

L'étrange réalité Quantique

<https://www.youtube.com/watch?v=N2H5w5p04ms>

Chaîne : Balade mentale

Intro Claude Sonnet 4

Ce document présente une vulgarisation remarquable de la physique quantique, révélant comment notre compréhension du réel a été bouleversée au 20^{ème} siècle.

L'auteur structure habilement son propos autour des expériences fondamentales (double fente, intrication, choix retardé) avant d'explorer les différentes interprétations philosophiques que les physiciens ont développées pour donner sens à ces phénomènes troublants.

Ce qui frappe particulièrement, c'est la manière dont la physique quantique remet en question nos notions les plus basiques : la position, le temps, la causalité, et même l'existence d'une réalité indépendante de l'observation. Le paradoxe du chat de Schrödinger illustre parfaitement l'absurdité apparente de ces règles quantiques appliquées à notre échelle.

L'analyse se termine sur une note d'humilité scientifique : reconnaître que l'univers pourrait être fondamentalement inaccessible à notre compréhension intuitive, tout en continuant à l'explorer mathématiquement et expérimentalement. Cette tension entre l'incompréhensible et l'émerveillement constitue peut-être l'essence même de la démarche scientifique moderne.

Résumé Recall

00:00

- Au cours du siècle dernier, en explorant l'infiniment petit, les scientifiques ont découvert un type de réalité insensée qui défie les notions classiques de position, d'objet et de temps, et qui peut être résumée par les quatre mots "c'est quoi ce bordel ?"
- **00:22**
- Dans l'infiniment petit, les choses peuvent exister à plusieurs endroits à la fois, et observer une expérience peut modifier son résultat, ce qui remet en question les notions de position, d'objet et de temps
- **00:36**

- La physique quantique, mise au point par les chercheurs, est capable de décrire et prédire le comportement de la matière dans l'infiniment petit avec une précision effarante, mais personne ne comprend vraiment ce que ces découvertes signifient pour la nature et la réalité
- [00:57](#)
- Face à ce constat frustrant, certains des plus grands esprits de l'humanité ont commencé à développer des interprétations possibles de ces expériences, qui peuvent sembler difficiles à accepter et qui risquent de déstabiliser notre compréhension de la réalité
- [01:15](#)
- Le voyage à travers ces découvertes et interprétations promet d'être risqué pour notre cerveau, mais il peut également offrir une vue grandiose et vertigineuse une fois arrivé au sommet, et il est préférable de s'y engager avec prudence et ouverture d'esprit
- [01:43](#)

L'expérience de la double fente

[03:18](#)

- L'expérience de la double fente résume l'étrangeté de l'infiniment petit et permet de se rafraîchir la mémoire sur ce sujet
- [03:18](#).
- Cette expérience est simple sur le papier et consiste en une source qui envoie de la lumière ou des particules quantiques, telles que des électrons, en direction d'une plaque percée de deux fentes verticales
- [03:33](#).
- Derrière la plaque percée de deux fentes, un écran ou un mur est placé pour enregistrer la position des impacts, c'est-à-dire l'endroit précis où les particules vont s'écraser
- [03:45](#).

Une onde

[03:53](#)

- Lorsqu'une source laser est utilisée, l'onde lumineuse passe à travers les deux fentes en même temps, puis se divise en deux ondes secondaires qui interfèrent entre elles, comme les ondes à la surface d'un lac, dont les crêtes et les creux se renforcent ou s'annulent en fonction de la façon dont elles se croisent
- [03:53](#).

- Cette interférence crée un motif étrange sur l'écran, ressemblant à un code-barre psychédélique, composé d'alternance de bandes claires et sombres, qui montre la nature ondulatoire de la lumière
- [04:08](#).
- Jusqu'à présent, ce phénomène n'est pas très perturbant et semble logique, car il démontre simplement la nature ondulatoire de la lumière
- [04:23](#).
- Cependant, lorsque l'on remplace les rayons de lumière par des particules, telles que des électrons, et que l'on réalise la même expérience, le monde bascule dans l'étrange
- [04:32](#).

