

# La quantique, c'est quoi ?

Élaborée dans les années 1920, cette théorie de l'infiniment petit décrit les particules (atomes, électrons, photons), ainsi que leurs interactions.

## 1 Ce sont des règles mathématiques minimalistes

$$|\psi\rangle_A \in \mathcal{H}_A$$

### ... de représentation

L'état d'un système physique A est représenté par un vecteur ( $\psi$ ) dans un espace mathématique nommé espace de Hilbert ( $\mathcal{H}_A$ ).

$$i\hbar \frac{\partial |\psi\rangle}{\partial t} = H |\psi\rangle$$

### ... d'évolution

L'équation de Schrödinger permet de prédire comment le vecteur ( $\psi$ ) représentant le système évolue avec le temps.

$$\mathcal{H}_{AB} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$$

### ... d'interactivité

L'espace de Hilbert ( $\mathcal{H}_{AB}$ ) associé au système AB composé de deux sous-systèmes A et B est défini à partir de l'espace de Hilbert de A ( $\mathcal{H}_A$ ) et de B ( $\mathcal{H}_B$ ).

$$p(m_j) = \langle \psi | \Pi_j | \psi \rangle$$

### ... de mesure

Le résultat de la mesure ( $m$ ) obtenue est une probabilité ( $p$ ), calculée à partir des paramètres physiques mesurables représentés par des opérateurs.

## 2 Des phénomènes étranges

### Ubiquité

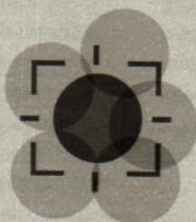
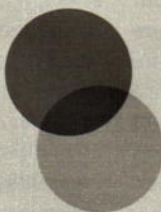
L'état d'une particule (position, vitesse...) est défini comme une somme infinie de vecteurs. Ce qui revient à dire, quand on la décrit, qu'une particule est dans une infinité d'endroits en même temps (ou qu'elle a une infinité de vitesses).

### Télépathie

Deux particules quantiques peuvent être mathématiquement inséparables : on ne peut les distinguer l'une de l'autre. Toute action sur l'une a instantanément un effet sur l'autre, même si elles se situent à des kilomètres.

### Incertitude

Il existe une limite fondamentale à la précision avec laquelle on peut connaître simultanément deux propriétés d'une particule. Ainsi, si on mesure précisément sa position, on ne peut connaître précisément sa quantité de mouvement (et vice versa).



## 3 Une précision record

L'application de la mécanique quantique à l'électromagnétisme est la théorie la plus précise jamais formulée. Des expériences montrent qu'elle prédit les propriétés de l'électron à 12 chiffres significatifs près, soit l'épaisseur d'un fil à coudre sur la distance Terre-Lune !

0,000 000 000 1 %

## 4 Des applications révolutionnaires

### Temps



Les horloges atomiques constituent aujourd'hui l'étalon de temps mondial, la base du GPS.

### Nucléaire



La physique du noyau atomique a permis la construction des centrales et des bombes H.

### Laser



Ces faisceaux de lumière amplifiée sont utilisés partout, des télécoms aux imprimantes.

### Led



Ces ampoules économes en énergie remplacent toutes les autres, même dans nos écrans.

### Informatique



Le transistor et les semi-conducteurs ont donné naissance à la micro-électronique.

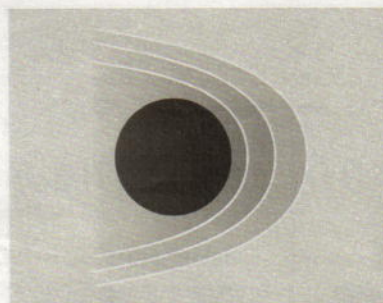
### Cosmos



La théorie des interactions des particules a permis de raconter la genèse de l'Univers.

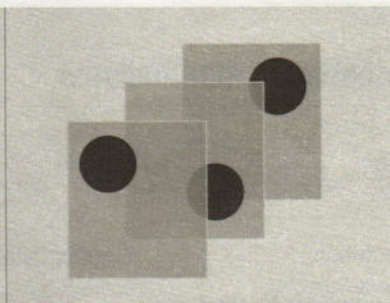


# Mais de quoi parle la mécanique quantique ?



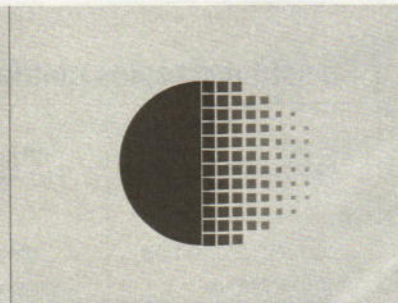
## D'ONDES PILOTES ?

