

Il est possible que l'espace-temps émerge d'une réalité plus fondamentale. Comprendre comment cela se produit pourrait aider à atteindre l'objectif le plus pressant de la physique : la création d'une théorie de la gravitation quantique.

— Adam Becker

**Natalie Paquette passe son temps à réfléchir à la manière de "faire croître" une dimension supplémentaire.**

Commencez par imaginer de petits cercles situés à chaque point de l'espace et du temps – une dimension courbée, refermée sur elle-même. Ensuite, réduisez progressivement ces cercles, les rendant de plus en plus petits, jusqu'à ce qu'une transformation curieuse se produise : la dimension courbée commence à sembler minuscule, mais devient en réalité immense. C'est un peu comme lorsque vous réalisez que quelque chose qui paraissait petit et proche est en fait gigantesque et lointain. Selon Paquette, "nous réduisons une direction spatiale, mais en essayant de la comprimer jusqu'à une certaine taille, nous voyons apparaître une nouvelle direction spatiale encore plus grande".

Paquette, physicienne théoricienne à l'Université de Washington, n'est pas seule à méditer sur cette étrange transformation des dimensions. Un nombre croissant de physiciens, bien que travaillant avec différentes approches et méthodes, convergent vers une idée profonde : l'espace et peut-être même le temps ne sont pas fondamentaux. Au lieu de cela, ils pourraient émerger (être dérivés) d'une structure et de phénomènes plus fondamentaux. Ces physiciens s'efforcent d'identifier ce qui est sous-jacent à cette réalité plus profonde.

"En physique, nous avons longtemps pensé que l'espace-temps était quelque chose de donné. Mais maintenant, nous réalisons qu'il pourrait être un concept non fondamental", explique Paquette.

Des idées encore plus radicales émergent dans les nouveaux développements de la théorie des cordes et de la gravité quantique. La meilleure approche actuellement disponible pour unifier toutes les lois physiques est la physique quantique, qui est d'une précision étonnante lorsqu'il s'agit des propriétés de la matière, de l'énergie et des particules subatomiques. Ces deux théories (la relativité et la physique quantique) ont été rigoureusement testées par les physiciens au siècle dernier. En théorie, en les combinant, on devrait obtenir une "théorie du tout".

Mais en pratique, les choses ne fonctionnent pas si bien. Si vous appliquez la théorie générale de la relativité aux très petites échelles où domine la physique quantique, vous obtenez des résultats absurdes, comme une énergie infinie apparaissant à partir de rien. La nature nous dit que la gravité et la mécanique quantique doivent être compatibles, mais

nous ne savons toujours pas comment les unifier. Cela devient particulièrement évident lorsqu'on étudie les trous noirs ou les débuts de l'univers.

L'un des problèmes majeurs est que la relativité générale et la physique quantique envisagent l'espace et le temps de deux manières fondamentalement différentes. Trouver une solution exigerait une réconciliation de ces visions opposées de l'espace et du temps.

L'une des façons de résoudre ce problème est de s'attaquer à sa source, c'est-à-dire à l'espace-temps lui-même, en le faisant émerger de quelque chose de plus fondamental. Ces dernières années, plusieurs axes de recherche ont montré qu'à un niveau de réalité plus profond, l'espace et le temps n'existent pas de la manière dont nous les percevons dans notre quotidien. En particulier, ces idées ont radicalement transformé la compréhension des physiciens sur les trous noirs. Désormais, les chercheurs utilisent ces concepts pour expliquer des phénomènes encore plus exotiques, tels que les trous de ver – des tunnels hypothétiques reliant des points distants de l'espace-temps. Les progrès réalisés conservent l'espoir d'une percée encore plus profonde. Si l'espace-temps est émergent, comprendre d'où il provient (et comment il peut émerger de quelque chose d'autre) pourrait s'avérer être la clé qui ouvrirait enfin la porte à la "théorie du tout".