Une particule seule

04:51

- Lorsqu'on tire sur un mur percé de deux fentes avec une mitrailleuse propulsant de petites billes, on s'attend à observer des points d'impact distribués de manière aléatoire, mais ce n'est pas ce qui se passe aux échelles de l'infiniment petit
- [04:51](#).
- À mesure que des électrons viennent les uns après les autres sur le mur, leurs impacts commencent à dessiner un motif qui ressemble à celui obtenu avec de la lumière, bien que les électrons soient des particules matérielles avec une masse, et chaque électron se comporte comme une onde qui passe par les deux fentes à la fois
- [05:11](#).
- Chaque électron, envoyé un par un, se comporte comme une onde qui interfère avec elle-même sur le trajet et se transforme en particule lorsqu'il impacte le mur, pour finir par s'écraser à un endroit bien précis
- [05:39](#).
- Les électrons ont été envoyés un par un, et pourtant, chacun d'entre eux a passé par les deux fentes à la fois avant d'interférer avec lui-même et de se transformer en particule pour aller s'écraser sur le mur
- [05:58](#).

L'observation modifie le réel

06:16

- Lorsqu'on cherche à savoir quel chemin chaque électron emprunte en installant un petit détecteur au niveau des fentes, les électrons passent par l'une ou l'autre des fentes et le motif d'interférence disparaît à l'écran final, comme si le fait de les observer les oblige à adopter un comportement de particules

- 06:16.
- Le simple fait d'observer le monde dans l'infiniment petit modifie le résultat final de l'expérience, ce qui signifie que poser une question peut changer la réponse, et cela constitue une véritable bombe dans la compréhension de l'univers
- 06:51.
- L'électron ne passe ni par une fente, ni par l'autre, ni par les deux en même temps, mais explore simultanément toutes les trajectoires qu'il peut potentiellement prendre, et le chemin finalement emprunté dépend de ce que l'on choisit d'observer
- 07:21.
- À l'échelle de l'infiniment petit, tant qu'on ne regarde pas, l'univers explore toutes les options possibles, mais dès qu'on l'observe, il semble choisir, ce qui signifie que l'on crée ce qui est en intervenant, plutôt que de simplement découvrir quelque chose
- 07:35.
- La compréhension des significations profondes des phénomènes mis à jour par cette expérience est considérée comme très difficile, même pour les physiciens, car cela touche au cœur des bizarreries qui règnent en maître dans le royaume de l'infiniment petit
- 08:04.

Dualité onde-particule

08:19

- Dans le monde macroscopique, les objets ne peuvent emprunter qu'un chemin à la fois, mais aux échelles quantiques, les particules peuvent emprunter plusieurs chemins en même temps et se comporter comme une onde et comme une particule
- 08:19.
- Les particules, comme les photons, les électrons, les atomes, et même les molécules comprenant des centaines d'atomes, ont été étudiées dans des expériences refaites des milliers de fois, et à chaque fois, le même phénomène se produit, montrant que les particules peuvent se comporter de manière différente de ce que l'on attend dans le monde macroscopique
- 08:31.
- Les physiciens ont dû admettre qu'il existe un monde fait d'objets impossibles à suivre à la trace, et qui ne peuvent être décrits que sous la forme d'ondes de probabilités de présence, ce qui signifie que ces objets ne préexistent pas à notre regard, mais se construisent avec lui
- 08:43.
- Les expériences ont été menées dans des conditions très bien contrôlées, ce qui confirme la validité des résultats et montre que les particules

peuvent se comporter de manière quantique, même dans des systèmes complexes composés de plusieurs centaines d'atomes

- [08:52.](#)
- La dualité onde-particule est un phénomène qui a été observé et confirmé à plusieurs reprises, et qui remet en question notre compréhension classique de la réalité, en montrant que les objets quantiques peuvent exister sous différentes formes et se comporter de manière imprévisible
- [09:00.](#)

Nuages de probabilité

[09:17](#)

