
humaine**



# Synthèse : Schrödinger

---

- Schrödinger (1926-1935) :
- - Équation d'onde pour décrire les états.
- - Paradoxe du chat pour interroger la superposition.
- Ces contributions marquent la maturité de la MQ.



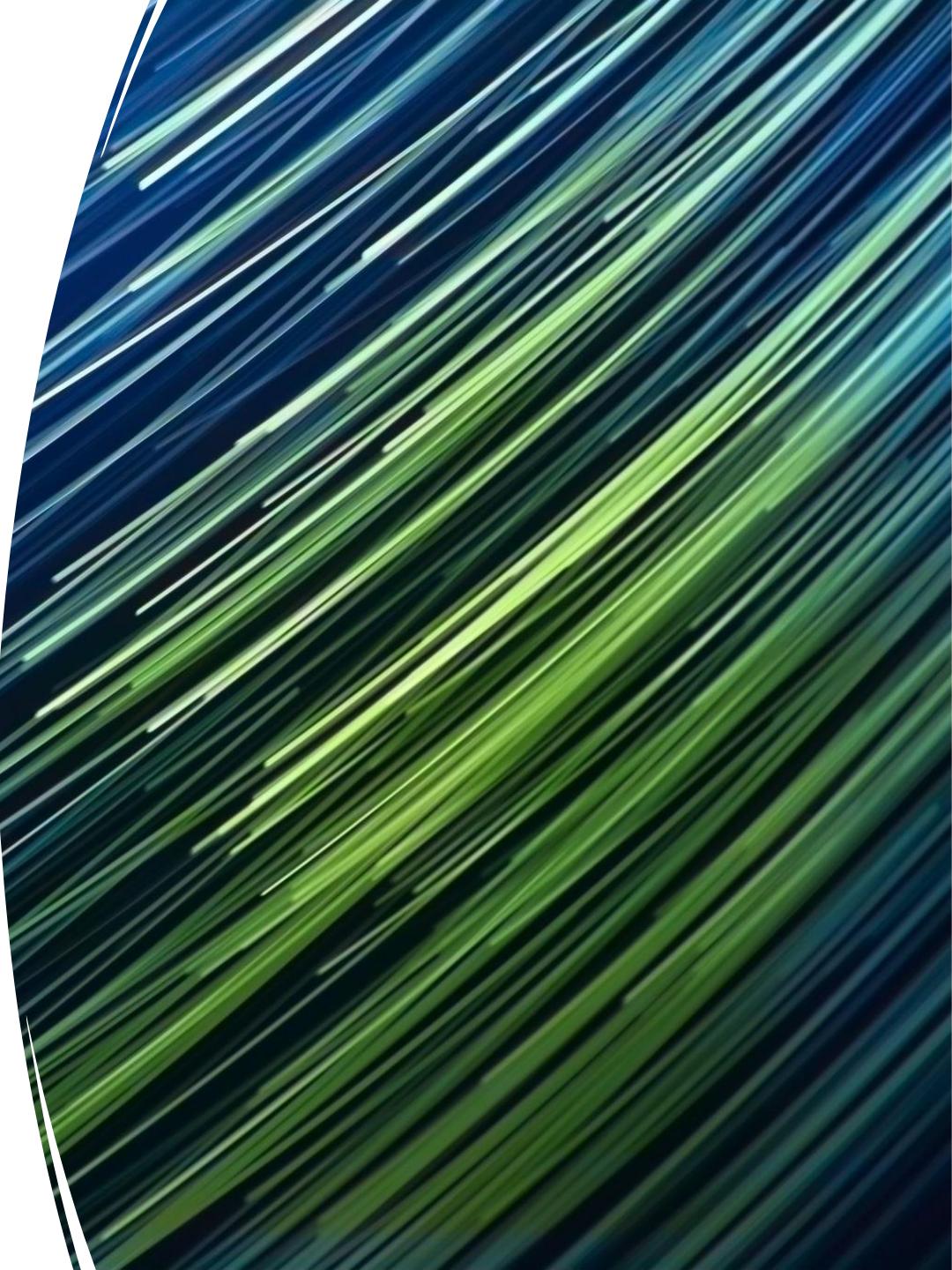
# Badge obtenu

---

Vous avez restauré les découvertes fondatrices.

