

## Vers une nouvelle question

La mécanique quantique est l'une des théories les plus remarquables jamais élaborées. Et pourtant, malgré ses succès, sa signification profonde fait encore débat.

Les physiciens s'accordent sur les résultats, mais plusieurs interprétations de ces résultats coexistent.

Car une conséquence difficile à admettre apparaît immédiatement :  
Tant qu'aucune mesure n'est effectuée,  
la particule est décrite par un ensemble de possibilités.

Mais au moment d'une mesure,  
une seule position est observée.

Comme si la particule devait abandonner toutes les autres possibilités  
pour n'en retenir qu'une seule.

*Comme si la réalité ne se fixait  
qu'au moment où elle est interrogée.*

Une idée difficile à accepter.

Niels Bohr l'assumait :  
pour lui, la réalité est fondamentalement indéterminée.

Einstein, au contraire, s'y opposait fermement.

Pour lui, une réalité digne de ce nom  
ne pouvait pas dépendre du fait d'être observée.  
Il résumait son désaccord par une phrase devenue célèbre :

« J'aime à penser que la Lune est là, même si je ne la regarde pas. »

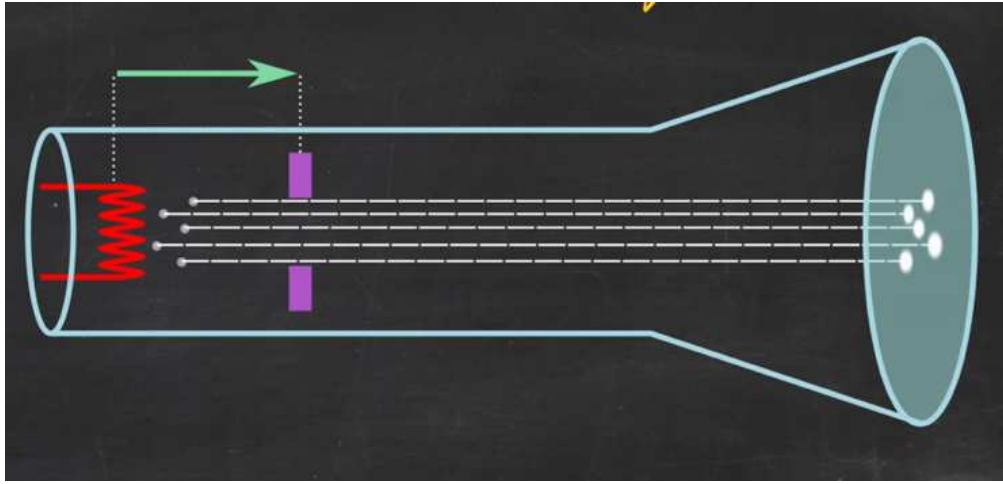
Ce qui, pour Einstein, relevait du bon sens  
allait pourtant être mis à l'épreuve par l'expérience.

## L'expérience des fentes de Young

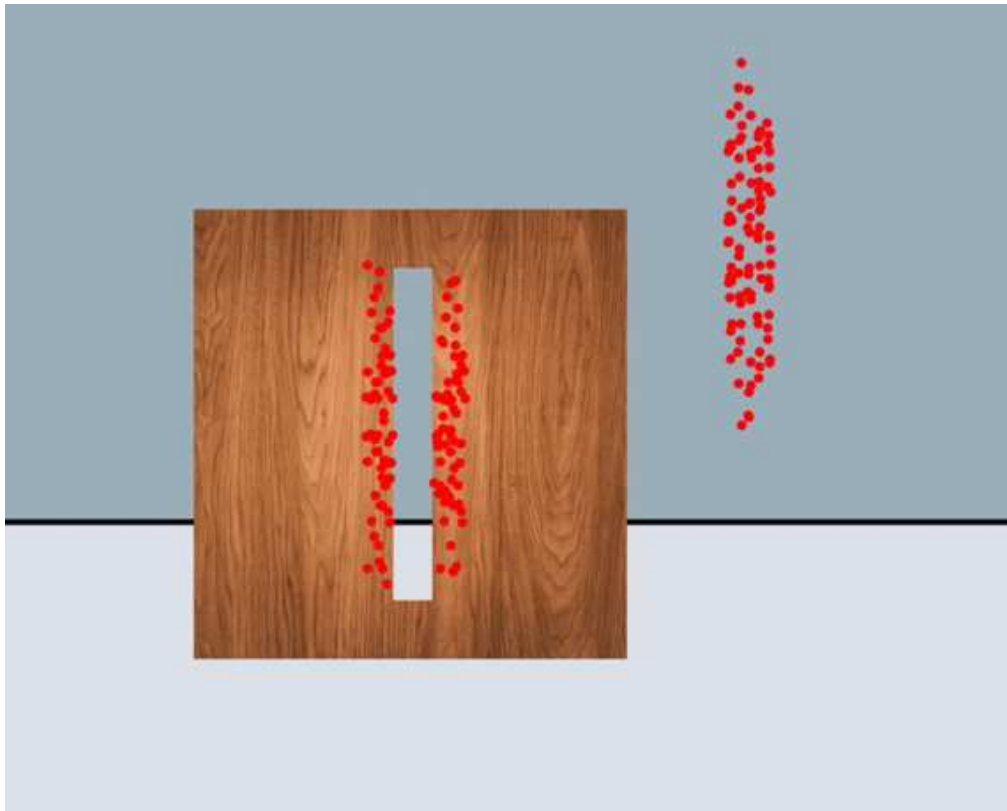
Cette expérience est l'une des plus belles expériences de la physique.  
Elle paraît simple.  
Et pourtant, elle conduit à une conclusion spectaculaire - et profondément inattendue.

### 1. Une seule fente

On envoie des particules - par exemple des électrons - vers une plaque percée d'une seule fente (en mauve).  
Derrière cette plaque, un écran enregistre les impacts.



Dans une description classique, le résultat attendu est simple.  
Si l'on envoyait de simples projectiles - comme des balles envoyées par un revolver - ils reproduiraient la forme de la fente sur l'écran.



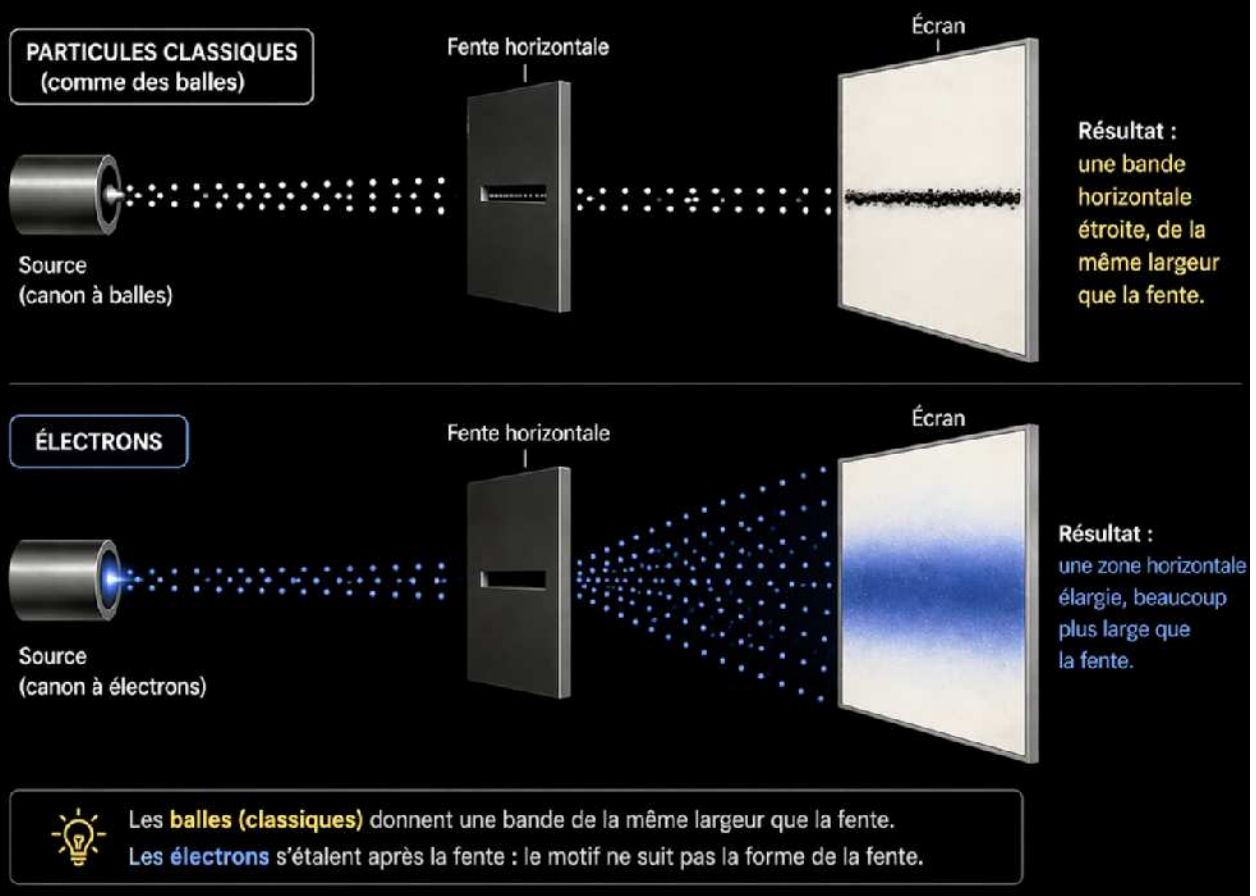
Mais avec les électrons, quelque chose ne se passe pas comme prévu.

**Les particules passent bien par la fente,  
mais au lieu de former une trace nette sur l'écran,  
elles s'évalent.**

Au lieu d'une trace précise, on observe une zone élargie,  
comme si elles ne traversaient pas en un point unique,  
mais se diffusaient.

## 1. UNE SEULE FENTE

Des particules sont envoyées vers un écran à travers une fente horizontale.