- La physique quantique peut être considérée comme un tour de magie où les particules, comme l'électron, ne se comportent pas comme des objets solides avec une position et une vitesse bien définies, mais plutôt comme des fonctions d'ondes ou des nuages de probabilités
- [09:17.](#)
- Les particules, y compris l'électron, se trouvent dans une superposition d'états, ce qui signifie qu'elles peuvent exister à plusieurs endroits en même temps, et leur matière est contenue dans des bulles de brouillard et de possibilités
- [09:31.](#)
- Lorsque l'on tente de mesurer ou de observer ces particules, leur fonction d'onde s'effondre, et elles passent d'un état de nuages diffus de probabilités à un point extrêmement bien localisé, ce qui peut être comparé à un jeu de cache-cache avec un joueur qui n'existe pas jusqu'à ce que l'on le trouve
- [09:45.](#)
- Cette propriété de la physique quantique suggère que, aux très petites échelles, la réalité est une sorte de brouillon perpétuel, où rien n'est défini jusqu'à ce que l'interaction avec d'autres éléments du réel ne pousse la particule à "publier un paragraphe" ou à choisir une position définie
- [10:17.](#)
- Une fois que ces idées sont acceptées, elles peuvent s'installer dans l'esprit et y rester, permettant de mieux comprendre les phénomènes quantiques, même si cela peut sembler fascinant et difficile à comprendre au début
- [10:32.](#)

L'Intrication

[10:38](#)

- L'intrication quantique est une propriété de la matière qui a surpris de nombreux physiciens, car lorsqu'on prend deux particules telles que des électrons et qu'on les fait interagir, on peut les intriquer en leur faisant passer une sorte de pacte quantique qui les oblige à partager un état commun
- [10:38](#).
- Si deux particules intriquées sont envoyées dans des directions opposées, même à des milliers de kilomètres l'une de l'autre, elles conservent une corrélation instantanée, ce qui signifie que si l'on mesure l'une d'elles, l'autre le sait et se comporte en conséquence immédiatement, sans aucun délai
- [11:00](#).
- Ce phénomène d'intrication quantique semble violer la règle d'airain qui stipule que rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière dans le vide, ce qui a déplu à Einstein, qui a indirectement contribué à cette découverte
- [11:18](#).
- Cependant, cet étrange phénomène d'intrication quantique ne contredit pas la relativité, car aucun message ne se transmet entre les particules, mais plutôt, deux particules quantiques peuvent former un système unique, un seul et même objet, même si elles sont séparées par des distances immenses
- [11:36](#).
- L'intrication quantique permet donc de comprendre que deux particules peuvent être liées de manière instantanée, même à des distances considérables, sans que cela implique un échange d'information plus rapide que la lumière, ce qui est un concept fondamental de la mécanique quantique
- [12:09](#).

L'expérience qui remonte le temps

12:10

- La mécanique quantique est un domaine où l'avenir, le passé et l'intention se croisent de manière complexe, comme dans une salle d'attente qui n'existe pas encore, ce qui peut être troublant
- [12:10](#).
- Une variante de l'expérience de la double fente, appelée expérience à choix retardé, a été mise au point, qui semble être capable de remonter le temps et de modifier le comportement des particules, notamment des électrons, en fonction de l'observation ou non de leur trajet
- [12:25](#).
- Dans cette expérience, le détecteur est allumé après que l'onde ait passé par les deux fentes, et le fait de choisir d'observer ou non l'endroit par

lequel l'onde est passée va changer son comportement a posteriori, ce qui signifie que l'onde réécrit son propre passé en fonction de ce qu'on décide de savoir dans son présent

- [12:40.](#)
- Le passé n'est pas gravé dans le marbre de la réalité, mais semble parfois attendre qu'on choisisse d'observer pour se décider, ce qui signifie que ce que l'on fait maintenant peut influencer ce qui s'est passé avant, notamment à l'échelle de l'infiniment petit
- [13:04.](#)
- Cette idée est difficile à imaginer et va à l'encontre de notre compréhension du monde macroscopique, où le passé détermine le présent, et où notre décision de déjeuner aujourd'hui ne modifie pas ce que nous avons mangé hier
- [13:21.](#)
- Dans le monde quantique, tout se passe comme si un jus de fruits pouvait ne pas avoir de goût tant que vous n'en buvez pas, et une fois que vous y trempez les lèvres, celui-ci peut changer de fruit, ce qui illustre le fait que le temps n'est pas une ligne droite avec une direction préférée
- [13:46.](#)
- L'expérience à choix retardé nous dit que dans l'infiniment petit, le temps n'est pas une ligne droite avec une direction préférée, et que le futur n'est pas une conséquence du passé, car les causes ne précèdent pas toujours les effets
- [14:07.](#)

