

# Une introduction aux enjeux philosophiques en Mécanique Quantique

**Thomas Boyer**  
**Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne – IHPST**

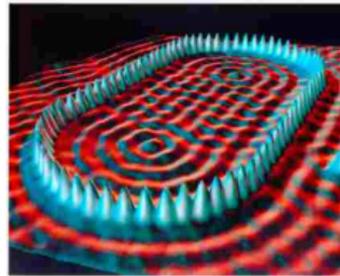
thomas.boyer@malix.univ-paris1.fr

*Université de Nantes, CAPHI, 30 mars 2010*

- 1 Introduction
- 2 Un aperçu de l'utilisation de la théorie
- 3 L'interprétation orthodoxe de la MQ
- 4 La théorie de Bohm

- 1 Introduction
- 2 Un aperçu de l'utilisation de la théorie
- 3 L'interprétation orthodoxe de la MQ
- 4 La théorie de Bohm

# Quel est le domaine de la Mécanique Quantique ?



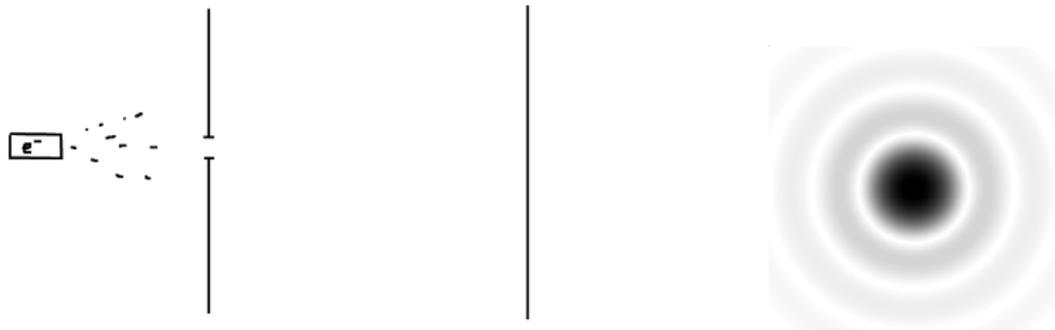
- Problème du « corps noir » :  
difficultés de la physique classique,  
loi de Planck (1900), quantum d'action.
- Quanta de lumière (photon) : Einstein, 1905.
- Modèle de l'atome de Bohr (1913).
- Formation de la MQ (1926) :
  - mécanique ondulatoire de Schrödinger,
  - mécanique matricielle de Heisenberg.
- Axiomatisation : von Neumann (1932, 1955), Dirac.
- Débat Bohr-Einstein.
- Théorie de Bohm (1952).

# Pourquoi un débat philosophique ?

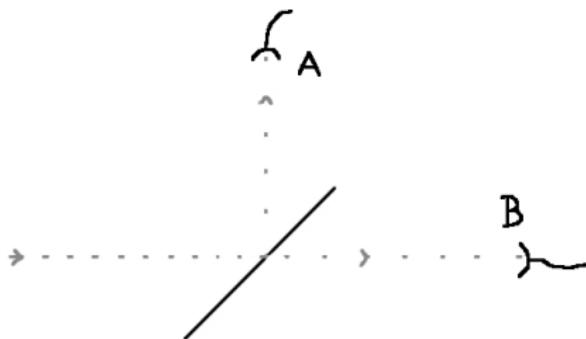
- Ce qui ne fait pas débat : il s'agit d'une excellente théorie pour ses prédictions expérimentales.
- Ce qui fait débat : comment interpréter et comprendre cette théorie.
- Le cadre conceptuel classique ne convient plus.
- Des problèmes de cohérence de la théorie (« problème de la mesure »)

- 1 Introduction
- 2 Un aperçu de l'utilisation de la théorie
  - Exemples d'expériences
  - Mode d'emploi de la MQ
  - La superposition
- 3 L'interprétation orthodoxe de la MQ
- 4 La théorie de Bohm

# Exemples d'expériences



Électrons diffractés à travers un trou. Figure observée.



Photons arrivant sur une lame semi-réfléchissante

Préparation : état initial $\psi(x)$	Évolution : $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \psi(x, t)$	Mesure : probabilité $ \psi(x, t) ^2$
---	---	--

- On considère un **système** : {électron}
- On lui associe un **état initial**  $\psi(x)$  (la « fonction d'onde »)
- On calcule l'**évolution temporelle** de cet état  $\psi(x, t)$ , avec l'équation différentielle de Schrödinger.
- Règle de Born. Le résultat de la **mesure** finale est donné de manière probabiliste.  
Ex : la probabilité de mesurer  $x$  est  $|\psi(x, t)|^2$ .