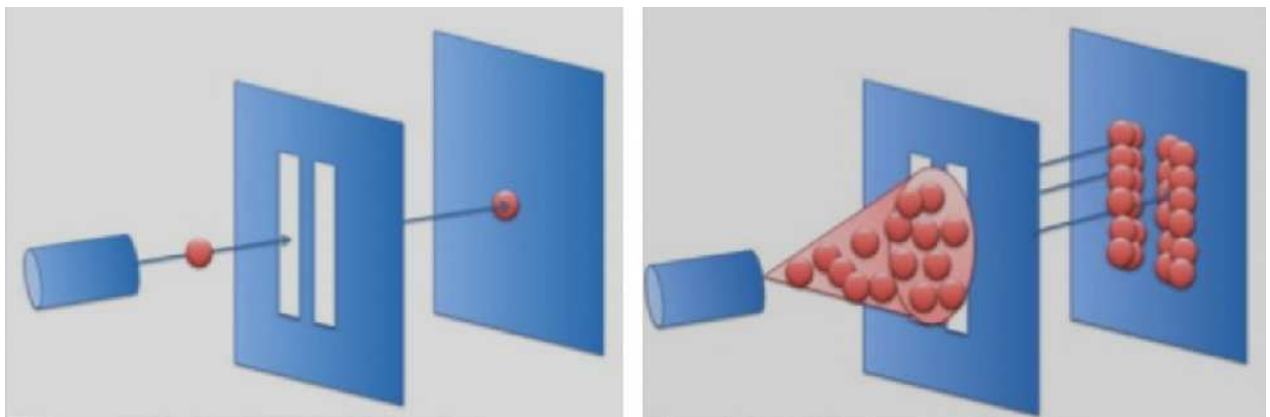


## 2. Deux fentes

On ouvre maintenant une deuxième fente.

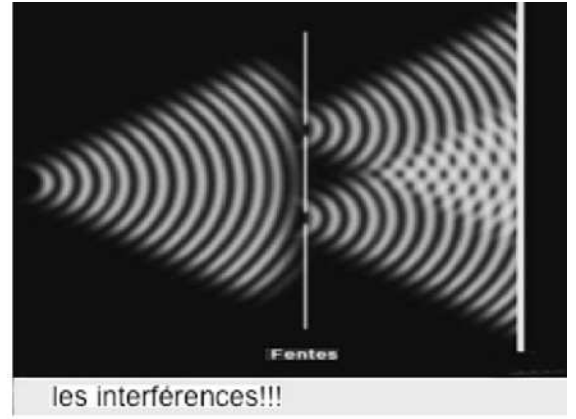
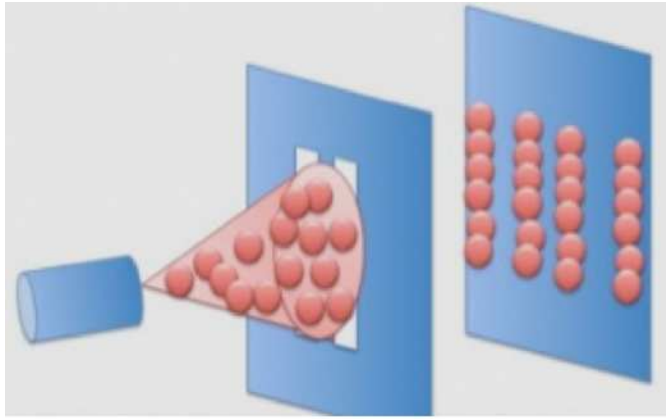
Dans une vision classique, le résultat attendu est simple.

Si les **électrons** étaient de simples corpuscules, on devrait observer deux zones d'impact correspondant aux deux ouvertures.



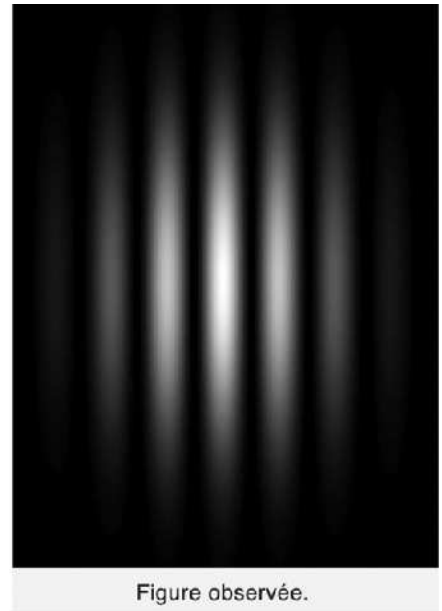
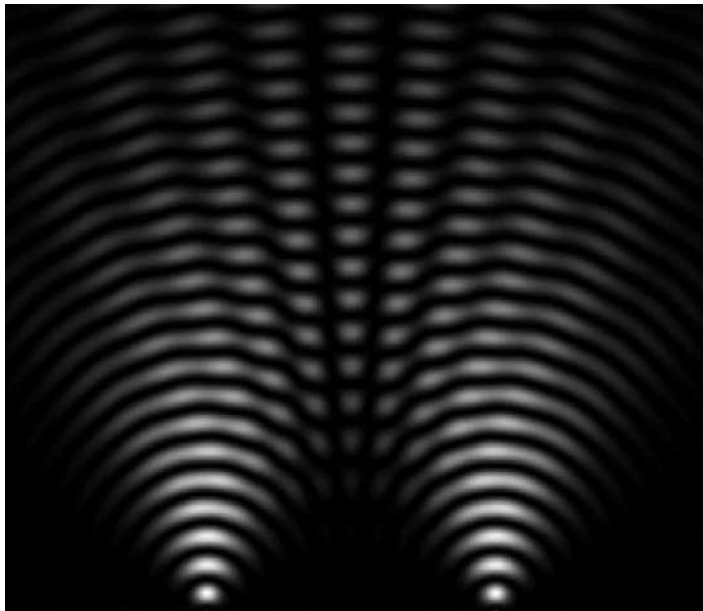
Mais ce n'est pas ce qui se produit.

À la place, apparaît un motif inattendu : une succession de bandes, **comme des vagues** qui se superposent.

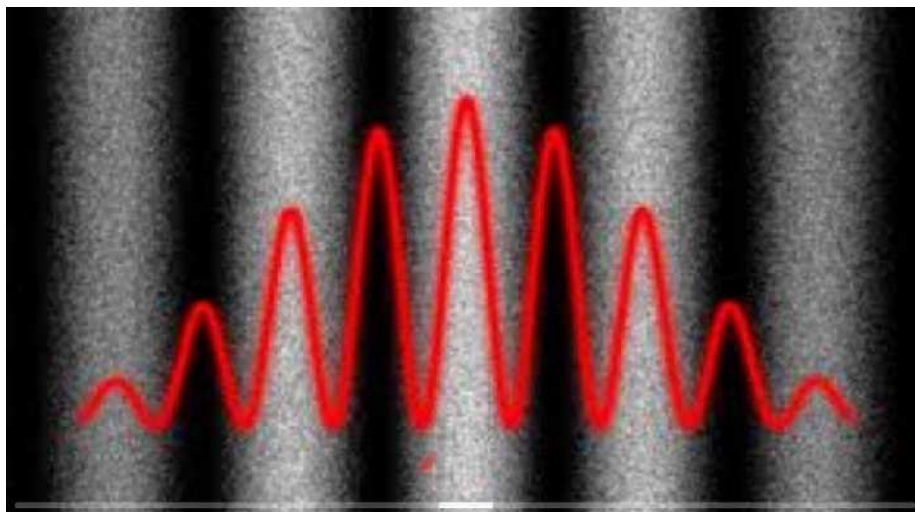


Ce motif est caractéristique d'un comportement d'ondes.

Comme si chaque particule ne passait pas par une seule fente, mais par les deux à la fois, et interférait avec elle-même.



Les deux fentes, simultanément, créent des interférences

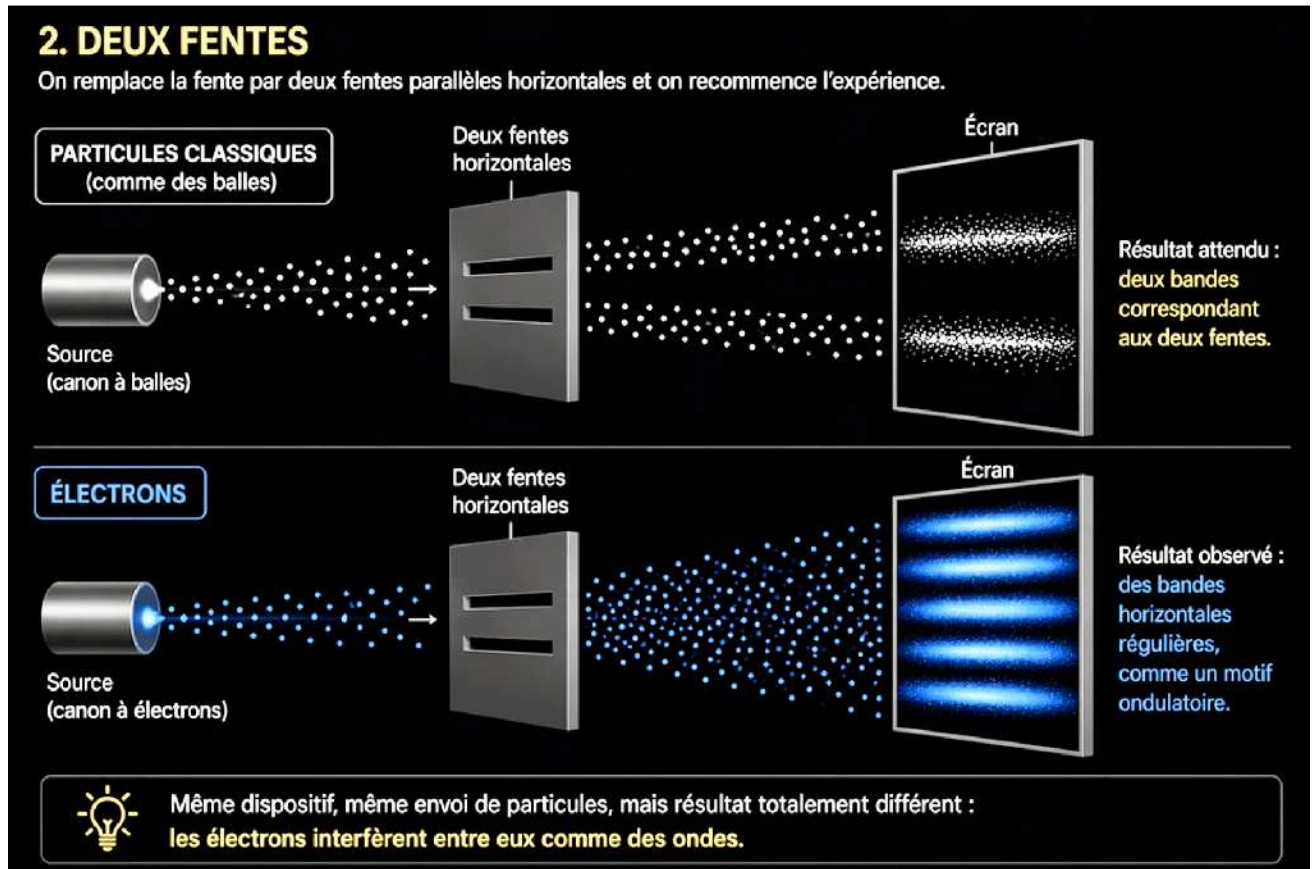


En reprenant le même schéma que pour une seule fente, la différence apparaît clairement.