L'expérience à retardement quantique

[14:14](#)

- Il existe une expérience appelée l'expérience à retardement quantique, qui montre que le comportement des particules peut être influencé par les choix faits après leur passage, même si l'on ne mesure pas directement par quelle fente la particule est passée, mais que l'on fait en sorte qu'elle laisse une empreinte de son passage
- [14:14.](#)
- Le comportement des électrons sur le trajet et les motifs qui apparaissent sur le mur dépendent de ce que l'on fait de l'information stockée, que l'on n'a pas encore choisi de regarder, et si cette information sur le chemin emprunté reste accessible, il n'y a aucune interférence
- [14:25.](#)
- Si l'on décide d'effacer l'information après le passage des électrons, le motif d'interférence réapparaît, ce qui suggère que l'univers s'adapte après coup en fonction de ce que l'on choisit de ne pas savoir
- [14:45.](#)

- Le résultat de cette expérience est difficile à comprendre et semble défier la logique classique, car il implique que le comportement quantique peut être influencé par des choix faits après les faits, ce qui est une idée contre-intuitive
- [14:54.](#)
- L'expérience à retardement quantique montre que le comportement des particules peut être influencé par les choix faits après leur passage, et que l'information stockée sur le chemin emprunté par les particules peut affecter les motifs qui apparaissent sur le mur, même si l'on ne mesure pas directement le chemin emprunté
- [15:06.](#)

Un monde flou ?

[15:24](#)

- La science révèle la magie au lieu de la briser, et il est important de noter que la physique quantique décrit le comportement des choses dans le domaine de l'infiniment petit de manière à montrer que le monde est intrinsèquement flou
- [15:24.](#)
- La physique quantique ne suggère pas que nos connaissances sont incomplètes ou approximatives, mais plutôt que le comportement des particules est fondamentalement incertain, même avec des connaissances approfondies comme celles d'Einstein et de Yoda combinées à la puissance de tous les ordinateurs du monde
- [15:39.](#)
- Même avec une grande puissance de calcul, il est impossible de prédire exactement où se trouve un électron avant de l'avoir observé, ce qui n'est pas un défaut de connaissance ou du système, mais plutôt une règle qui régit le système lui-même, caractérisé par un mélange de hasard et d'apparente folie
- [15:54.](#)
- Le comportement des particules est fondamentalement incertain, et toutes les options possibles sont envisagées jusqu'à ce que la mesure fasse tomber le rideau de probabilités, obligeant la fonction d'onde à se figer le flou dans une position
- [16:08.](#)

Les interprétations du monde quantique

[16:30](#)

- La physique quantique est comparable à une boîte de chocolat, car on ne sait jamais précisément sur quoi on va tomber, et cela peut être déconcertant pour ceux qui sont attachés à la logique
- 16:30.
- La mécanique quantique a permis de mettre au point des technologies telles que les lasers, les IRM, les transistors et les ordinateurs, mais malgré sa précision, elle ne nous dit rien des raisons profondes qui font que le réel se comporte de façon déconcertante
- 16:43.
- Les particules quantiques obéissent à des règles étranges, mais on ne comprend pas pourquoi elles choisissent une trajectoire plutôt qu'une autre, et on se pose des questions sur la nature du réel lorsqu'on ne tente pas de l'observer
- 17:30.
- La mécanique quantique reste muette face à ces questions, et elle ne nous parle que de la partie du réel qui veut bien se montrer à un instant donné, ce qui est philosophiquement explosif
- 17:53.
- Les physiciens sont frustrés par leur incapacité à comprendre les principes fondamentaux de la physique quantique, et ils ont commencé à regarder sous le capot de la machine pour tenter d'y trouver du sens
- 18:23.
- Il existe aujourd'hui une dizaine de grandes interprétations possibles de la physique quantique, qui sont toutes en concurrence, et chacun de ces scénarios peut retourner le cerveau de manière différente
- 19:04.