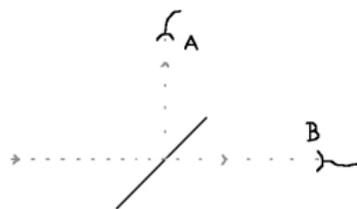
- La MQ porte sur une *amplitude* de probabilité, pas directement sur une probabilité.
- Exemple :

L'état d'un photon peut être :

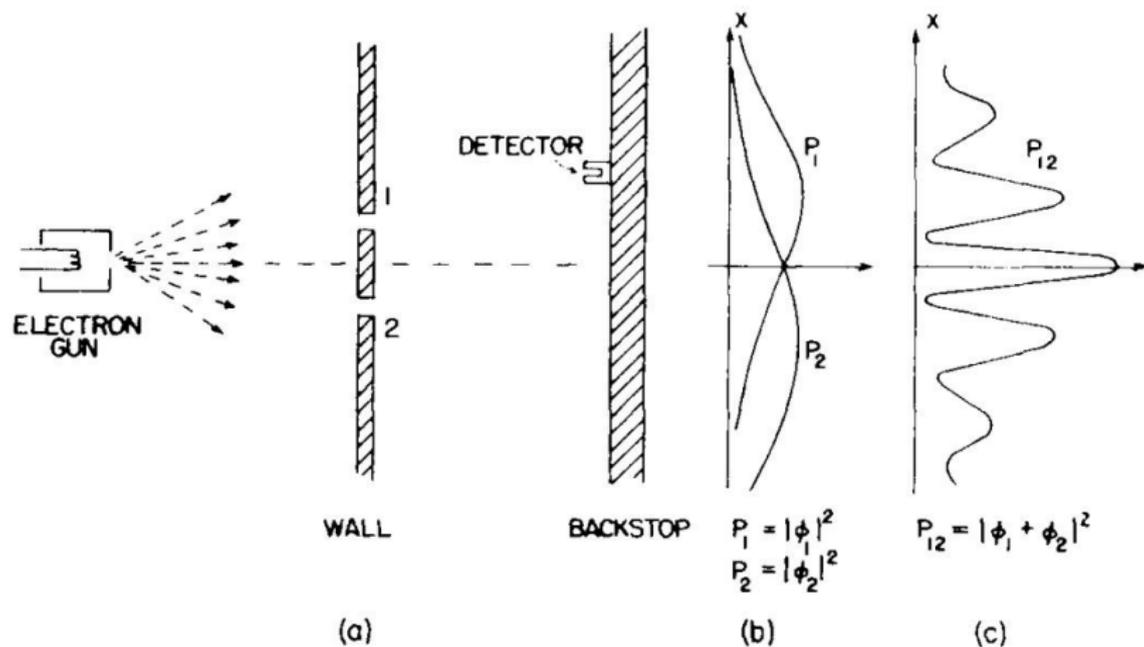
$$\psi = (A) + (B)$$

Avec l'état (A) : arrivera en A

et l'état (B) : arrivera en B



# La superposition : un exemple avec deux trous



Tiré de Feynman (1965), *Mécanique Quantique*

- 1 Introduction
- 2 Un aperçu de l'utilisation de la théorie
- 3 L'interprétation orthodoxe de la MQ
  - L'interprétation des probabilités
  - Le postulat de réduction de la fonction d'onde
  - Problème de la mesure et chat de Schrödinger
  - Les propriétés quantiques, et l'inégalité de Heisenberg
- 4 La théorie de Bohm

- L'interprétation de la théorie : une image du monde, tel qu'il pourrait être si la théorie était vraie.
- L'interprétation « orthodoxe » : celle enseignée dans les manuels.
- Une origine : l'interprétation dite « de Copenhague » : Bohr, Heisenberg, Born.

- Quelques possibilités :
  - probabilités **subjectives** (épistémiques).  
Des phénomènes sous-jacents existent, mais la théorie renonce à les décrire.
  - probabilités **objectives**, ou lorsque Dieu joue aux dés.
- Déterminisme, causalité ?

- Probabilités objectives. La MQ est considérée comme non-déterministe.
- Seule une description probabiliste peut être donnée des phénomènes.  
Hypothèse de complétude de la théorie.
- Exemples :
  - photon sur lame semi-réfléchissante,
  - décroissance radioactive.