## Deux fentes :

Des objets comme des balles, formeraient simplement deux bandes.

Les électrons, eux, font apparaître, une succession de bandes régulières, un motif ondulatoire.



*Avec une seule fente, le comportement des électrons est déjà surprenant.*

*Avec deux fentes, il défie notre intuition.*

## 3. Une particule à la fois

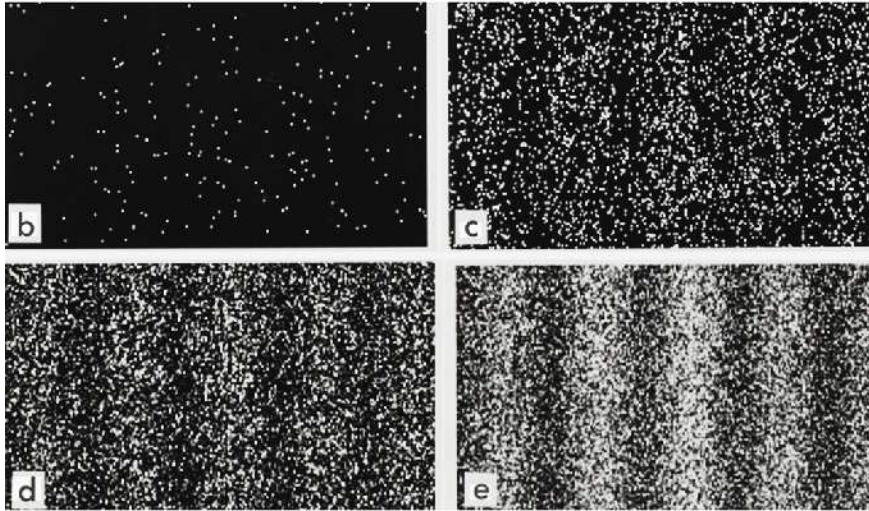
On pourrait penser que ce motif provient d'un grand nombre de particules interagissant entre elles.

Mais si l'on envoie les électrons un par un, le résultat reste le même.

Chaque impact individuel semble aléatoire.

Et pourtant, au fil du temps, un motif régulier finit par apparaître sur l'écran.

Comme si chaque particule, prise isolément, explorait plusieurs chemins à la fois.



Une particule à la fois : chaque impact paraît imprévisible.  
 Mais, peu à peu, des bandes régulières se dessinent,  
 comme si un comportement d'onde se révélait.

### 3. UNE PARTICULE À LA FOIS

On envoie les électrons un à un, en laissant le temps entre chaque envoi.

**ÉLECTRONS**  
(une à la fois)

Source (canon à électrons)

Deux fentes horizontales

Écran (accumulation des impacts)

Après quelques impacts

Après plus d'impacts

Après encore plus d'impacts

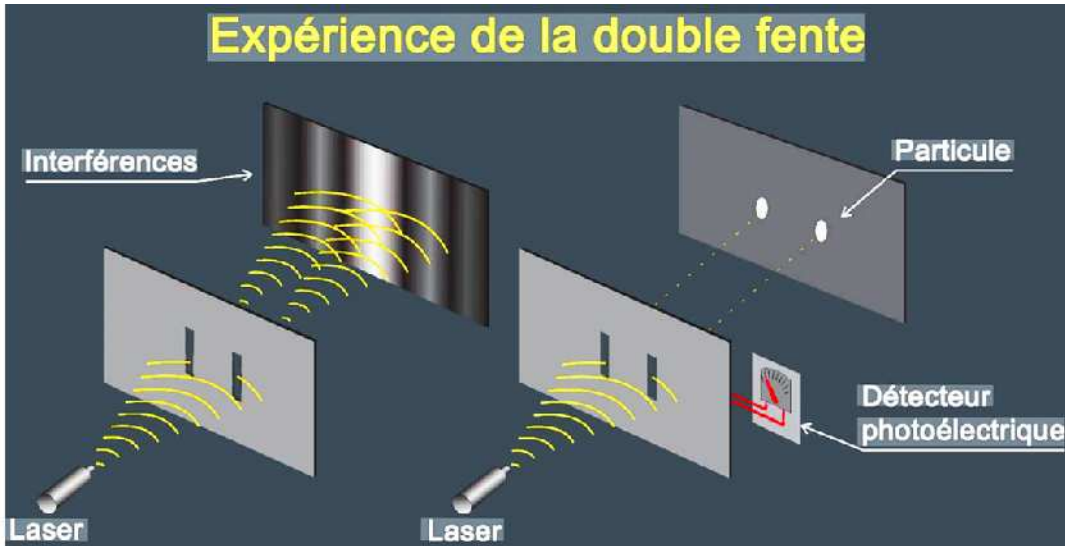
Après beaucoup d'impacts

Résultat observé : même envoyés un à un, les électrons forment progressivement un motif d'interférences composé de plusieurs bandes horizontales.

Même envoi (une particule à la fois), même dispositif, mais résultat totalement différent : les électrons interfèrent entre eux comme des ondes.

#### 4. Quand on observe, tout change

On décide alors de vérifier par quelle fente passe chaque électron.  
 On place un détecteur, un dispositif de mesure (en rouge).



Et là, tout change.

Le contraste entre les deux résultats est frappant : le motif disparaît.

Les ondes ne se manifestent plus.

À la place, on observe des impacts localisés, comme si l'on avait affaire à des particules.

Le résultat dépend donc du fait qu'une **mesure** soit effectuée...ou non.

Avec observation : lorsque l'on cherche à savoir par quelle fente passe chaque électron, les bandes ondulatoires disparaissent et seules deux bandes subsistent, comme pour des objets classiques.

### 4. EFFET DE L'OBSERVATION

Le simple fait d'observer (ou de détecter) le passage des électrons détruit le motif d'interférences.

**SANS OBSERVATION**  
(pas de détecteurs)

Source (canon à électrons)

Deux fentes horizontales

Écran

Résultat observé : un motif d'interférences composé de plusieurs bandes horizontales (claires et sombres).

**AVEC OBSERVATION**  
(détecteurs présents)

Source (canon à électrons)

Deux fentes horizontales

Détecteurs (juste après les fentes)

Écran

Résultat observé : deux bandes horizontales correspondant aux deux fentes. Le motif d'interférences disparaît.

Conclusion : le simple fait de mesurer (ou de détecter) le passage des électrons change leur comportement. Ils ne se comportent plus comme des ondes, mais comme des particules classiques.

Le résultat dépend donc du fait qu'une mesure soit effectuée... ou non.

**Comme si la réalité imposait une limite :**

on peut observer les interférences,  
ou connaître le chemin suivi,  
**mais jamais les deux simultanément.**

*Comme si voir n'était plus simplement constater,  
mais participer à ce qui se produit.*

## **Une bascule du réel**

La **mesure** change le résultat.  
Et ce résultat est profondément troublant.

Sans mesure,  
la particule se comporte comme une onde,  
comme si plusieurs possibilités coexistaient.

Avec mesure,  
elle adopte un comportement localisé,  
comme si une seule possibilité était retenue.

Comme si le réel ne prenait une forme précise  
qu'au moment où il est mesuré.

**Comme si l'observation ne se contentait pas de révéler le réel,  
mais participait au choix de ce qui se manifeste.**

Le réel ne serait pas entièrement fixé à l'avance,  
mais il se construirait en partie dans l'interaction !

Pour en saisir pleinement la portée,  
il faut suivre cette expérience pas à pas.

Son étrangeté ne surgit pas d'un seul coup :  
elle se dévoile progressivement,  
à mesure que l'on modifie le dispositif.

À chaque étape,  
alors que l'on croit retrouver un comportement familier,  
le résultat bascule.

Une présentation détaillée de cette expérience emblématique  
est proposée dans la vidéo mentionnée en référence.  
Elle permet d'en suivre clairement toutes les étapes :

<https://www.youtube.com/watch?v=zPolTp0ddRg&t=16s>  
*La Plus Belle Expérience de la Physique (16 minutes)*

S'il ne fallait retenir qu'une seule expérience  
pour interroger notre vision du réel,  
ce serait celle-ci.

Elle met en évidence un comportement profondément contre-intuitif, sans équivalent dans notre expérience quotidienne.

Ce que **la fonction d'onde** décrivait comme un **ensemble de possibilités** semble ici se manifester concrètement.

## Une transformation dans notre manière de décrire le réel

Cette expérience a profondément bouleversé la physique.

Elle montre que la réalité quantique n'existe pas indépendamment du contexte dans lequel elle se manifeste.

L'objet n'est plus premier.

La relation, l'interaction, la mesure deviennent centrales.

Il ne s'agit plus seulement de décrire ce que sont les choses, mais comment elles apparaissent, et dans quelles conditions elles prennent une forme observable.

La physique cesse d'être une simple description du monde tel qu'il serait « en soi ». Elle devient une théorie des conditions d'apparition du réel.

## La superposition des états

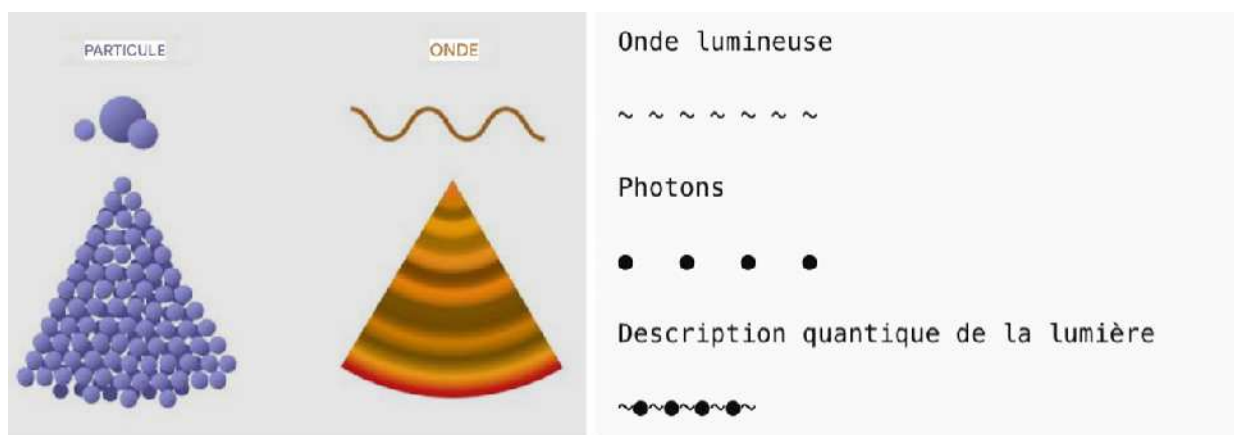
Dans le monde classique, un objet possède une position précise, une trajectoire identifiable. Il est quelque part, à un instant donné.