L'école de Copenhague

19:26

- L'interprétation de Copenhague est une façon de comprendre le monde quantique en refusant de s'attarder sur les aspects complexes et en acceptant que les choses n'ont pas de propriété définie avant d'être mesurées
- 19:26.
- Selon cette interprétation, le monde est flou et rempli de superpositions, de probabilités et d'états parallèles tant que rien n'est mesuré, et c'est seulement lorsqu'on l'observe que une réalité est choisie et que l'indécision se transforme en résultat clair
- 19:45.
- Cette interprétation peut être résumée par l'idée de « ne posez pas de questions, faites les calculs, ça marche, c'est déjà génial », ce qui peut être vu comme un pragmatisme muet ou un refus d'obstacles par certains

- [20:07.](#)
- L'interprétation de Copenhague suggère que la réalité n'existe peut-être pas en tant qu'arrière-plan permanent du monde, mais plutôt comme un événement qui apparaît lorsqu'une interaction se produit, laissant le réel entre deux silences
- [20:31.](#)
- Cette interprétation n'est pas suffisante pour de nombreux chercheurs, qui cherchent à comprendre ce qui se passe lorsque les entités quantiques, comme les électrons, ne sont pas observées, mais pour l'interprétation de Copenhague, ce n'est pas un mystère, c'est simplement une absence de question
- [20:41.](#)

Le chat de Schrödinger

[20:57](#)

- L'expérience de pensée du chat de [Schrödinger](#), proposée par Schrödinger en 1935, consiste à imaginer un chat enfermé dans une boîte isolé de toute interférence avec le monde extérieur, avec un dispositif contenant une particule quantique qui peut déclencher un mécanisme tuant le chat, et cela illustre l'idée que le réel est suspendu dans un état indéterminé jusqu'à ce qu'on regarde
- [20:57.](#)
- Selon les règles de la mécanique quantique, la fonction d'onde de la particule isolée ne s'est pas effondrée tant qu'on ne l'ouvre pas, et la particule reste superposée entre deux états, ce qui signifie que le mécanisme est à la fois déclenché et inactif, et le chat est à la fois vivant et mort en même temps
- [21:44.](#)
- L'expérience de pensée de Schrödinger montre à quel point la logique de la mécanique quantique devient absurde lorsqu'on la pousse jusqu'au bout, avec des conséquences telles que le marteau étant à la fois tombé et encore accroché, le poison étant à la fois libéré et dans sa fiole, et le chat étant littéralement vivant et mort en même temps
- [22:01.](#)
- Schrödinger voulait montrer que si l'on accepte qu'une particule peut avoir deux états, alors il faut également accepter que le chat peut être à la fois vivant et mort, ce qui met en évidence les limites de l'interprétation de la mécanique quantique
- [22:18.](#)
- L'expérience de pensée du chat de Schrödinger a fait grincer les neurones de plusieurs générations de physiciens et a tué une quantité effarante de

chats dans l'imagination, en montrant les conséquences absurdes de la logique quantique lorsqu'elle est appliquée à des objets macroscopiques

- [21:26](#).

Les mondes multiples

[22:41](#)

- L'acceptation de la possibilité qu'un être vivant, comme un chat, puisse être dans deux états en même temps est une idée troublante, ce qui amène à imaginer que les deux possibilités se réalisent chacune de leur côté, dans des univers différents
- [22:41](#).
- La théorie des mondes multiples, proposée par le physicien Hugues Everett, suggère qu'à chaque fois qu'un événement quantique possède plusieurs issues, toutes les possibilités se réalisent et l'univers se divise en autant de variantes, créant un multivers arborescent
- [23:16](#).
- Selon cette interprétation, les fonctions d'onde ne s'éteignent jamais vraiment, mais divisent l'univers en autant de branches qu'elles comportent de possibilités, permettant à tous les scénarios alternatifs de se réaliser dans des univers distincts
- [23:55](#).
- Toutes les alternatives possibles à celles qui existent dans notre univers sont réalisées, mais dans des branches différentes de ce multivers, qui sont toutes aussi réelles que la nôtre, mais inaccessibles
- [24:11](#).
- Si cette hypothèse est juste, alors il existe une version de chaque individu qui a pris des décisions différentes, comme ne pas regarder une vidéo ou s'être déconnecté avant un certain moment, ce qui peut être un moyen de se rassurer face à l'idée vertigineuse des multivers
- [24:24](#).