Votre titre : Explorateur des Origines ⚡

Un fragment du Bouclier Quantique est en votre possession et 10 réponses au QCM.



# Transition vers Chapitre 2

---

Prochaine étape :  
Les Codes des  
Qubits.

Vous allez apprendre à  
manipuler la langue  
des portes quantiques.

Préparez-vous à  
plonger au cœur des  
circuits quantiques.



# APPROFONDISSEMENTS

## Livres Essentiels

- 
- **Quantum Computing for Everyone** - Chris Bernhardt (MIT Press, 2019)
    - <https://mitpress.mit.edu/9780262539531/quantum-computing-for-everyone/>
    - **Public** : Étudiants avec bases en mathématiques (algèbre linéaire)
    - **Points forts** : Explications claires, accessible aux non-physiciens
    - **Contenu** : Superposition, intrication, algorithmes quantiques de base
    - **Prix** : ~30€
    - **Recommandation** : Parfait pour commencer !
  - **Quantum Computing: A Gentle Introduction** - Eleanor Rieffel & Wolfgang Polak (MIT Press, 2011)
    - <https://mitpress.mit.edu/9780262526678/quantum-computing/>
    - **Public** : Informaticiens sans background en physique quantique
    - **Points forts** : Progression pédagogique, nombreux exercices
    - **Contenu** : Construction progressive des algorithmes quantiques
    - **Note** : Parfait équilibre entre rigueur et accessibilité

- 
- **Dancing with Qubits** - Robert S. Sutor (Packt Publishing, 2019)
  -  <https://www.packtpub.com/product/dancing-with-qubits/9781838827366>
  - **Public** : Développeurs et professionnels IT
  - **Points forts** : Approche pratique, nombreux exemples de code
  - **Contenu** : De la théorie aux applications réelles
  - **Bonus** : Utilise Python et Qiskit
  - **Introduction to Classical and Quantum Computing** - Thomas Wong (2022, gratuit !)
  -  **PDF gratuit** : <https://www.thomaswong.net/>
  -  **Amazon** : Version papier disponible (~25€)
  - **Public** : Étudiants en informatique
  - **Points forts** : Gratuit, moderne, bien illustré
  - **Contenu** : Compare approches classiques et quantiques
  -  **Coup de cœur** : Excellent rapport qualité/prix (gratuit !)

# Niveau Intermédiaire

---

- **Introduction to Quantum Mechanics** - David J. Griffiths (3rd edition, 2018)
  -  <https://www.cambridge.org/highereducation/books/introduction-to-quantum-mechanics/990799CA07A83FC5312402AF6860311E>
- **Public** : Physiciens et ingénieurs
- **Points forts** : LA référence pédagogique en mécanique quantique
- **Contenu** : Fondements théoriques solides
- **Note** : Nécessaire si vous voulez comprendre la physique sous-jacente
- **Prix** : ~70€
- **Quantum Computer Science** - N. David Mermin (Cambridge, 2007)
  -  <https://www.cambridge.org/core/books/quantum-computer-science/66462590D10C8010017CF1D7C45708D7>
- **Public** : Informaticiens théoriciens
- **Points forts** : Approche CS pure, peu de physique
- **Contenu** : Complexité quantique, algorithmes
- **Note** : Idéal pour Master en informatique

# Niveau Avancé (Bible du domaine)

---

- **Quantum Computation and Quantum Information** - Michael Nielsen & Isaac Chuang (10th Anniversary Edition, 2010)
  -  <https://www.cambridge.org/highereducation/books/quantum-computation-and-quantum-information/01E10196D0A682A6AEFFEA52D53BE9AE>
  -  Surnommé : "Mike & Ike" par la communauté
- **Public** : Chercheurs, doctorants, Master avancé
- **Points forts** :
  - Exhaustif (700+ pages)
  - Couvre algorithmes, correction d'erreurs, cryptographie
  - Référence mondiale depuis 20 ans
- **Difficulté** : Exigeant mathématiquement
- **Prix** : ~90€
-  **LA référence absolue** - À avoir dans sa bibliothèque