Dans le monde quantique, cette image ne tient plus.

De l'expérience des fentes de Young découle une conséquence majeure :

À l'échelle quantique, une particule ne se trouve pas dans un seul état défini.

**Elle peut exister dans plusieurs états à la fois.**



Ces états ne sont pas simplement des possibilités abstraites : ils coexistent réellement, simultanément.

Tant qu'aucune interaction décisive n'a lieu  
- mesure, détection, contexte -  
aucune de ces possibilités n'est privilégiée.

**Comme si, avant toute observation,  
le réel n'était pas unique,  
mais multiple.**

**C'est ce que l'on appelle le principe de superposition des états.**

## **La réduction des états**

**Un seul état devient réel**

Une question se pose alors :  
que se passe-t-il lorsque l'on mesure ?

Dès qu'une interaction intervient  
- mesure, détection, interaction avec un environnement -  
une seule de ces possibilités se manifeste,  
tandis que les autres cessent d'être observables.

Un événement n'apparaît plus  
comme l'aboutissement d'une trajectoire déterminée,  
mais comme le résultat d'un contexte  
qui contraint une possibilité à se manifester.

C'est ce passage du possible au réel  
que l'on appelle le **principe de réduction des états**  
(ou réduction de la fonction d'onde).

Ce passage ne se fait pas progressivement.  
Il est instantané.

La mesure ne révèle pas un état déjà présent :  
elle correspond à l'apparition d'un résultat unique.

Autrement dit,  
le réel quantique ne semble pas entièrement donné à l'avance :  
il se précise dans l'interaction.

Il ne se présente plus comme une collection d'objets figés,  
mais comme un processus dynamique et relationnel,  
où ce qui existe dépend  
des conditions dans lesquelles cela apparaît.

Et c'est précisément à ce point de bascule -  
entre les possibles décrits par les lois  
et le fait unique qui se manifeste -  
qu'une question commence à émerger :

qu'est-ce qui, exactement,  
participe à cette sélection ?

**Si observer semble jouer un rôle...  
alors que devient ce qui n'est pas observé ?**

**Et si les autres possibilités ne disparaissaient pas totalement,  
mais cessaient simplement d'être accessibles ?**

Comme si plusieurs scénarios coexistaient,  
sans qu'aucun ne soit encore privilégié.

Une telle hypothèse, encore déroutante,  
est pourtant envisagée dans certaines approches actuelles de la physique.  
Nous y reviendrons.

## **L'indéterminisme**

**Une autre question s'impose :**  
pourquoi un résultat plutôt qu'un autre ?

La physique ne le dit pas.  
Le résultat exact d'une mesure est imprévisible.

La mécanique quantique ne fournit pas des résultats déterminés,  
mais seulement des probabilités.

Même lorsque les lois sont parfaitement connues,  
le résultat d'un événement quantique  
ne peut pas être prédit avec certitude.

Ce n'est pas une limite de nos instruments,  
ni un manque d'information.

C'est la nature même du réel à cette échelle.

**C'est ce que l'on appelle le principe d'indéterminisme.**

Cet indéterminisme n'est pas un chaos sans règles.  
Il s'exerce à l'intérieur de contraintes strictes,  
définies par les lois quantiques.

Les lois fixent le cadre, elles structurent.  
Le résultat, lui, reste ouvert.

À ce stade, une impression peut émerger :  
tous ces principes semblent dire la même chose.  
Mais en réalité, chacun éclaire un aspect différent du réel.  
Et au final, tous convergent vers une même interrogation :

**pourquoi laisser tant de place,  
dans ce qui devient réel,  
à la mesure, à l'observation ?**

# Hasard classique vs indéterminisme quantique

Il est essentiel de distinguer cet indéterminisme du hasard ordinaire.

Dans le monde classique, un système possède toujours un état précis, même si nous ne le connaissons pas.

Par exemple, lorsqu'une balle est lancée, sa trajectoire et son point d'impact sont entièrement déterminés par les conditions initiales - vitesse, angle, forces en présence.

Nous pouvons prévoir exactement le résultat, celui-ci est déjà fixé.

C'est ce que maîtrisent précisément les joueurs expérimentés, au tennis ou au billard : en ajustant les paramètres, ils peuvent orienter le résultat avec une grande précision.

Le hasard, dans notre quotidien, ne vient donc pas du système lui-même, mais de notre incapacité à en connaître tous les paramètres, ce qu'arrive à faire un tennisman.

En mécanique quantique, la situation est différente.

Avant la mesure, le système ne possède pas un état unique déjà défini.

Même avec une description complète, le résultat individuel demeure imprévisible.

**Ce n'est plus simplement que nous ne savons pas : c'est que le réel lui-même n'est pas entièrement fixé à l'avance.**

## **A nouveau, un parallèle avec le *vivant***

D'une certaine manière, le monde quantique fonctionne comme le vivant : ni mécanique rigide, ni liberté absolue, mais un équilibre entre contrainte et ouverture.

L'ADN, par exemple, ne dicte pas chaque détail du destin d'un organisme. Il définit un cadre, mais laisse place à la variation, à l'adaptation.

Les mutations apparaissent sans intention, et leur effet ne peut pas être prévu à l'avance.

Comme dans le monde quantique,  
les règles sont présentes,  
mais le résultat n'est pas entièrement déterminé,  
ni totalement aléatoire.

## **Explorer des possibles**

Dans le vivant, une mutation ne décide pas de son effet.  
Elle ouvre une possibilité.

C'est le contexte - biologique, écologique, relationnel -  
qui lui donne un sens... ou la fait disparaître.

De la même manière,  
une particule évolue dans un espace de probabilités  
jusqu'à ce qu'une interaction fasse émerger un résultat particulier.

Dans les deux cas,  
il ne s'agit pas d'un désordre absolu,  
mais d'une exploration,  
d'une créativité encadrée.

## **L'indéterminisme comme moteur**

Ce parallèle suggère que l'indéterminisme  
n'est pas une anomalie du réel,  
mais peut-être ce qui lui permet d'évoluer,  
d'explorer,  
de faire émerger du nouveau.

Ce qui rend possible l'adaptation du vivant,  
et l'évolution elle-même.

Sans cette part d'ouverture,  
ni la matière ni la vie  
n'auraient pu explorer autant de chemins possibles.

## **Une lecture en termes d'information**

Ce jeu entre contrainte et ouverture  
peut aussi se comprendre comme un traitement de l'information.

Un système quantique n'est pas défini  
par un résultat unique,  
mais par les probabilités des résultats possibles.

Avant toute mesure,  
il ne contient pas un résultat,  
mais un ensemble de possibles.

Lorsqu'un événement se produit,  
un résultat apparaît,  
sans que l'on puisse prévoir lequel à l'avance.

La mesure ne crée pas l'information :  
elle en sélectionne une parmi celles qui étaient possibles.

## **Du vivant aux machines**

En biologie, l'ADN fonctionne comme un **code**.  
Il stocke, transmet et transforme de l'information.

La cellule lit son environnement,  
intègre des signaux,  
et agit en conséquence.

De leur côté, les physiciens parlent aujourd'hui  
de bits, de qubits,  
de calcul quantique,  
de correction d'erreurs,  
de bruit et de décohérence.

Dans les deux cas - quantique et génétique -  
le réel semble moins fonctionner  
comme une machine mécanique  
que comme un système de traitement de l'information.

L'ordinateur classique suit un programme déterministe.  
L'ordinateur quantique, lui, explore plusieurs chemins possibles  
avant qu'un résultat n'émerge,  
sans que l'on puisse prévoir lequel.

De même, le vivant n'exécute pas un destin écrit à l'avance.  
Il explore, teste, expérimente, s'adapte.

À toutes les échelles,  
le réel ne se contente pas d'exister :  
il explore en permanence ses propres possibles.

## **Une nouvelle vision du réel**

Dans ce cadre,  
l'indéterminisme ne vient pas perturber l'ordre du monde.  
Il en fait partie.

La loi fixe les règles du jeu.  
Mais elle ne détermine pas entièrement ce qui se produit.

L'information circule.  
Les possibles s'ouvrent.  
Et une réalité prend forme.

# Ouverture

Un questionnement devient alors inévitable,  
mais reste encore ouvert :

si la matière est une forme d'information,  
et si cette information n'est qu'un ensemble de possibles,  
qui, ou quoi, fait qu'un possible devient réel ?  
Pourquoi cette réalité plutôt qu'une autre,  
et suivant quel principe ?

## Deux réponses possibles

Deux réponses peuvent alors être envisagées.

La première suppose qu'un choix s'opère.  
Quelque chose - interaction, mesure, contrainte -  
sélectionne un possible parmi tous les autres.

La réalité que nous percevons  
serait alors le résultat de cette sélection.

La seconde ouvre une perspective différente.

Et si aucun choix ne supprimait réellement les autres possibilités ?  
Et si, au lieu qu'un seul résultat s'impose,  
toutes les issues se réalisaient ?

Chaque possibilité existerait alors,  
mais dans des univers différents.  
Ce que nous appelons "réalité"  
ne serait que l'une de ces branches.

## Une hypothèse prise au sérieux

Cette idée n'est pas seulement philosophique.  
Elle est aujourd'hui envisagée dans certaines approches de la physique  
notamment à travers les théories du multivers -  
**une hypothèse que nous aurons l'occasion d'explorer.**

## Une question plus profonde encore

Mais, dans les deux cas, une question demeure.

Qu'est-ce qui organise cet ensemble ?  
Qu'est-ce qui donne une cohérence à ces possibles,  
qu'ils soient sélectionnés... ou tous réalisés ?