# Exemple : un générateur de nombres aléatoires quantique



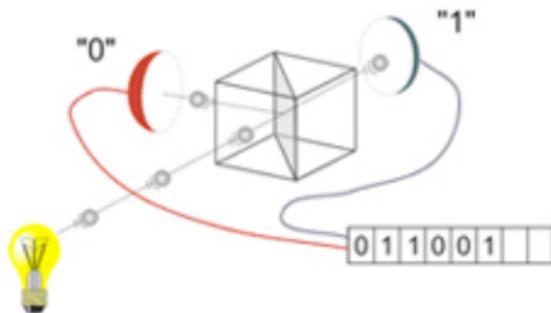
PCI



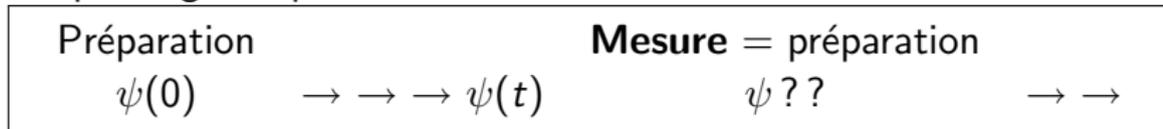
USB



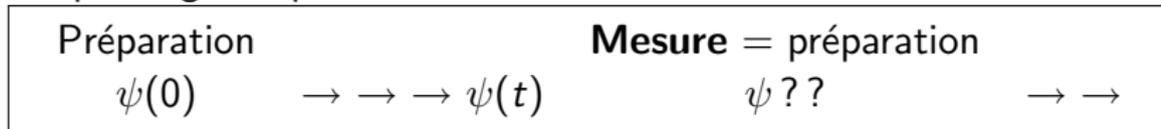
OEM



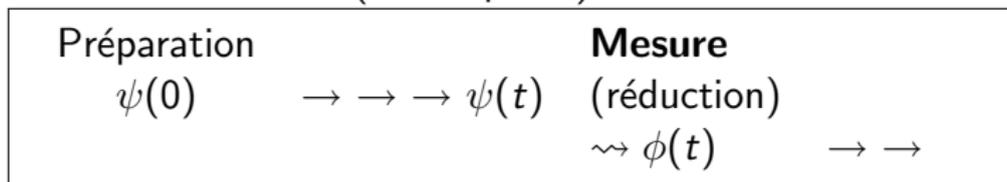
- On prolonge l'expérience :



- On prolonge l'expérience :



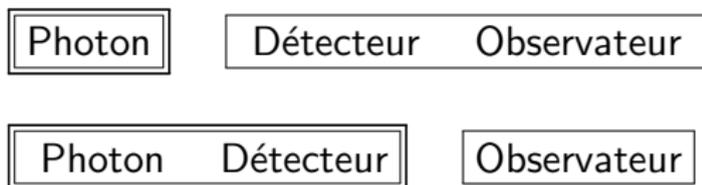
- von Neumann (1932) : lors d'une mesure, la fonction d'onde subit une réduction (« collapse »)



- Il y a donc deux règles d'évolution pour la fonction d'onde :
  - $\rightarrow$  l'équation de Schrödinger, en-dehors d'une mesure.
  - $\rightsquigarrow$  la réduction de la fonction d'onde, lors d'une mesure.

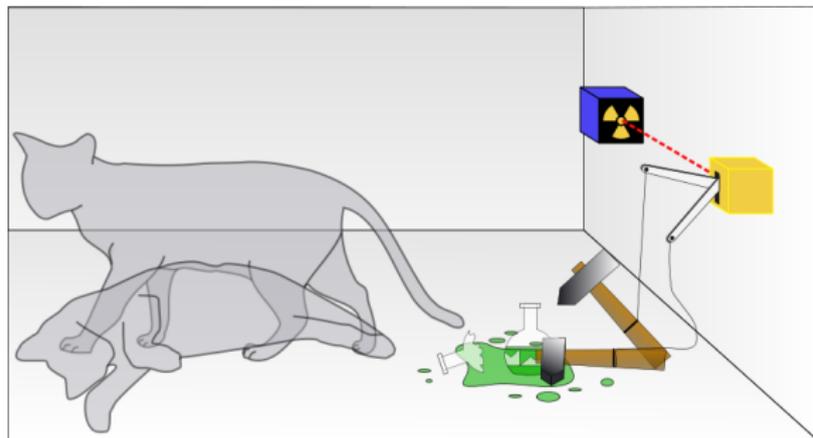
- Comment définir ce qui constitue une mesure ?  
Quand y a-t-il réduction de  $\psi$  ?
- Il s'agit d'un problème de cohérence de la MQ.
- Une reformulation du problème de la mesure :

- Comment définir ce qui constitue une mesure ?  
Quand y a-t-il réduction de  $\psi$  ?
- Il s'agit d'un problème de cohérence de la MQ.
- Une reformulation du problème de la mesure :



Selon le système considéré, la description du détecteur sera (in)déterministe !