### **L'univers en mode corde**

Aujourd'hui, parmi les théories de la gravitation quantique les plus populaires, figure la théorie des cordes. Son idée principale repose sur le fait que les cordes – des composants fondamentaux de la matière et de l'énergie – sont à l'origine des nombreuses particules subatomiques fondamentales observées dans les accélérateurs de particules à travers le monde. Ces cordes sont même responsables de la gravitation. Par exemple, la particule hypothétique du "graviton", qui transmet l'interaction gravitationnelle, est une conséquence inévitable de la théorie.

Cependant, la théorie des cordes est difficile à comprendre, car elle se trouve dans des territoires mathématiques complexes, dont l'exploration a nécessité des décennies d'efforts de la part des physiciens et des mathématiciens. Une grande partie de sa structure reste encore inexplorée, et de nombreuses cartes restent à dessiner. Dans ce cadre, l'un des outils conceptuels les plus puissants est le principe des dualités mathématiques – des connexions inattendues entre différentes formulations théoriques.

Un exemple de dualité est celui évoqué au début de cet article : entre l'espace-temps et les dimensions supplémentaires. Dans certains modèles, une dimension semble minuscule,

alors que dans une autre formulation, elle apparaît immense. Un autre exemple fascinant est que deux modèles théoriques apparemment différents peuvent être en réalité équivalents. Cela signifie qu'il est possible de passer librement d'un modèle à un autre et d'utiliser les méthodes de l'un pour comprendre l'autre. Comme l'explique Paquette : "Si vous examinez attentivement les éléments fondamentaux d'une théorie, vous pouvez parfois découvrir... un sixième ou un septième espace dimensionnel supplémentaire".

L'existence de telles dualités a conduit de nombreux théoriciens de la théorie des cordes à explorer un concept révolutionnaire. Cette idée a émergé en 1997, lorsque Juan Maldacena, alors chercheur à l'Institut des Hautes Études de Princeton, a proposé une connexion surprenante entre une théorie quantique bien connue, appelée théorie conforme des champs (**CFT**), et un type particulier d'espace-temps dans la théorie de la relativité générale, connu sous le nom d'espace anti-de Sitter (**AdS**).

### **Découvrons-nous un jour la véritable nature de l'espace et du temps ?**

Historiquement, ces concepts étaient considérés comme absolus, mais des découvertes récentes ont montré qu'ils peuvent être émergents et liés à des phénomènes sous-jacents plus profonds. L'AdS/CFT correspondance offre une connexion mathématique fascinante entre une théorie quantique (sans gravitation) et un espace-temps possédant la gravitation. Cette connexion ouvre des perspectives nouvelles sur la gravité quantique et pourrait, à terme, fournir un cadre pour comprendre la nature même de l'espace-temps.

Fait intéressant, l'espace anti-de Sitter dans la correspondance AdS/CFT possède une dimension de plus que la théorie des champs conforme. Cependant, cette correspondance, bien qu'impressionnante, n'est pas encore totalement comprise ni entièrement validée. Elle est néanmoins largement étudiée, et des chercheurs tels que Gerard 't Hooft et Leonard Susskind l'ont reliée à une idée encore plus profonde : **le principe holographique**.

Le principe holographique suggère que toute l'information contenue dans une région de l'espace peut être décrite par une théorie située sur sa frontière – comme un hologramme, où une image tridimensionnelle est projetée à partir d'une surface bidimensionnelle. Cela signifierait que l'espace et le temps pourraient être des manifestations secondaires d'une réalité plus fondamentale, encore inconnue.

Les parties... comme un hologramme. "Je suppose que beaucoup de gens ont pensé que nous étions fous", commente Susskind.

De manière analogue, dans la correspondance AdS/CFT, la théorie CFT à quatre dimensions encode tout ce qui concerne l'espace AdS à cinq dimensions auquel elle est liée. Dans ce système, toute la région de l'espace-temps est construite à partir des interactions entre les composantes d'un système quantique dans la théorie conforme des champs. Maldacena compare ce processus à la lecture d'un roman : "Si vous racontez une histoire dans un livre, il y a des personnages qui font des actions. Mais tout cela, chaque ligne de texte, est simplement une chaîne de lettres sur une page, n'est-ce pas ? Ce que font les personnages émerge du texte. Les personnages du livre seraient comparables à la théorie AdS, tandis que la ligne de texte correspondrait à la CFT."