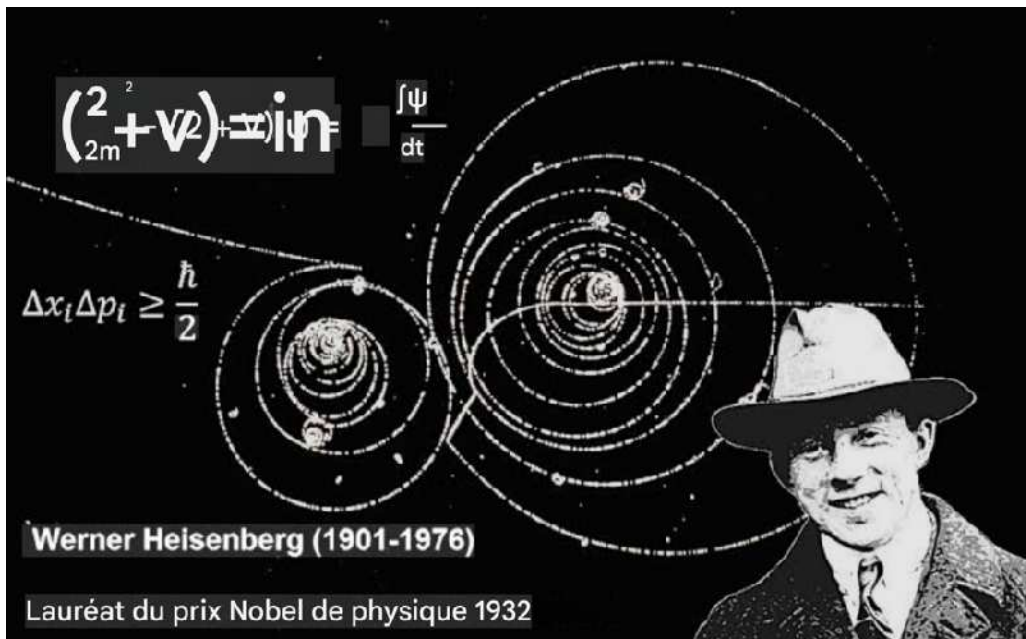
Pourquoi ces lois,  
ces structures,  
ces formes d'émergence ?

*Pourquoi quelque chose plutôt que rien -  
et pourquoi cela, précisément, plutôt qu'autre chose ?*

La physique ne répond pas encore à ces questions... elle en ouvre sans cesse de nouvelles.

## Principe d'incertitude

En 1928, Werner Heisenberg met en évidence une autre limite fondamentale, connue sous le nom de principe d'incertitude.



*Il est impossible de connaître simultanément, avec précision, la position et la vitesse d'une particule.*

Plus on précise la position d'un électron, plus sa vitesse devient floue - et inversement.

Le monde quantique impose une contrainte :  
certaines grandeurs ne peuvent pas être déterminées **en même temps**.

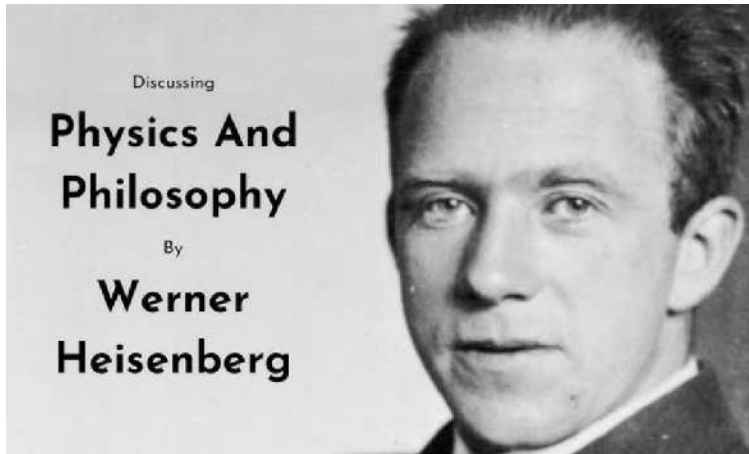
*Connaître, c'est renoncer.*

Cette incertitude n'est pas un flou accidentel,  
ni une imperfection de nos instruments,  
mais une propriété intrinsèque du réel à cette échelle.

Elle ne signifie pas que le réel est mal défini,  
mais qu'il ne peut pas être entièrement décrit  
à travers une seule mesure.

Chercher à fixer complètement une grandeur,  
c'est en perturber une autre.

Observer, c'est intervenir.  
Mesurer, c'est transformer.



L'idée d'un monde entièrement descriptible,  
indépendant de l'acte d'observation,  
ne tient plus.

Une grandeur ne se précise jamais sans qu'une autre se dérobe.

Le réel ne peut pas être entièrement saisi dans une seule image.  
Vouloir tout fixer - position et mouvement -  
reviendrait à perdre de la netteté de l'un ou de l'autre.

Serait-ce demander trop d'informations en une seule fois ?

Comme si le réel ne pouvait jamais être saisi dans sa totalité,  
à l'image d'un support dont la configuration impose des choix.

## **Un écho dans le vivant**

Ce principe ne concerne pas seulement les particules.  
Il trouve, une fois encore, un écho dans le vivant.

Un organisme ne peut pas tout optimiser en même temps :  
stabilité et adaptation,  
précision et plasticité,  
sécurité et exploration.

Choisir une stratégie  
implique nécessairement un compromis.

De la même manière que pour la particule,  
le vivant ne peut être entièrement figé  
sans perdre sa capacité à se transformer.

## **Un lien avec la Relativité**

D'une certaine manière,  
cette idée fait écho à la Relativité.

Rappelez-vous : **la vitesse de la lumière étant constante**,  
le temps et la distance s'ajustent l'un à l'autre.

$$\text{vitesse} = \frac{\text{distance parcourue}}{\text{temps écoulé}}$$

On ne peut pas fixer ces grandeurs indépendamment :  
les préciser implique des transformations réciproques.  
Puisque que le résultat ne varie jamais : la vitesse de la lumière (300 000 km/seconde)

Sans être de même nature,  
les deux approches révèlent une limite comparable :  
certaines grandeurs ne peuvent être définies séparément  
sans affecter les autres.

Peut-être est-ce là une loi plus générale :  
connaître, c'est toujours choisir un point de vue.

L'accès simultané à toutes les informations d'un phénomène  
dépasse ce qu'une seule observation peut contenir.

## **Synthèse des principes déjà abordés**

À travers ces principes - quantification, dualité onde-corpuscule, superposition,  
réduction des états, indéterminisme et incertitude -  
une idée se dégage :

le réel n'est plus un ensemble de choses fixes,  
mais un système de relations,  
où ce qui peut être connu dépend du point de vue adopté,  
et où, contraint par des lois,  
tout ne peut pas être saisi simultanément.

Mais l'étrangeté du monde quantique ne s'arrête pas à ces principes.  
D'autres phénomènes viennent encore en confirmer la portée.

## **L'effet tunnel**

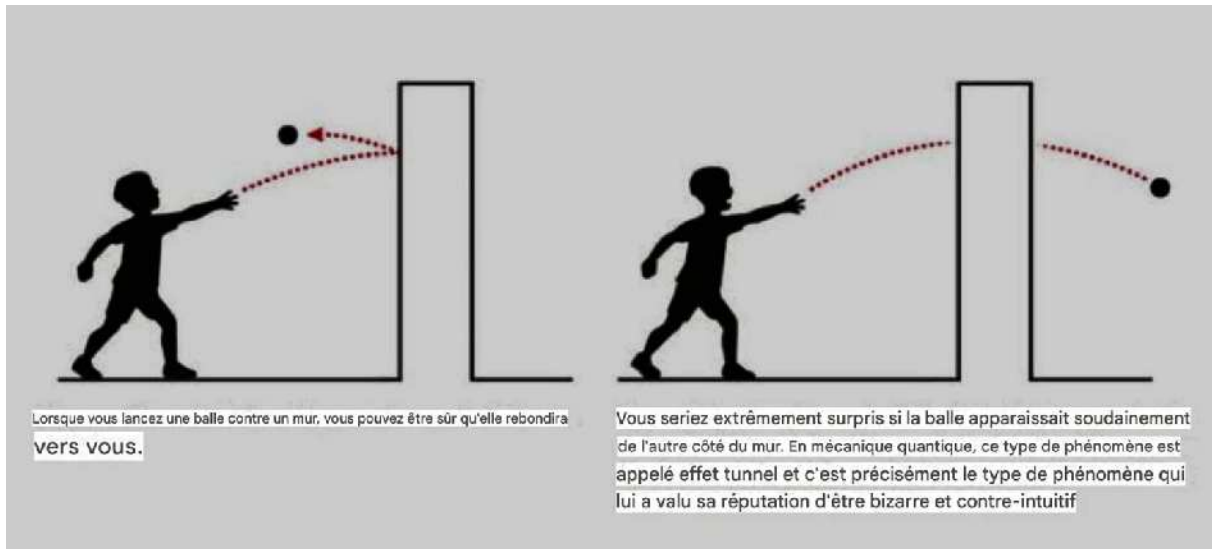
Dans la physique classique,  
une particule dont l'énergie est inférieure à celle d'une barrière  
ne peut pas la franchir.

Si une balle est lancée contre un mur,  
elle ne le traverse pas.  
Elle rebondit.

La règle est simple :  
si l'énergie manque, le passage est interdit.

À l'échelle quantique, cette évidence disparaît.

Une particule peut se retrouver de l'autre côté d'une barrière, sans posséder l'énergie nécessaire pour la franchir.



Elle ne saute pas l'obstacle.  
Elle ne le contourne pas.  
Elle traverse une zone qui, classiquement, devrait lui être inaccessible.

Ce phénomène - l'effet tunnel -  
découle de la nature ondulatoire des particules.

La particule n'est plus localisée en un point précis :  
elle est décrite par une onde qui peut s'étendre  
de part et d'autre de la barrière.

Il existe alors une probabilité, faible mais réelle,  
de la retrouver de l'autre côté.

## Un phénomène fondamental

Ce phénomène n'est pas anecdotique.

Il est au cœur du fonctionnement des étoiles,  
où il permet à des noyaux de fusionner malgré leur répulsion.

Il est essentiel aux semi-conducteurs,  
où des électrons traversent des barrières pourtant infranchissables,  
rendant possible le fonctionnement des transistors  
et de toute l'électronique moderne.

Il intervient aussi dans la chimie du vivant :  
Dans certaines réactions biologiques,  
des particules comme des protons franchissent des barrières énergétiques  
qu'elles ne devraient pas pouvoir traverser,  
permettant des transformations moléculaires essentielles,  
notamment lors de la réplication de l'ADN.

Sans ces franchissements improbables,  
ni les étoiles,

ni l'électronique,  
ni certaines réactions du vivant  
ne pourraient exister.

Les lois interdisent,  
tout en laissant subsister une possibilité.

L'effet tunnel en est une illustration,  
directement issue des principes de la physique quantique.

À cette échelle, le réel ne se présente plus comme une frontière absolue,  
mais comme un seuil, ...où ce qui semblait impossible cesse d'être interdit,  
dans certaines conditions.

## Un écho dans le vivant

Ce principe trouve, une fois encore, un écho dans le vivant.

Face à un obstacle - manque de ressources, stress extrême, rupture d'équilibre -  
le vivant ne "force" pas le passage.

Il explore,  
il tente,  
et parfois,  
il franchit là où, en théorie, il ne devrait pas passer.