# Sites Web Incontournables

- **IBM Quantum Learning** (★★★ ESSENTIEL)

- <https://learning.quantum.ibm.com/>

- **Contenu :**

- Cours complets (14 leçons structurées)
- Tutoriels interactifs
- Accès à de vrais ordinateurs quantiques IBM
- Documentation Qiskit officielle

- **Gratuit** : Oui, avec 10 minutes d'exécution/mois

- **Niveau** : Débutant → Avancé

- **À faire absolument** : Créer un compte et faire les tutoriels

- **Qiskit Textbook** (★★★ GRATUIT ET COMPLET)

- <https://learn.qiskit.org/>

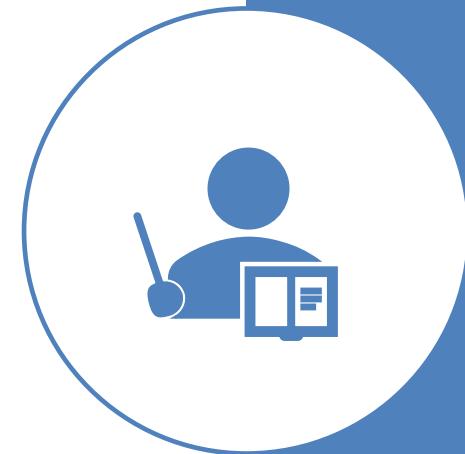
- Ancien site : <https://qiskit.org/textbook/preface.html>

- **Contenu :**

- Manuel complet en ligne
- Notebooks Jupyter interactifs
- Du niveau débutant aux algorithmes avancés
- Code Python exécutable