# Le paradoxe du chat de Schrödinger

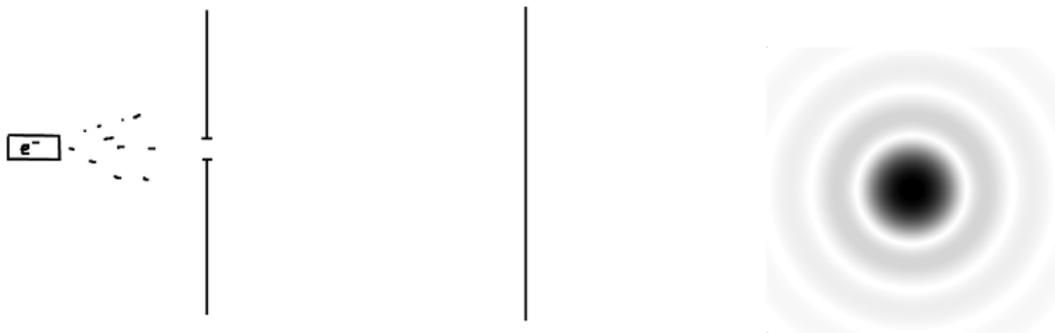


- Le rôle du chat : un détecteur (« chat mort », « chat vivant »)
- La MQ décrit l'atome radioactif par une superposition d'états. La chaîne d'interactions propage cette superposition au chat. Or on n'observe jamais de superpositions macroscopiques !
- Un problème si  $\psi$  est interprété de manière réaliste.

- Mécanique classique : propriétés précises simultanées.
- MQ : les quantités physiques reçoivent des distributions de probabilité.  
Réduction du paquet d'onde :  $\psi$  change lors de la mesure.  
Difficulté d'une lecture réaliste naïve.

# L'inégalité de Heisenberg, ou « principe d'incertitude »

- À une quantité physique (observable), la MQ attribue une distribution de probabilités.
- Formulation minimale moderne : plus la position d'une particule est donnée précisément (par la MQ), moins son impulsion (= sa vitesse) est donnée précisément.  
Contrainte sur la description, en vue d'une prédiction.
- Exemple : un électron passe dans un petit trou.



$$\Delta x \cdot \Delta p > \hbar$$

- Ce principe ne dit pas qu'une mesure est forcément imprécise !

- Certains descriptions ne sont pas simultanément possibles pour le système.  
Exemples : onde-corpuscule,  $x$  et  $p$ .
- Selon Bohr : les concepts classiques sont des conditions de possibilité de notre connaissance.  
MQ : limitation de leur usage.  
Utilisation dans un contexte expérimental donné.
- Contextualité des propriétés : elles n'ont de sens que dans un contexte expérimental donné.

- 1 Introduction
- 2 Un aperçu de l'utilisation de la théorie
- 3 L'interprétation orthodoxe de la MQ
- 4 La théorie de Bohm**

- Bohm (1952) : « A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of “Hidden” Variables »
- Équivalence empirique avec la MQ traditionnelle.
- Une image du monde beaucoup plus classique.
- Une alternative conceptuellement intéressante, mais peu utilisée.

- Toutes les particules ont une position déterminée à chaque instant.
- Évolution : la vitesse d'une particule est une fonction de  $\psi$ ,  $\psi$  est donné par l'équation de Schrödinger.  
Une « onde-pilote ».
- La théorie est ainsi déterministe !

- Des prédictions déterministes ?
- La probabilité de mesure est donnée par  $|\psi(x)|^2$ .
- La théorie fait l'hypothèse d'une distribution d'équilibre.
- Les probabilités sont ainsi interprétées de manière subjective.
- Comment expliquer le hasard du générateur de nombre ?

Goldstein, critiquant Feynman :

« (Feynman 1967, p. 145) "How does it really work? What machinery is actually producing this thing? Nobody knows any machinery. Nobody can give you a deeper explanation of this phenomenon than I have given; that is, a description of it. " But Bohmian mechanics is just such a deeper explanation. »

- La solution bohémienne au problème de la mesure : les positions des particules, et donc l'état du Chat, ont toujours une valeur précise.
- Projection de  $\psi$  : une question pragmatique.
- Contextualité des propriétés.

- Plusieurs interprétations pour la MQ :
  - orthodoxe (Copenhague),
  - Bohm,
  - Everett,
  - informationnelle...
- Les réponses philosophiques dépendent fortement de l'interprétation adoptée !

- Albert, D. Z. (1992), *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press.
- Bitbol, M. (1996), *Mécanique Quantique, une Introduction Philosophique*, Flammarion.
- Hughes, R. I. G. (1989), *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Harvard University Press.
- The Stanford Encyclopedia of Philosophy*  
<http://plato.stanford.edu>. Par exemple :  
« The Uncertainty Principle », « Bohmian Mechanics »,  
« Measurement in Quantum Theory », « The  
Einstein-Podolsky-Rosen argument »...