L'évolution ne procède pas uniquement par continuité,  
mais aussi par franchissements,  
par chemins inattendus.

Là encore, ce n'est pas la puissance qui crée le passage,  
mais l'existence même d'une ouverture dans le possible.

## Un écho en cosmologie

Cette logique apparaît aussi à l'échelle cosmique.

Stephen Hawking a notamment suggéré que,  
dans un univers où les effets quantiques dominent,  
des **micro-trous noirs** pourraient apparaître spontanément.

Minuscules, éphémères,  
ils se formeraient puis disparaîtraient presque instantanément,  
comme des manifestations fugitives  
de la structure quantique du réel.

Ils ne franchissent pas les lois par la force.  
Ils émergent brièvement dans la structure du réel,  
révélant que certaines limites ne sont pas absolues,  
mais seulement transitoires.

## Un écho aux frontières de la vie

Une autre manière d'évoquer ce franchissement apparaît dans certaines expériences humaines extrêmes, notamment les expériences de mort imminente.

Certains témoignages décrivent cette sensation de traverser des murs, comme si la matière devenait soudain franchissable.

Sans établir de lien direct,  
ces récits interrogent notre manière de concevoir la mort,  
et, à travers elle, les limites du réel.

S'agit-il d'une simple analogie,  
d'une métaphore du passage entre différents niveaux du réel,  
ou d'une résonance plus profonde au sein du réel ?

Dans tous ces cas - quantique, biologique, cosmologique,  
et peut-être même dans certaines expériences humaines -  
il ne s'agit pas d'un déplacement ordinaire,  
mais d'un franchissement de seuil.

Quelque chose passe,  
là où, en théorie, rien ne devrait passer.

## Des limites qui s'ouvrent

L'effet tunnel suggère que le réel, encadré par des lois,  
n'est pas un système fermé,  
mais un système créatif où, dans des situations particulières,  
le possible n'est jamais totalement verrouillé.

Les lois fixent le cadre.  
Les obstacles existent.  
Mais il demeure,  
au cœur même du réel,  
des interstices, des zones de passage.

Comme si le réel n'était pas seulement ce qui est,  
mais aussi ce qui peut, parfois,  
advenir autrement.

L'effet tunnel confirme, sans ambiguïté, que  
la physique quantique ne suit pas  
les règles intuitives du monde classique.

Mais l'étrangeté du monde quantique ne s'arrête pas là.  
Elle touche aussi à la manière dont les choses sont reliées entre elles.

# Principe d'intrication

Dans les années 1980, les expériences du physicien Alain Aspect ont confirmé un phénomène déjà prédit par la théorie quantique : l'intrication, aussi appelée non-séparabilité.

Deux particules qui ont interagi ne peuvent plus être décrites indépendamment l'une de l'autre.

Elles forment un seul système, même lorsqu'elles sont séparées par de très grandes distances.



Lorsqu'on mesure l'état de l'une, on connaît instantanément celui de l'autre.

Et le point essentiel est que rien ne semble circuler entre elles.

Il n'y a ni signal, ni transmission mesurable.

Et pourtant, le résultat apparaît immédiatement corrélé, comme si la distance n'existait pas.

## Exemple simplifié

Imaginons deux objets liés, dont la couleur n'est pas définie à l'avance.

Avant toute observation, ils ne sont ni noirs, ni blancs.

Ils sont dans une superposition de possibilités.

Au moment où l'on observe le premier, il devient noir.

Et immédiatement, l'autre devient blanc.

Ce n'est pas que les couleurs étaient fixées à l'avance.

Ce n'est pas non plus qu'une information a voyagé de l'un à l'autre.

C'est que ces deux objets ne formaient, depuis le départ, qu'un seul système.

**La mesure ne révèle pas une propriété préexistante : elle participe à la définir - toujours de manière corrélée.**

# Le doute d'Einstein

Ce phénomène a profondément troublé les physiciens.

Albert Einstein parlait d'une  
« action fantomatique à distance ».

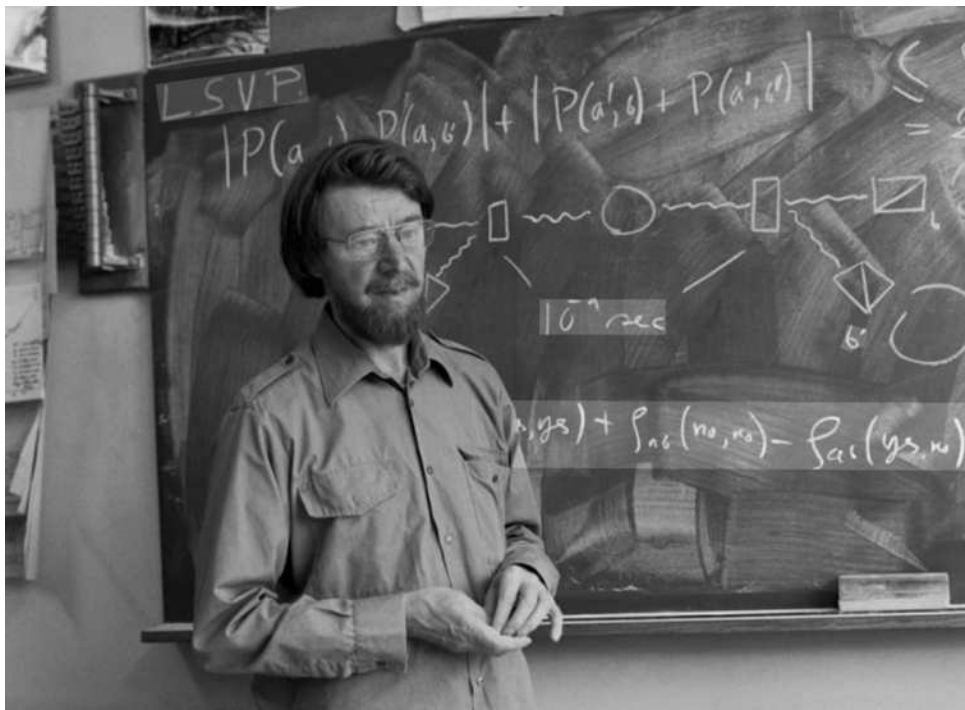
Pour lui, cela ne pouvait pas être la description complète de la réalité.  
Il pensait qu'il devait exister des "variables cachées".

Une analogie simple permet de comprendre son idée :  
imaginez une paire de gants - un droit et un gauche - placés dans deux boîtes, envoyées loin l'une de l'autre.  
En ouvrant une boîte et en trouvant un gant droit, on sait immédiatement que l'autre contient un gant gauche.

Pour Einstein, l'intrication devait fonctionner de cette manière :  
les propriétés seraient déjà déterminées, simplement inconnues avant la mesure.

## La réponse de la physique

Le physicien John Bell a apporté une avancée décisive.



Dans les années 1960, il a démontré **mathématiquement** que l'idée d'Albert Einstein - celle de "variables cachées" expliquant les corrélations - pouvait être mise à l'épreuve par l'expérience.

Autrement dit, il ne s'agissait plus d'un débat philosophique :  
il devenait possible de trancher.

Bell a établi des inégalités (des limites précises) que toute **théorie**, basée sur des propriétés prédéfinies, devait respecter.

Dans les années 1980, Alain Aspect réalise une série d'**expériences** déterminantes.



Ses résultats montrent que les inégalités de Bell sont violées.  
Donc le modèle des “gants cachés” ne pouvait pas être correct.

Cela signifie que les propriétés des particules ne sont pas simplement “cachées” avant la mesure.

Elles ne sont pas déjà définies quelque part, en attente d’être révélées.

Pour cette confirmation expérimentale majeure, Alain Aspect a reçu le prix Nobel de physique en 2022.

## Ce que cela change vraiment

Ce résultat est fondamental.

Il ne s’agit pas seulement de dire que nous ignorons certaines informations.

Il indique que ces informations **n’existent pas sous une forme définie, avant la mesure.**

Dans le cas de l’intrication,

**la mesure ne définit pas seulement une particule :  
elle définit l’état du système entier,  
et donc aussi celui de l’autre particule.**

Ce que l’on observe ne se contente pas de révéler le réel :  
**cela participe à sa définition.**

## Ce que cela remet en question

La physique interdit *toute transmission d’information plus rapide que la lumière.*  
Et pourtant, dans l’intrication, le lien semble instantané.

C’est ici que nos repères commencent à vaciller :  
si rien ne circule entre les particules,  
si aucun signal ne les relie,  
alors qu’est-ce qui permet cette corrélation immédiate ?

L’intrication ne montre pas simplement deux particules qui “communiquent”.

Elle suggère une possibilité plus radicale : peut-être qu’elles ne sont pas réellement séparées.

Deux particules intriquées ne sont plus deux objets séparés.  
Elles forment un tout.

À cela s'ajoute une autre difficulté.

Dans notre intuition classique, deux objets éloignés deviennent indépendants l'un de l'autre.  
La distance crée une coupure.  
Elle installe une frontière.

Avec l'intrication, cette évidence vacille.

Ce que nous percevons comme deux entités distinctes pourrait n'être qu'un seul et même système.

Ce système intriqué ne se décrit plus seulement comme un ensemble d'objets,  
mais comme un réseau de relations.