- **Points forts** : Progressif, bien structuré, gratuit

- **GitHub** : <https://github.com/Qiskit/textbook>

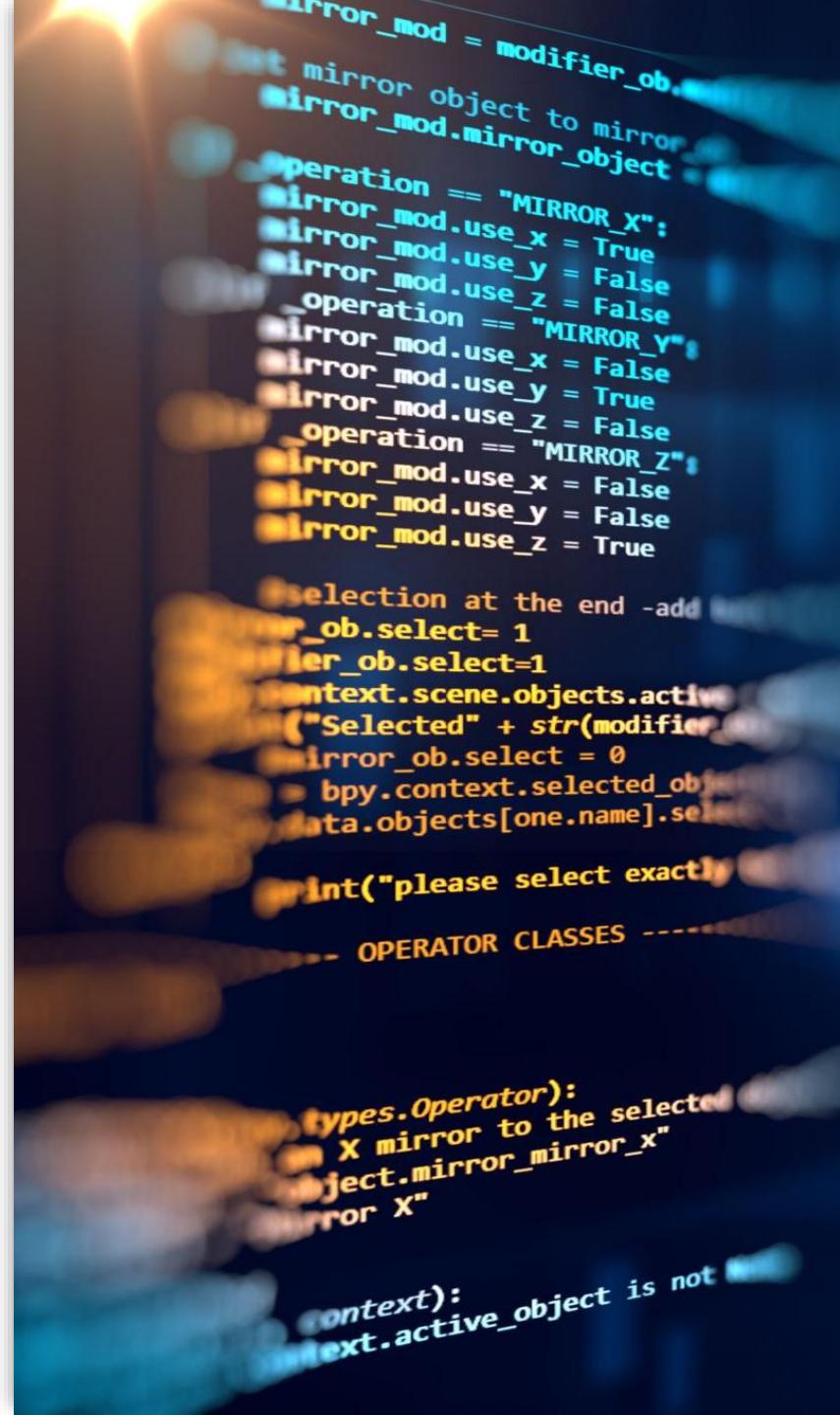


# Autres sites

- **Quantum Country** (★★★ PÉDAGOGIE INNOVANTE)
  - 🔗 <https://quantum.country/>
- **Créateurs** : Andy Matuschak & Michael Nielsen
- **Innovation** : Système de répétition espacée intégré
- **Contenu** : Introduction conceptuelle brillante
- **Gratuit** : Oui
- **Particularité** : Vous envoie des questions par email pour ancrer les concepts
  - ★ Expérience unique : Approche pédagogique révolutionnaire
- **Black Opal by Q-CTRL** (★★ VISUEL ET INTERACTIF)
  - 🔗 <https://q-ctrl.com/black-opal>
- **Format** : Cours interactif avec visualisations 3D
- **Contenu** : Concepts quantiques avec exercices pratiques
- **Points forts** : Interface magnifique, très visuel
- **Gratuit** : Version limitée gratuite
- **QuTech Academy** (Université de Delft)
  - 🔗 <https://www.qutechacademy.nl/>
- **Contenu** : Ressources pour différents niveaux
- **Points forts** : Approche académique européenne de qualité

# Documentation Technique & Programmation

- Qiskit Documentation Officielle   
<https://docs.quantum.ibm.com/>
- **Contenu** : API complète, guides de démarrage
- **Structure** :
  - **Start** : Installation et premiers pas
  - **Build** : Construire des circuits
  - **Transpile** : Optimisation
  - **Verify** : Validation
  - **Run** : Exécution sur hardware réel
- **Essentiel pour** : Programmation pratique



- **Qiskit GitHub & Tutoriels**

- <https://github.com/Qiskit>
- <https://github.com/MonitSharma/Learn-Quantum-Computing-with-Qiskit>