Mais d'où vient l'espace dans AdS ? Si l'espace est émergent, à partir de quoi émerge-t-il ? La réponse réside dans une interaction particulière et étrange de la théorie CFT : le phénomène de l'intrication quantique (ou enchevêtrement). Plus précisément, le lien entre des objets éloignés, qui corréleraient instantanément leur comportement statistique d'une manière étonnante. L'intrication, comme on le sait, a été décrite par Einstein, qui l'appelait "une action fantomatique à distance".

Bien que sa nature reste mystérieuse, l'intrication est l'un des principes fondamentaux de la mécanique quantique. Lorsque deux objets interagissent en mécanique quantique, ils deviennent enchevêtrés et restent dans cet état tant qu'ils ne sont pas isolés du reste du monde, quelle que soit la distance qui les sépare. Lors d'expériences, des physiciens ont maintenu l'intrication entre des particules situées à plus de 1000 km l'une de l'autre, et même entre des stations au sol et des satellites en orbite. Certains chercheurs émettent même l'hypothèse que des liens d'intrication existent à travers la Galaxie, voire à l'échelle de l'Univers.

L'intrication pose cependant un défi : comment se maintient-elle à long terme, alors que les particules interagissent avec d'autres éléments extérieurs ? Selon des études issues de la correspondance AdS/CFT, menées par les physiciens Shinsei Ryu de l'Université de Princeton et Tadashi Takayanagi de l'Université de Kyoto, l'intrication elle-même serait responsable de la structuration de l'espace AdS. Toute région de l'espace AdS correspondrait à des sous-systèmes fortement intriqués dans la théorie CFT. Plus ces sous-systèmes sont intriqués, plus les points de l'espace AdS se rapprochent les uns des autres.

Ces dernières années, des physiciens ont même suggéré que cela pourrait également être vrai pour notre propre Univers. "Qu'est-ce qui maintient l'espace uni et cohérent, garantissant qu'il ne se brise pas en fragments ?" La réponse pourrait être : **l'intrication quantique entre les différentes parties de l'espace**", explique Susskind. En d'autres termes, la continuité et la connexion de l'espace seraient dues à l'existence même de cette intrication quantique. "Si nous pouvions d'une manière ou d'une autre détruire l'intrication

entre deux régions de l'espace, alors l'espace lui-même se fragmenterait", précise Susskind.

Si l'espace est fait d'intrication, résoudre la gravité quantique pourrait être bien plus simple : au lieu d'expliquer la courbure de l'espace-temps de manière conventionnelle, il suffirait de considérer que l'espace lui-même **émerge** d'un tissage d'intrication quantique.

Susskind suppose que c'est précisément cette idée qui rend la théorie de la gravité quantique si difficile à comprendre : "Je pense que la difficulté vient du fait que notre modèle commençait avec la relativité générale et cherchait à incorporer la mécanique quantique, alors qu'il aurait fallu partir directement d'un principe quantique et reconstruire la relativité générale à partir de celui-ci."

Mais comprendre l'espace n'est que **la moitié de la bataille**. L'espace seul ne suffit pas à définir un Univers ; le temps doit lui aussi être pris en compte. Et si l'espace émerge de l'intrication, qu'en est-il du temps ? "Le temps aussi pourrait émerger d'une certaine manière", affirme Mark Van Raamsdonk, physicien à l'Université de Colombie-Britannique.

Les chercheurs explorent activement le lien entre l'intrication quantique et l'espace-temps. "C'est un domaine encore peu étudié et une zone de recherche en plein essor", expliquent-ils.