L'interprétation de Broglie-Bohm

[24:39](#)

- L'interprétation de Broglie-Bohm est considérée comme plus facile à comprendre car elle ne suppose pas l'existence d'autres univers que le nôtre, et elle implique l'existence de variables cachées qui décideraient de tout ce que l'on observe
- [24:39](#).
- Selon cette interprétation, les particules existent vraiment et possèdent des trajectoires claires et précises qui leur sont imposées par une onde

pilote invisible, qui guiderait leurs mouvements et relierait instantanément tous les éléments de l'univers entre eux

- [25:00.](#)
- La trajectoire des particules peut sembler chaotique, mais cela est dû au fait que l'on ne voit pas les vagues qui les soutiennent et leur permettent d'avancer, et qui ont un comportement bien prévisible, comme des surfers qui progressent sur des vagues invisibles
- [25:13.](#)
- L'idée principale de l'interprétation de Broglie-Bohm est qu'il existe un niveau de réalité discret et plus profond qui nous est mystérieux, et que la superposition n'est qu'une question de manque de connaissance, comme dans le cas du chat qui est soit vivant soit mort, mais dont on ne connaît pas encore le sort
- [25:39.](#)

La réalité n'existe pas toute seule ?

26:07

- L'interprétation relationnelle suggère que le réel n'est pas une chose ou un endroit, mais un processus, une relation, et que la matière et les particules ne peuvent pas exister de façon indépendante, mais seulement dans l'interaction
- [26:07.](#)
- Selon cette interprétation, il n'y a pas de réalité absolue, mais seulement des existences par rapport aux autres, ce qui signifie que tout est relatif et dépendant des interactions
- [26:18.](#)
- Il est impossible de savoir si un jour nous serons en mesure de trancher entre toutes les interprétations possibles sur la nature de la réalité, mais il est certain que nous vivons dans un monde où chaque atome obéit aux règles d'un jeu dont personne ne comprend véritablement le scénario
- [26:30.](#)
- Quelle que soit l'interprétation que l'on préfère, on fait face à un paysage sublime et flou créé par une réalité qui a dépassé notre imagination, et c'est là que le véritable émerveillement commence
- [27:02.](#)
- Le monde dans lequel nous vivons est régi par des règles quantiques qui sont difficilement compréhensibles, et cela nous amène à un sentiment de vertige et d'émerveillement face à la complexité de la réalité
- [27:17.](#)

Humilité et lâcher prise

27:20

- L'univers est peut-être radicalement étrange et inaccessible pour nos cerveaux, qui ont évolué pour être efficaces dans la survie et la reproduction, et non pour comprendre les subtilités de la matière, comme le physicien Arthur Eddington l'a souligné
- [27:20](#).
- La mécanique quantique est mathématiquement robuste, expérimentalement inattaquable et philosophiquement insaisissable, ce qui nous rappelle que l'univers n'est pas là pour être intelligible, et que cette idée peut être vécue comme un cauchemar pour les esprits cartésiens
- [27:57](#).
- Accepter de renoncer à une image claire du monde n'est pas un aveu d'ignorance, mais une reconnaissance du fait que la structure même du réel est peut-être inaccessible à nos sens, et que parfois, le réel est trop compliqué à se représenter
- [28:24](#).
- Pour accéder à ces phénomènes, il faudrait savoir parler le langage des mathématiques, dont l'abstraction est peut-être le seul moyen pour comprendre ces phénomènes éloignés de nos sens communs
- [28:49](#).
- Les limites de la langue et de nos capacités de compréhension nous amènent à contempler le paysage de l'univers avec humilité, en reconnaissant que nos mots se sont fracassés sur l'immense étrangeté de ces phénomènes
- [29:00](#).