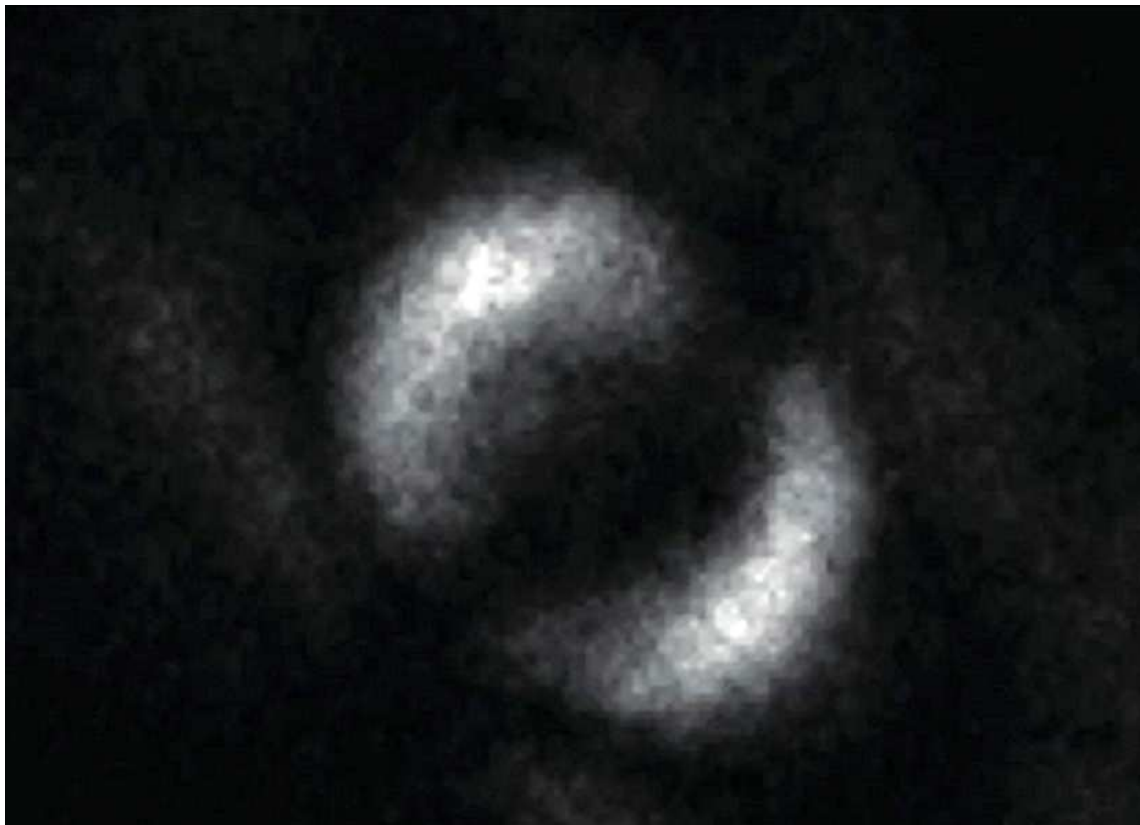
La séparation ne serait alors qu'une apparence,  
liée à notre manière d'observer.

Le problème n'est donc pas seulement de comprendre  
comment deux particules restent liées.

Il est de comprendre si la séparation elle-même est aussi fondamentale que nous le croyons.

### **Une image bien réelle, aux allures de symbole**

Le 14 août 2019, une équipe de l'Université de Glasgow a obtenu la toute première image de deux photons intriqués.



*Deux formes symétriques comme la trace d'un baiser.  
Une proximité qui persiste malgré la séparation.*

## Repenser la séparation

Et si la distance n'était qu'une propriété de notre perception du monde, et non une limite fondamentale du réel ?

Et si certaines connexions existaient indépendamment de l'espace lui-même ?

L'intrication ne nous dit pas que tout est relié au sens poétique du terme. Elle nous montre, plus précisément, que la séparation n'est pas toujours absolue.

Alors pourquoi pas imaginer  
que l'univers ne soit pas constitué d'objets isolés,  
mais d'un réseau d'interactions où tout se définit par ses liens ?

Elle nous oblige à revoir une idée profondément ancrée :  
la distance n'implique pas nécessairement l'indépendance.

Et c'est peut-être là que le trouble commence vraiment.

Si la séparation n'est pas aussi absolue que nous le pensions,  
qu'implique cette continuité cachée  
pour notre manière de penser la matière, le vivant...  
et ce qui les relie ?

## Une réalité déjà à l'œuvre

L'intrication n'est pas une curiosité théorique confinée aux seuls laboratoires. Elle constitue aujourd'hui le socle d'une nouvelle génération de technologies : cryptographie quantique, téléportation d'états, ordinateurs quantiques.

Ces applications ne relèvent plus de la science-fiction. Elles sont déjà en développement, parfois même en usage. Elles vont profondément transformer notre manière de communiquer, de calculer, d'échanger, de sécuriser et de traiter l'information.

Ce paradoxe est frappant.  
Nous ne comprenons pas encore pleinement ce phénomène,  
et pourtant, nous savons déjà l'utiliser.

Plus largement, toute la physique quantique a déjà profondément bouleversé notre quotidien. À l'échelle atomique, les propriétés de la matière changent, et c'est précisément cette étrangeté qui a rendu possible l'ensemble de l'électronique moderne.

Transistors, microprocesseurs, lasers, circuits intégrés, téléphones, GPS...  
toute notre technologie repose sur des lois quantiques.  
Nous les utilisons chaque jour, sans même y penser.

Si la mécanique quantique cessait de fonctionner,  
la quasi-totalité de nos machines s'arrêterait instantanément.

Après avoir rendu possible l'électronique moderne, la physique quantique ouvre aujourd'hui une nouvelle phase, qui va encore plus loin.

Cette phase est déjà en cours de développement, et certaines applications commencent à émerger, notamment pour sécuriser dans les communications.

En remplaçant le bit classique (0 ou 1) par le qubit, les ordinateurs quantiques peuvent explorer simultanément un grand nombre de possibilités.

Cela ouvre la voie à une puissance de calcul inédite.

Des problèmes qui prendraient des milliers d'années à nos machines actuelles pourraient être résolus en quelques minutes.

Les conséquences sont immenses.

Dans le domaine de la santé, cela pourrait permettre de simuler des molécules complexes, d'accélérer la découverte de médicaments, ou de mieux comprendre certains mécanismes du vivant.

Dans d'autres domaines, cela pourrait transformer la sécurité des communications. Grâce aux propriétés quantiques des particules, toute tentative d'interception modifie immédiatement le système observé, permettant ainsi de détecter une intrusion ou un espionnage. Cela pourrait aussi révolutionner l'intelligence artificielle, ou encore la prévision de phénomènes complexes.

Ce n'est pas un futur lointain. Les plus grandes entreprises technologiques - Microsoft, Google, IBM, Alibaba - ainsi que des chercheurs du monde entier, investissent massivement dans ces technologies.

Et pourtant...

Malgré ces avancées spectaculaires, le cœur du phénomène reste mystérieux.

Nous savons le manipuler.  
Nous savons en tirer parti.  
Mais nous ne savons toujours pas, au fond, ce qu'il est.

Comme le disait Niels Bohr :  
« Quiconque n'est pas choqué par la physique quantique ne la comprend pas. »

La mécanique quantique fonctionne.  
Elle transforme déjà notre monde.  
Mais elle continue de nous échapper.

Peut-être parce qu'elle ne décrit pas notre réalité  
mais la manière dont elle se crée.

# La Physique Quantique : du monde des objets au monde des relations

Maintenant que nous avons exploré les fondements de la physique quantique, il est intéressant de revenir au point de départ.

Ce qui, au début, pouvait apparaître comme une idée déroutante  
- un vide qui n'est pas vide,  
un monde sans propriétés fixes,  
une réalité faite de possibles -  
prend désormais une autre dimension.

Nous comprenons qu'il ne s'agit pas d'images ou d'analogies,  
mais d'une description fidèle du réel à l'échelle quantique.

Le vide n'est plus un "rien",  
mais un état actif, instable,  
où surgissent en permanence des fluctuations d'énergie.  
Il ressemble moins à un néant qu'à une mer invisible en agitation continue.

Mais surtout, notre manière même de décrire le monde s'est transformée.

La physique quantique ne décrit plus un monde d'objets dotés de propriétés fixes,  
mais un tissu de relations et de probabilités,  
où les propriétés ne prennent sens qu'à travers les interactions.

Le réel devient alors contextuel :  
il dépend des conditions d'observation,  
de la manière dont il est interrogé,  
et du cadre dans lequel il se manifeste.

Ce qui nous semblait étrange ne l'est pas moins aujourd'hui,  
mais il devient intelligible.  
Non pas parce que ces phénomènes deviennent intuitifs,  
mais parce que nous avons appris à en comprendre la logique.

Cette transformation de notre manière de comprendre le réel  
ne repose pas sur une seule idée,  
mais sur un ensemble de principes complémentaires.

Chacun éclaire une facette particulière du monde quantique.  
Pris isolément, ils peuvent sembler déroutants.  
Mais ensemble, ils dessinent une cohérence nouvelle.

C'est à travers eux que se construit progressivement cette vision du réel  
faite de probabilités, de relations et de contextes.

## Résumé des principes quantiques

Principe	Question posée
Quantification	Pourquoi l'énergie fonctionne par « quanta »
Dualité onde-corpuscule	Qu'est-ce qu'une particule ?
Superposition	Dans quel état est-elle avant la mesure ?
Mesure	Que change l'acte de mesurer ?
réduction des états	Que se passe-t-il lors de la mesure ?
Indéterminisme	Peut-on prévoir le résultat ?
Incertitude	Peut-on tout connaître en même temps ?
Effet tunnel	Un obstacle est-il toujours infranchissable ?
Intrication	Des systèmes peuvent-ils rester liés à distance ?

Ces principes ne décrivent pas des phénomènes indépendants.  
Ils participent tous à une même révolution :  
le réel n'est pas continu,  
il n'est pas toujours défini,  
il n'est pas entièrement prévisible,  
il ne se laisse pas connaître complètement,  
l'acte d'observer semble faire partie du phénomène lui-même,  
et il ne se compose pas nécessairement d'éléments séparés.

## Les pionniers de l'invisible

Si on les applique à notre quotidien, ces principes bouleversent profondément notre manière de voir le monde qui nous entoure.

Ils trouvent leur origine dans le travail de scientifiques qui ont osé remettre en question les fondements mêmes de la physique - et, ce faisant, toute notre compréhension de la réalité.

Leurs découvertes n'ont pas été immédiates, ni évidentes.  
Ils n'étaient pas toujours d'accord entre eux.  
Certains doutaient, d'autres résistaient.