Selon Van Raamsdonk, un autre domaine d'étude suscite un grand intérêt parmi les scientifiques : l'utilisation de modèles d'espace-temps émergent pour comprendre la nature des trous de ver. Autrefois, de nombreux physiciens pensaient que traverser un trou de ver était impossible, même en théorie. Mais ces dernières années, les physiciens travaillant sur la correspondance AdS/CFT et d'autres modèles similaires ont découvert de nouvelles manières de concevoir ces trous de ver. "Nous ne savons pas si cela est faisable dans notre Univers", note Van Raamsdonk. "Mais nous savons maintenant que certains types de trous de ver traversables sont théoriquement possibles."

Deux études scientifiques, l'une en 2016 et l'autre en 2018, ont conduit à un travail actif dans ce domaine (une bibliographie complète sur la traversabilité des trous de ver est disponible, y compris des sources russes). Cependant, même si nous pouvions construire des trous de ver traversables, cela aurait peu d'utilité pour les voyages spatiaux. "Vous ne pouvez pas traverser un trou de ver plus vite que la lumière ; vous seriez plus rapide en prenant un chemin long et contourné", explique Susskind.

---

## Un espace pour la réflexion

Si les spécialistes de la théorie des cordes ont raison, alors l'espace est construit à partir de l'intrication quantique, et il en va de même pour le temps. Mais qu'est-ce que cela signifie réellement ? Comment l'espace peut-il être "fait" d'intrication entre des objets si ces objets n'ont pas d'emplacement précis ? Comment peuvent-ils être intriqués si leur existence ne dépend pas du temps et s'ils ne changent pas ? Peut-il exister une réalité sans espace ni temps ?

Ces questions plongent les chercheurs en gravité quantique dans des réflexions profondes. "Comment interpréter un Univers dans lequel l'espace et le temps ne sont pas fondamentaux, mais émergent ?" se demandent-ils. L'un des plus grands défis est que notre intuition humaine est fortement influencée par notre expérience quotidienne. Comme l'explique Carlo Rovelli, un spécialiste de la gravité quantique, notre intuition "a évolué dans la savane africaine, en interaction avec des objets macroscopiques, la flore et la faune", et ne se transpose généralement pas bien à la mécanique quantique. Nox affirme que lorsque nous abordons la gravité quantique, des questions comme "Où est cette particule ?" ou "Où vit cet objet ?" n'ont peut-être plus de sens.

C'est vrai dans notre vie quotidienne : les objets ont des emplacements distincts. Mais si nous admettons que l'espace est émergent, cela signifie-t-il que les objets n'ont plus d'emplacement intrinsèque ? Considérons les particules élémentaires comme les électrons, les protons et les neutrons, ou plus fondamentalement, les quarks et les leptons. Comme l'explique Christian Wüthrich, philosophe des sciences à l'Université de Genève : "Ont-ils des positions ?" La question semble absurde, n'est-ce pas ? Pourtant, à partir d'un certain seuil d'organisation, ces particules montrent des structures collectives qui leur confèrent des positions dans l'espace.

Selon Wüthrich, l'espace et le temps pourraient fonctionner de la même manière en théorie des cordes et en gravité quantique. En particulier, l'espace-temps pourrait émerger à partir des mêmes matériaux que la matière et l'énergie dans l'Univers. "Il ne s'agit pas de d'abord créer l'espace et le temps, puis d'y ajouter la matière. Plutôt, quelque chose de matériel donne naissance à l'espace et au temps."

Des expériences basées sur la correspondance AdS/CFT ont montré que l'espace pourrait être reconstruit à partir d'un réseau d'intrications quantiques. En fait, Alice Ney, philosophe à l'Université de Californie, affirme que cette approche donne une représentation plus claire de la nature de la gravité quantique et pourrait révéler comment un espace-temps fondamental naît à partir de structures quantiques sous-jacentes.