- **Contenu** : Code source, exemples, notebooks

- **Communauté** : Active et aidante

- **Coding with Qiskit (YouTube)**

- <https://www.youtube.com/@qiskit>

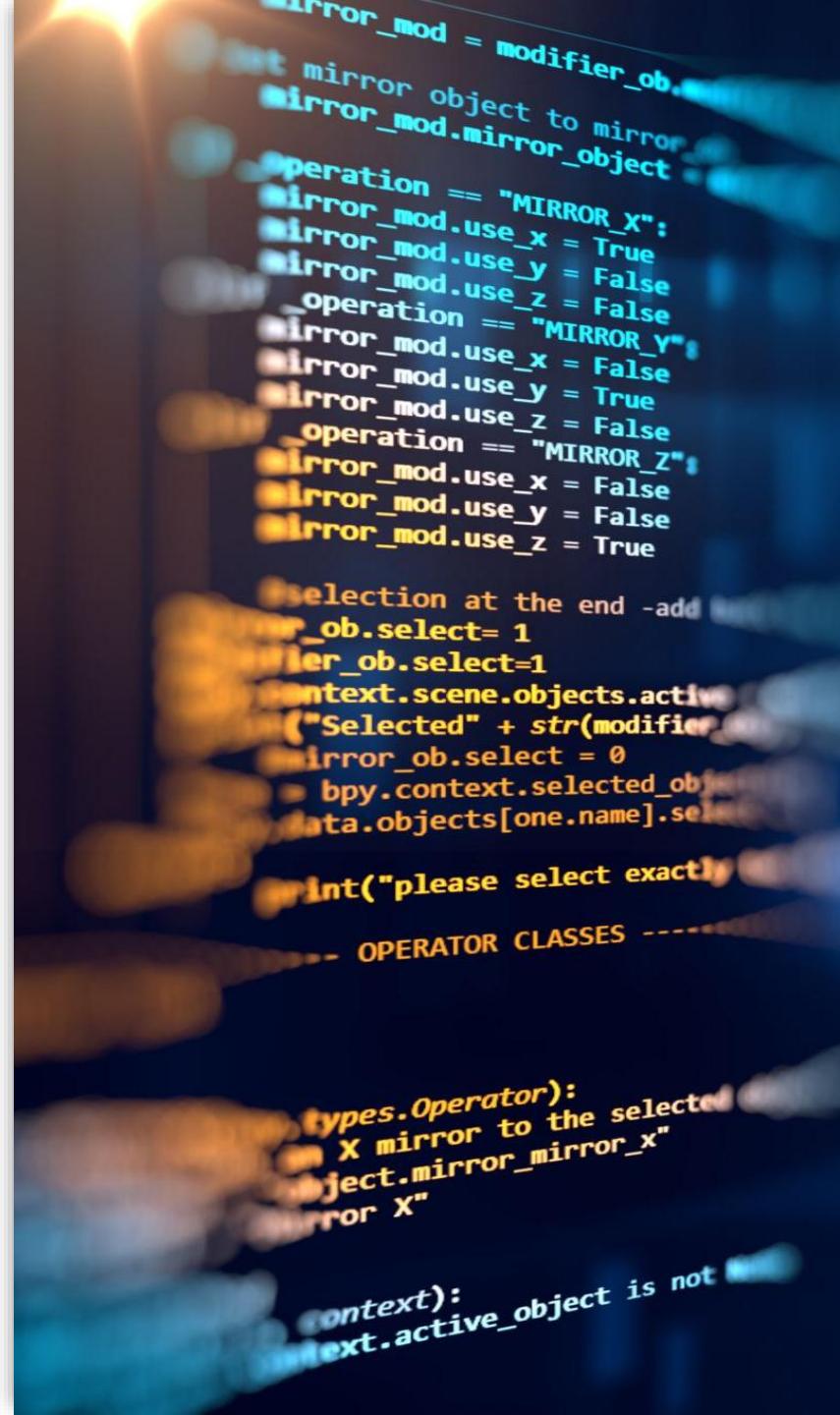
- **Contenu** : Série vidéo officielle IBM