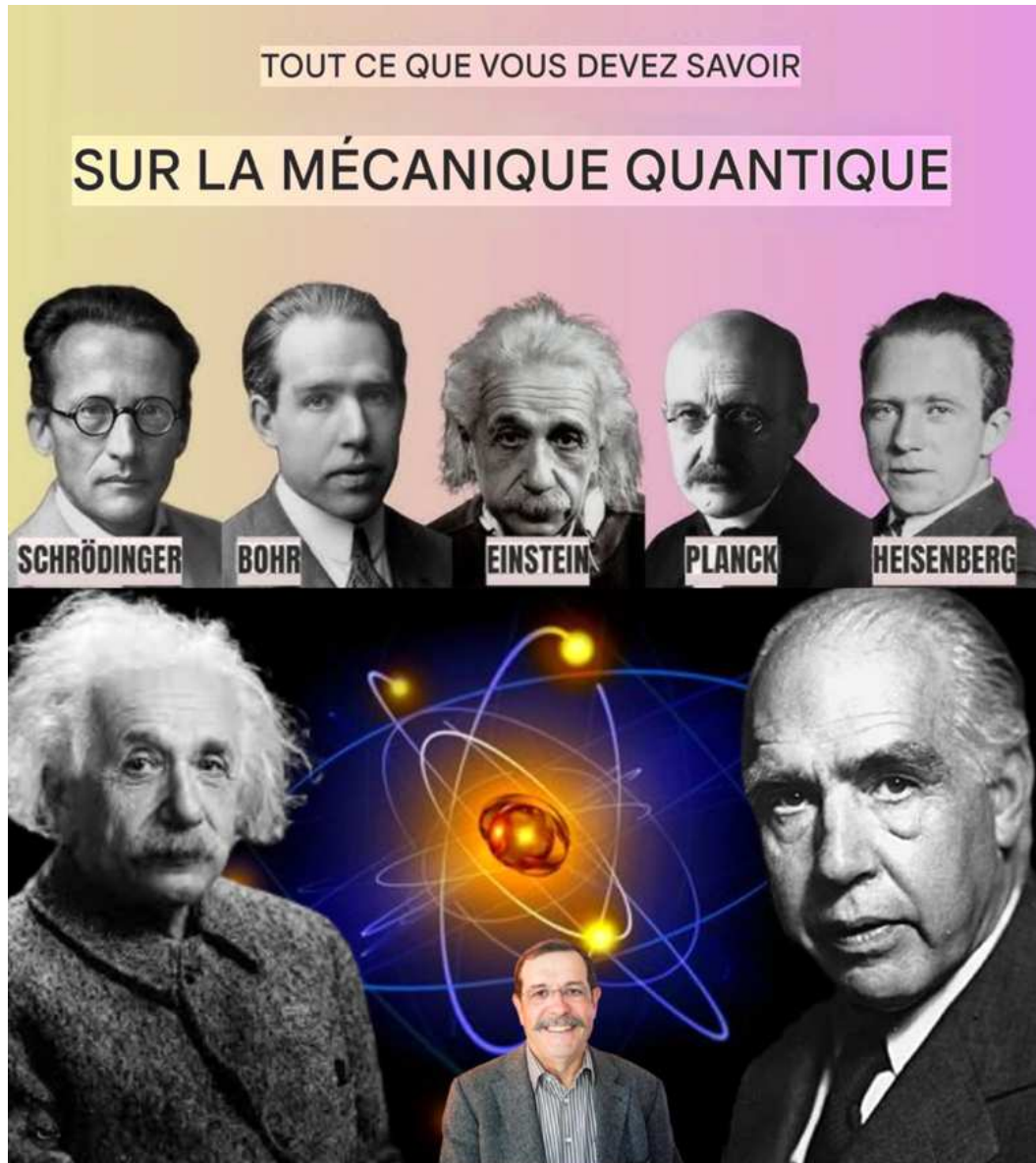
Leurs idées ont suscité des débats, parfois même de l'incompréhension,  
y compris chez ceux qui en étaient à l'origine.

Certains, comme Albert Einstein,  
refusaient d'accepter pleinement les implications de cette nouvelle théorie.  
D'autres, comme Niels Bohr,  
y voyaient une transformation radicale de notre rapport au réel.

Avec Max Planck,  
Werner Heisenberg,  
Erwin Schrödinger  
et bien d'autres,  
ils ont ouvert une brèche irréversible dans notre vision du monde.

Aucun d'eux n'a jamais prétendu en donner une compréhension complète.  
Et pourtant, la théorie fonctionne.

Et aujourd'hui encore, malgré les avancées expérimentales, quelque chose nous échappe.



## Une théorie d'une précision extrême... mais encore mystérieuse

La physique quantique repose sur une multitude d'expériences rigoureuses et reproductibles. Elle est aujourd'hui l'une des théories les plus précises jamais élaborées. Et pourtant, elle demeure profondément mystérieuse.

Avant toute mesure, ce que décrit la théorie n'est pas un objet au sens classique, mais une fonction d'onde : une description des possibles.

Cela soulève une question fondamentale :

*décrit-elle une réalité physique objective,  
ou seulement l'information disponible sur le système ?*

Ce débat dépasse la technique.  
Il touche à la nature même du réel.

## La causalité à l'épreuve

**Dans la physique classique, la causalité est claire, locale et ordonnée.**

Une cause précède un effet.  
Les événements sont reliés par des trajectoires continues.  
L'information se transmet de proche en proche.

Le monde évolue ainsi comme une chaîne logique,  
même si elle peut être extrêmement complexe.

Même en **Relativité**, malgré la courbure de l'espace-temps, cette structure demeure.  
Rien ne se propage plus vite que la lumière, et l'ordre causal reste respecté.  
La causalité y devient plus subtile, mais elle n'est jamais remise en cause dans son principe.

Avec la **physique quantique**, cette vision se transforme.  
Une particule peut exister dans plusieurs états possibles avant la mesure.  
Deux particules peuvent rester corrélées à distance sans cause locale identifiable.  
Et un événement ne conduit plus à un résultat unique, mais à un ensemble de probabilités.

La causalité ne disparaît pas,  
mais elle cesse d'être linéaire.  
Elle devient relationnelle, statistique, dépendante du contexte.

Autrement dit, ce n'est plus :  
« **A cause B** »,  
mais :  
« **A rend possible plusieurs B, selon le contexte** »

## De la réalité aux possibles

Dans le monde quantique, la causalité ne relie plus des faits déjà fixés.  
Elle organise des possibilités.

Ce n'est qu'au moment de l'interaction qu'un résultat particulier émerge.

Dans cette perspective, certains en viennent à se demander  
si l'univers n'est pas, à un niveau fondamental, de nature informationnelle - voire  
holographique -  
où ce que nous appelons "réalité" émergerait d'un jeu de corrélations et de relations.

La physique quantique ne tranche pas cette question.  
Mais elle la rend impossible à ignorer.

Cela ne conduit pas immédiatement à la conscience.  
Mais cela oblige à poser une question nouvelle :

*qu'est-ce qui transforme un ensemble de possibles en un fait unique ?*

À partir de là, le rôle de l'observateur ne peut plus être évacué aussi facilement.  
Non comme une réponse,  
mais comme une interrogation ouverte.

Et c'est précisément à cet endroit -  
entre la matière, l'information et l'acte d'interaction -  
que s'ouvre la suite de notre exploration.

## **Une théorie établie, des questions ouvertes**

Même si, au départ, la physique quantique semblait surgir de l'imagination de quelques scientifiques audacieux,  
elle est aujourd'hui solidement établie.

Et pourtant, le mystère demeure.

Pourquoi ces comportements étranges semblent-ils disparaître à mesure que l'on change d'échelle ?

Pourquoi, dans notre monde macroscopique, une seule réalité apparaît-elle,  
alors que le monde quantique explore une multitude de possibles ?

Nous ne disposons pas encore de réponse complète.

Certains pensent que la théorie est inachevée.  
D'autres envisagent que toutes les possibilités continuent d'exister,  
mais dans des univers différents.

Dans cette vision, la réalité ne se réduit pas à une seule issue,  
mais se ramifie en permanence.

La physique quantique reste un territoire largement inexploré.  
Et nul ne peut encore prédire jusqu'où cette compréhension nous mènera.

Peut-être n'existe-t-il pas de frontière nette  
entre l'infiniment petit et l'infiniment grand.

Les lois quantiques s'appliqueraient partout,  
mais leurs effets deviennent moins visibles à grande échelle,  
soit parce que les interactions avec l'environnement effacent les autres superpositions,  
soit, selon certaines interprétations, parce que les différentes possibilités continuent d'exister  
sans que nous puissions les percevoir.

Elles se déploieraient alors sans interférer, dans des branches distinctes :  
c'est l'une des interprétations dites des multivers.

La physique quantique révèle une réalité difficile à saisir, mais rigoureusement décrite.

Elle ne nous donne pas seulement des réponses.  
Elle nous apprend à poser de nouvelles questions.

# Une frontière... ou une limite de notre compréhension ?

Où tracer la frontière entre ces deux descriptions du réel ?

Quand faut-il faire appel à la physique quantique, et quand la Relativité suffit-elle ?

À première vue, la réponse semble simple.

La Relativité décrit le monde de l'infiniment grand :  
les planètes, les étoiles, les galaxies,  
les grandes vitesses et la structure de l'espace-temps.

La physique quantique s'applique à l'infiniment petit :  
les atomes, les particules,  
les phénomènes à très petite échelle.

On pourrait donc croire que la frontière est une question de taille.

Petit : quantique.

Grand : Relativité.

Mais cette réponse est trompeuse.

Il n'existe pas de limite nette dans la nature.

Il n'y a pas de point précis où les lois changent brutalement.

En réalité, les deux descriptions coexistent.

Même les objets de notre quotidien obéissent encore aux lois quantiques, bien que ces effets deviennent invisibles à grande échelle.

À notre niveau, les effets quantiques ne sont plus directement perceptibles,  
et le monde nous apparaît stable.

Quant à la Relativité, elle décrit l'espace, le temps et la gravitation, mais ses effets deviennent négligeables dans la plupart des situations du quotidien.

Ils ne deviennent visibles que dans des conditions extrêmes :

très grandes masses,

fortes gravités,

grandes vitesses.

Chacune devient ainsi dominante dans des conditions différentes.

Mais il existe des situations où les deux théories deviennent indispensables :

au cœur des trous noirs

et aux tout premiers instants de l'univers.

Là où l'infiniment petit et l'infiniment grand se rencontrent.

Et c'est précisément là que le problème apparaît.

Car ces deux théories, pourtant extrêmement précises,  
ne sont pas encore compatibles entre elles.

Peut-être que cette frontière que nous cherchons  
n'est pas une limite dans la nature,  
mais dans notre compréhension.

# La science comme chemin, pas comme fin

Lorsqu'on commence à explorer la physique moderne...  
cela ne s'arrête plus.

Relativité,  
cosmologie,  
trous noirs,  
thermodynamique,  
quantique,  
information...

Chaque réponse ouvre de nouvelles questions.  
C'est exactement ce qui arrive aux physiciens eux-mêmes.

Beaucoup décrivent la physique fondamentale comme un paysage de montagnes où chaque col franchi révèle d'autres sommets à découvrir.

Ce livre suit ce même chemin :

- structures du vivant
- lois physiques
- espace-temps
- trous noirs
- limites
- information

Et au bout :  
non pas des réponses définitives,  
mais une ouverture.

Et à mesure que l'on avance, le paysage s'élargit encore.  
Ce que l'on croyait comprendre ouvre sur ce que l'on ne comprend pas encore :

- la gravité quantique
- l'origine de l'univers
- la nature de la matière noire
- l'énergie sombre
- l'origine de la flèche du temps
- la structure profonde de l'espace-temps

Autrement dit :  
la science elle-même est un livre sans fin.

C'est ici qu'apparaît l'un des plus grands défis de la physique moderne :  
réunir ces deux descriptions du monde en une théorie cohérente.