Il est possible que l'inverse soit également vrai. En d'autres termes, la correspondance AdS/CFT pourrait signifier que la théorie quantique émerge, tandis que l'espace-temps est fondamental. Ou bien, aucun des deux n'est fondamental et il existe une théorie encore plus profonde. Accepter que l'espace-temps soit émergent est une hypothèse sérieuse, selon Ney, et cela pourrait être vrai, mais "au moins, en regardant AdS/CFT, on ne voit pas encore d'arguments solides en faveur de cette idée".

Peut-être que le problème le plus important concernant notre vision de l'espace et du temps dans la théorie des cordes est caché juste sous nos yeux, dans le nom même de la correspondance AdS/CFT. "Nous ne vivons pas dans un espace anti-de Sitter", souligne Susskind. "Nous vivons dans quelque chose de bien plus proche de l'espace de de Sitter." L'espace de de Sitter décrit un univers en expansion accélérée, très similaire au nôtre. "Nous n'avons pas la moindre idée de la manière dont l'holographie pourrait être appliquée dans ce cas", ajoute Susskind. Comprendre comment établir une correspondance pour un espace plus proche du nôtre est l'un des défis les plus urgents pour les théoriciens des cordes. "Je pense que nous devons en apprendre beaucoup plus sur ce sujet", déclare Van Raamsdonk.

Enfin, il y a des nouvelles – ou plutôt, une absence de nouvelles – en provenance des accélérateurs de particules les plus avancés. Ils n'ont trouvé aucune preuve de l'existence de nouvelles particules prédites par la supersymétrie, sur laquelle repose la théorie des cordes. La supersymétrie implique que chaque particule connue possède un "superpartenaire", doublant ainsi le nombre de particules fondamentales. Cependant, le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN, qui est en partie conçu pour rechercher ces superpartenaires, n'a trouvé aucune trace de leur existence. "Tous les détails des propriétés des [particules élémentaires] correspondent exactement aux prédictions du Modèle Standard, sans aucune trace de supersymétrie", explique Abhay Ashtekar.

---

## **Les atomes de l'espace-temps**

La théorie des cordes n'est pas la seule à suggérer que l'espace-temps pourrait émerger de structures plus fondamentales. Elle "n'a pas tenu ses promesses" en tant que méthode d'unification de la gravitation et de la mécanique quantique, affirme Abhay Ashtekar, physicien à l'Université d'État de Pennsylvanie. "Aujourd'hui, la force de la théorie des cordes réside dans la richesse de ses idées et outils mathématiques, qui sont largement utilisés dans de nombreux domaines de la physique", ajoute-t-il. Ashtekar est l'un des fondateurs d'une approche populaire de la gravité quantique, connue sous le nom de gravité quantique à boucles. Dans cette théorie, l'espace-temps n'est pas une structure

lisse et continue, comme en relativité générale. Au lieu de cela, il est constitué de composants discrets que Ashtekar appelle "les atomes de l'espace-temps".

Ces "atomes" sont connectés en un réseau de surfaces unidimensionnelles et bidimensionnelles, que les théoriciens de la gravité quantique à boucles appellent la "mousse spinorielle". Bien que les éléments de cette mousse ne possèdent que deux dimensions, ils génèrent un espace-temps à quatre dimensions avec une flèche du temps unique. Ashtekar compare cela à un vêtement : "Si vous regardez de près votre chemise, vous verrez immédiatement qu'elle est constituée de fils unidimensionnels. Mais ces fils sont si densément tissés qu'à des échelles pratiques, vous pouvez voir la chemise comme une surface bidimensionnelle." De la même manière, l'espace-temps semble être un continuum tridimensionnel à grande échelle, mais en réalité, ses "atomes" sont connectés et entrelacés de manière complexe.

Bien que la plupart des théoriciens de la gravité quantique suggèrent que l'espace-temps est émergent, ils ne s'accordent pas sur la manière dont cela se produit. La théorie des cordes propose que l'espace émerge (au moins partiellement) de l'intrication quantique. Pensez-y : si l'espace provient de l'intrication, cela signifierait qu'il est, en quelque sorte, un phénomène collectif. D'un autre côté, dans la gravité quantique à boucles, l'espace-temps ressemble davantage à une surface rugueuse, comme un tas de sable sculpté par le vent. Lisse à grande échelle, mais granulaire et discontinu à des échelles microscopiques.