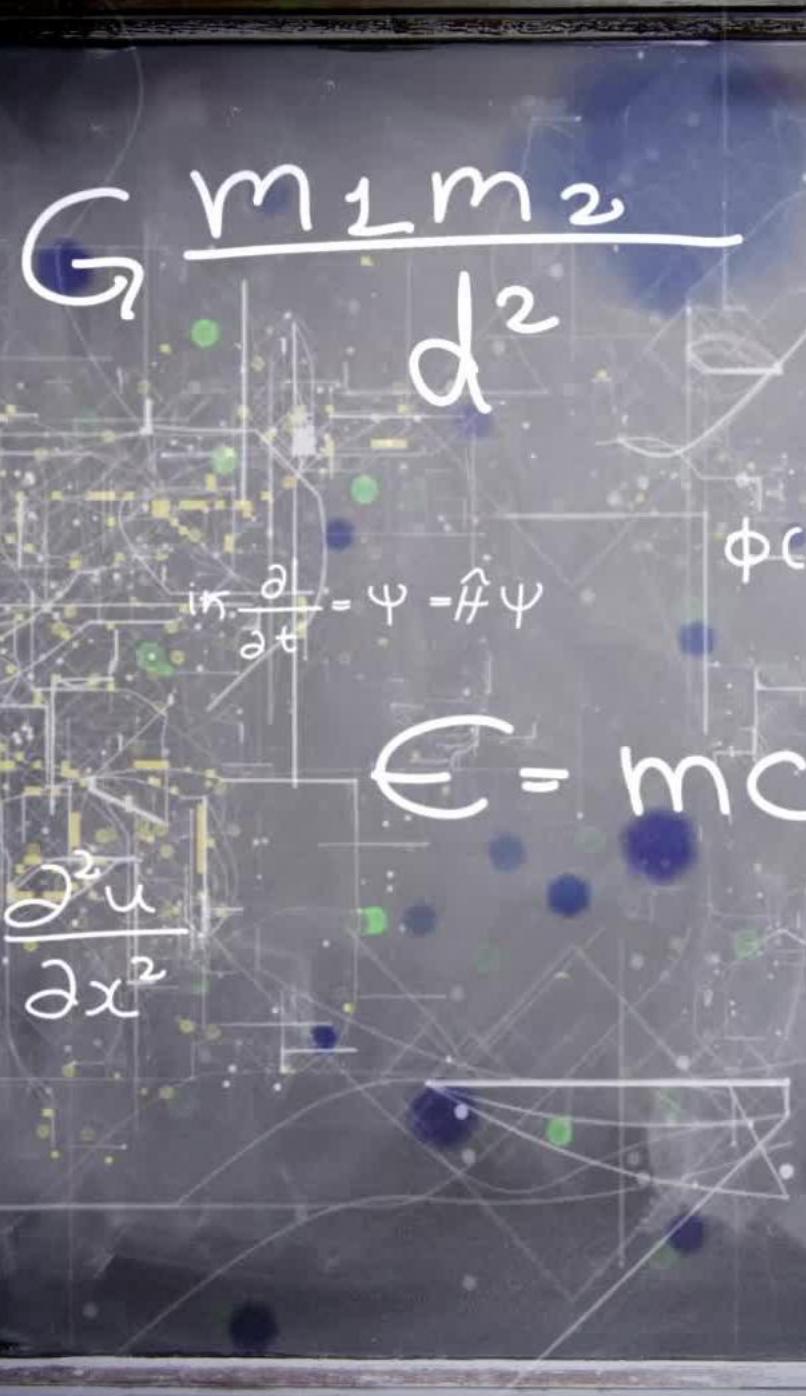
- **Format** : Tutoriels étape par étape

- **Séries recommandées** :

- "Coding with Qiskit 1.x" (nouvelle version)

- Algorithmes quantiques expliqués





# Ressources Académiques — & Cours en Ligne

- **MIT OpenCourseWare - Quantum Computing**
  - [🔗 https://ocw.mit.edu/](https://ocw.mit.edu/) (chercher "quantum")
- **Contenu** : Cours complets du MIT gratuits
- **Niveau** : Universitaire avancé
- **edX - Quantum Computing Courses**
  - [🔗 https://www.edx.org/](https://www.edx.org/)
- **Cours recommandés** :
  - DelftX: Quantum Computing & Quantum Internet
  - MIT: Quantum Information Science
- **Format** : Vidéos + exercices + certificats payants
- **Gratuit** : Audit gratuit disponible
- **Coursera - Quantum Computing Specializations**
  - [🔗 https://www.coursera.org/](https://www.coursera.org/)
- **Cours recommandé** :
  - "Practical Quantum Computing with IBM Qiskit"
- **Format** : Parcours structurés avec projets
- **NPTEL (Inde) - Introduction to Quantum Computing**
  - [🔗 https://onlinecourses.nptel.ac.in/](https://onlinecourses.nptel.ac.in/)
- **Instructeurs** : Professeurs IIT + IBM Quantum Ambassadors
- **Gratuit** : Oui, avec certificat optionnel
- **Contenu** : Très complet, orienté pratique

# Et le livre d'Olivier Ezratty

- Son site :  
<https://www.oezratty.net/wordpress/>

THE livre :  
<https://www.oezratty.net/wordpress/2025/understanding-quantum-technologies-2025/>



# b quantique