Une façon d'interpréter les équations quantiques est de supposer que les particules sont accompagnées par une sorte d'onde qui guide leur chemin, mais que nous ne pouvons pas voir. Une vision ébauchée par Louis De Broglie dès 1927 et affinée par David Bohm en 1952.



## DE MONDES PARALLÈLES ?

Ici, chaque interaction d'un système quantique avec un système classique produit une bifurcation entre plusieurs univers parallèles. Élaborée par Hugh Everett en 1957, cette interprétation est populaire chez les cosmologistes.



## D'INFORMATION ?

La quantique serait une théorie de la connaissance, une formalisation des paris que nous faisons sur les conséquences potentielles de nos interventions sur la nature. Développée depuis 2000, cette interprétation est l'héritière de celle dite de Copenhague, esquissée vers 1920.

→ *"Ils déclarent tous qu'ils ont vu la lumière, la lumière ultime ! Mais si un seul de ces prêtres avait vraiment vu la lumière, il n'y aurait pas toutes ces conférences, année après année."*

## AU-DELÀ DE LA QUANTIQUE, UN MONDE PLUS VASTE QU'ELLE

Au début des années 1990, une autre approche s'est imposée : chercher non pas à réinterpréter la théorie, mais à la reconstruire à partir d'assertions physiques simples. En s'appuyant en particulier sur les nouveaux langages élaborés pour décrire les phénomènes quantiques qui permettent de calculer plus vite, de crypter des messages de manière inviolable, bref, de manipuler l'information de manière plus efficace.

Résultat : à partir du début des années 2000, plusieurs modèles de reconstruction furent proposés. Avec, de nouveau, des guerres de chapelle sur le choix des principes de départ. *"Les ensembles d'axiomes qui donnent une reconstruction complète sont*

*hétérogènes : ils contiennent beaucoup trop de présupposés de nature différente"*, regrette Alexei Grinbaum.

Aussi, depuis quelques années, s'est dégagée une troisième approche, qui consiste à jouer avec les sacro-saintes règles, à pousser la quantique dans ses retranchements, et même hors de ses frontières grâce à des modèles "quasi quantiques", "super-quantiques". *"On découvre qu'il y a plusieurs façons d'être quantique"*, s'enthousiasme Damian Markham, théoricien à Sorbonne Université, à Paris.

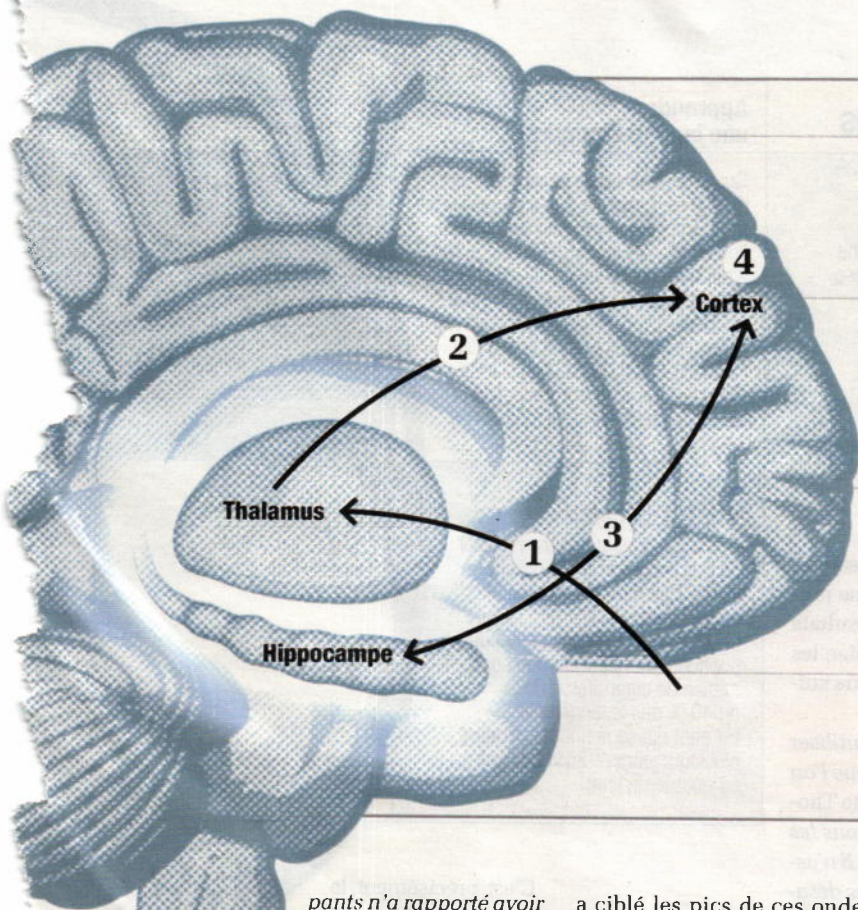
À l'instar d'Einstein qui, en 1905, partit de l'étrangeté des équations de Lorentz pour penser la physique classique comme un cas particulier d'un cadre plus vaste (voir ci-contre), cette approche vise à trouver la racine de l'"étrangeté quantique" et à la généraliser. Ces modèles permettent alors de comparer différentes facettes de la théorie. *"En étudiant le traitement de l'information dans des théories plus larges, on peut explorer les différences avec la mécanique quantique*