### **L'émergence de l'espace-temps à partir de composants plus fondamentaux**

Le comportement collectif des "grains" discrets de l'espace-temps est similaire à celui des dunes de sable : bien que les dunes soient constituées de grains individuels, elles conservent la structure globale du sable. De même, dans la gravité quantique en boucles, l'espace-temps est constitué d'éléments discrets qui, à grande échelle, forment une continuité. Malgré ces différences, tant la gravité quantique en boucles que la théorie des cordes supposent que l'espace-temps émerge d'une réalité sous-jacente plus fondamentale.

Ce n'est d'ailleurs pas la seule approche en gravité quantique qui pointe dans cette direction. Certaines théories des ensembles causaux, par exemple, suggèrent que l'espace-temps pourrait être un réseau de relations discrètes plutôt qu'une structure continue. "Ce qui est vraiment étonnant, c'est que pour la plupart des théories plausibles de la gravité quantique, la relativité générale cesse d'être fondamentale", explique Nox. "Les scientifiques s'enthousiasment dès qu'ils constatent que ces différentes approches de la gravité quantique convergent sur un point."



---

## **L'avenir de l'espace-temps à la frontière du temps**

La physique moderne est victime de son propre succès. La mécanique quantique et la relativité générale sont extraordinairement précises, mais elles ont chacune leurs limites d'application. La gravité quantique ne devient nécessaire que dans des situations extrêmes, lorsque des masses gigantesques sont confinées dans des espaces incroyablement petits, comme au centre d'un trou noir. Ce qui rend cette recherche encore plus difficile, c'est que de telles conditions sont presque impossibles à recréer dans un laboratoire physique, même avec les instruments les plus avancés. Il faudrait un accélérateur de particules de la taille d'une galaxie pour tester directement la dynamique de la gravité quantique.

Face à ces défis, certains chercheurs proposent d'examiner la cosmologie sous un nouvel angle. "Je pense que notre meilleur choix pour tester la gravité quantique est la cosmologie", explique Maldacena. Il cite le physicien Iakov Zeldovitch, qui considérait le cosmos comme "l'accélérateur de particules du pauvre". Il est possible que des phénomènes cosmologiques aujourd'hui jugés mystérieux puissent être expliqués ou prédits une fois que nous aurons une théorie complète. De plus, des expériences en laboratoire pourraient tester certaines implications indirectes de la théorie des cordes.

Les scientifiques espèrent également mieux comprendre la correspondance AdS/CFT, qui pourrait fournir de nouveaux indices sur l'unification de la gravité et de la mécanique quantique. De telles expériences pourraient révéler certains aspects de la gravité, bien qu'il ne soit pas certain qu'elles en dévoilent toutes les caractéristiques, selon Maldacena. Tout dépend de ce que l'on entend par "gravité".

## **Découvrons-nous un jour la véritable nature de l'espace et du temps ?**

Les observations issues de la cosmologie pourraient nous apporter des réponses dans un avenir proche. Mais pour l'instant, les expériences en laboratoire restent limitées, et les questions philosophiques sur la nature de l'espace et du temps demeurent ouvertes. Depuis des millénaires, les philosophes se demandent si le changement est réel ou s'il est une simple illusion. Parménide affirmait que "le présent est tout ce qui existe", et que le mouvement et le changement sont des illusions. Son disciple Zénon a même formulé des paradoxes célèbres pour démontrer l'impossibilité du mouvement. Ces idées, bien que millénaires, trouvent encore des résonances aujourd'hui dans les recherches sur la gravité quantique.

"Le fait que tant de penseurs se soient posé ces questions montre à quel point elles sont fondamentales", explique Wüthrich. "Ce que nous comprenons aujourd'hui sur l'espace et le temps est peut-être aussi incomplet que ce que comprenaient les Grecs anciens."