*et essayer, par là, d'en retrouver les motifs fondamentaux"*, expose Ana Belén Sainz.

Après cent ans de travaux mathématiques, d'expériences physiques et de réflexions métaphysiques, c'est l'émulation. *"Il y a un grand renouvellement de génération. La recherche des fondements de la mécanique quantique est désormais un domaine de recherche respecté, qui attire les jeunes"*, observe Nicolas Gisin, qui fut l'un des artisans de la révolution de l'information quantique.

Plusieurs pistes, déjà, se dégagent (lire pages suivantes). Même si les concepts qui les fondent restent encore obscurs – y compris pour ceux qui les étudient ! – chacune tire un des fils de l'étrangeté quantique pour remonter à sa source. Chacune vise le Graal : la théorie du Tout, la grande réconciliation avec la Relativité d'Einstein. Et chacune offre des perspectives vertigineuses sur cette physique plus vaste qui se cache, au-delà des apparences quantiques de notre monde.





1

### Une information sonore est perçue...

Un dormeur reçoit un son qui lui apprend ou rappelle une information.

2

### ... puis traitée par le thalamus

Ce carrefour de l'information réceptionne cette stimulation et la distribue au cortex.

3

### ... rejouée par l'hippocampe

Le cortex établit un dialogue avec l'hippocampe, qui collecte ou rejoue l'information temporairement, avant de la renvoyer au premier.

4

### ... et stockée dans le cortex !

Cette information est alors mémorisée durablement. Et le dormeur a acquis ou renforcé un savoir.

*pants n'a rapporté avoir entendu les mots diffusés", précise Marc Züst.*

Aussi impressionnante soit-elle, cette expérience ne promet pas de devenir bilingue sans même s'en rendre compte, simplement en écoutant des enregistrements durant la nuit. Les sujets sont en effet incapables, une fois éveillés, de donner la traduction des mots entendus. *"Dans la majorité des études, on est loin de nos capacités d'apprentissage d'éveil", souligne Thomas Andrillon.* Pour autant, cette expérience permet de cibler les moments du sommeil où notre cerveau est particulièrement réceptif à l'apprentissage. Tout se joue durant la phase dite de "sommeil lent", où de larges populations de neurones, au niveau du cortex, se mettent à battre à l'unisson, alternant des phases d'excitation et de silence, ce qui génère un signal électrique de grande amplitude – les ondes lentes. Dans son étude, l'équipe suisse

a ciblé les pics de ces ondes lentes: il diffusait le mot étranger lorsque arrivait un pic et sa traduction au pic suivant, ou l'inverse. Un protocole qu'il semble difficile de reproduire à la maison – *"quelques millisecondes de décalage et les mots ne sont pas mémorisés",* admet Marc Züst.

## DES FUMEURS DÉGOÛTÉS DU TABAC

En pratique, ce sont deux autres méthodes développées récemment qui réactivent le vieux rêve d'un apprentissage durant le sommeil. La première consiste à créer des associations inconscientes dans le cerveau du dormeur. L'équipe d'Anat Arzi, du département de neurologie du Weizmann Institute of Science en Israël, en a révélé tout le potentiel en 2014: en conditionnant des fumeurs pendant leur sommeil, elle est parvenue à leur apprendre à être dégoûtés en partie de l'objet de leur addiction. Elle les a exposés à deux odeurs consécutives: une odeur de cigarette, suivie d'une odeur désagréable (par exemple de poisson pourri), afin d'associer dans





## Apprendre en dormant : la preuve par 6 expériences

### Apprendre une mélodie de piano

Seize volontaires apprennent à jouer des mélodies sur un clavier avant d'être invités à faire une sieste de 90 minutes. Lorsqu'ils entrent en phase de sommeil lent, l'une des mélodies est à nouveau présentée 20 fois à faible volume, toutes les 4 minutes (méthode TMR). Au réveil, les sujets se remémorent mieux la mélodie et font moins d'erreurs que des sujets n'ayant pas bénéficié de cette réactivation.

### Apprendre une langue étrangère

Quarante-neuf sujets de langue allemande sont exposés à une centaine de mots en néerlandais avec leur traduction en allemand. Un groupe est invité à dormir 3 h et pendant son sommeil certains mots sont ou non rediffusés (méthode TMR). Un autre groupe bénéficie aussi de cette rediffusion, mais éveillé. Résultat : les sujets se souviennent mieux de leur traduction si les mots néerlandais ont été rejoués.

### Arrêter de fumer

Des volontaires désireux d'arrêter de fumer sont exposés durant le sommeil lent à une odeur de cigarette, suivie d'une odeur désagréable (méthode de conditionnement). Résultat : une consommation de cigarettes réduite de 40 % dès le lendemain. Un effet qui se maintient pendant plusieurs jours (- 25% environ au quatrième jour).

→ le cerveau le tabac à une mauvaise sensation. Un groupe contrôle était soumis au même protocole, mais en période d'éveil. Les résultats sont étonnants : contrairement à ce dernier, les fumeurs conditionnés ont réduit, les jours suivants, leur consommation.

*"Cette étude suggère que l'on pourrait utiliser le sommeil pour apprendre des choses que l'on ne peut pas apprendre à l'éveil, commente Thomas Andrillon. Prenez un fumeur qui, tous les jours, pour aller fumer, doit aller dehors. Il n'associe pas forcément la cigarette à tous les désagréments que sont le fait de sortir, d'aller dans le froid, de fumer à côté d'une poubelle, etc., car il est aussi capable de se souvenir que fumer c'est être entre amis, se détendre, etc. Être conscient l'empêche de faire des associations un peu arbitraires comme celles-ci. Le cerveau dormant, en revanche, n'est probablement pas capable de s'empêcher d'apprendre quand il est soumis à des associations arbitraires. Il est peut-être tout simplement plus facile à tromper."*

### DES EFFETS SECONDAIRES SUR LA MÉMOIRE ?

Avec un bémol : les applications du conditionnement apparaissent limitées. Car qu'en est-il d'associations plus élaborées ? Pourrait-on aussi être conditionné à être moins anxieux ? Sans doute pas. *"On peut créer des associations très élémentaires en sommeil, mais, dès que l'on arrive sur des apprentissages plus complexes, il faudrait commencer par préparer l'information au préalable, observe Philippe Peigneux. Ce qui suppose de faire un apprentissage à l'éveil, puis de le consolider pendant le sommeil."*

C'est précisément le principe d'une autre méthode mise au point ces dernières années, baptisée "réactivation mnésique ciblée" (connue sous le sigle TMR, pour Targeted Memory Reactivation). Cette fois, il n'est plus question de faire entrer de nouvelles informations dans le cerveau du dormeur, mais de renforcer la mémorisation d'informations qui s'y trouvent déjà. La méthode est simple : *"Cela consiste à faire un apprentissage à l'éveil puis à présenter pendant le sommeil des éléments liés à cet apprentissage, un son, une odeur, voire un mot, de façon à renforcer sa consolidation"*, détaille Philippe Peigneux.

En 2009, l'équipe de Ken Paller à l'université Northwestern (États-Unis) a publié une étude établissant son efficacité : des volontaires sont invités à placer 50 objets (un chat, une théière, etc.) à des endroits désignés sur un écran et à mémoriser leur emplacement. Simultanément, un son est émis pour chaque objet (miaulement pour le chat, sifflement pour la théière...). Ils doivent ensuite faire une sieste