

Épistémologie de la théorie des cordes

Nicolae Sfetcu

25.02.2020

Sfetcu, Nicolae, «Épistémologie de la théorie des cordes», SetThings (25février 2020), URL = <https://www.telework.ro/fr/epistemologie-de-la-theorie-des-cordes/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Une traduction partielle de Sfetcu, Nicolae, "Epistemologiagravitațieiexperimentale – Raționalitateștiintifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.15421.61925, URL = <https://www.telework.ro/ro/e-books/epistemologia-gravitatiei-experimentale-rationalitatea-stiintifica/>

BIBLIOGRAPHIE..... 12

Dans la théorie du champ quantique, le principal obstacle est l'émergence des infinités infratractables dans les interactions des particules en raison de la possibilité de distances arbitraires entre les particules ponctuelles. Les cordes, comme des objets étendus, fournissent un meilleur cadre, qui permet des calculs finis¹. La théorie des cordes fait partie d'un programme de recherche dans lequel les particules ponctuelles en physique des particules sont remplacées par des objets unidimensionnels appelés cordes. Elle décrit comment ces cordes se propagent dans l'espace et interagissent les unes avec les autres. À plus grande échelle, une corde ressemble à une particule ordinaire, avec une masse, une charge et d'autres propriétés déterminées par l'état vibratoire de la corde. L'un des états vibrationnels des cordes correspond au graviton, la particule hypothétique en mécanique quantique pour la force gravitationnelle². La théorie des cordes se manifeste généralement dans des énergies très élevées, telles que la physique des trous noirs, la cosmologie du premier univers, la physique nucléaire et la physique de la matière condensée. La théorie des cordes tente d'unifier la physique de la gravité et des particules, et ses versions ultérieures tentent de modifier toutes les forces fondamentales de la physique.³

Le but de la théorie des cordes était de remplacer les particules élémentaires par des cordes unidimensionnelles afin d'unifier la physique quantique et la gravité.

Le programme de recherche sur la théorie des cordes est basé sur l'hypothèse de 1930 que la relativité générale ressemble à la théorie d'un champ de spin-deux sans masse dans l'espace plat minkowskian⁴. La quantification d'une telle théorie s'est avérée être renormalisable sans perturbation, impliquant une infinité qui ne peut être éliminée. Cette première théorie a été abandonnée jusqu'au milieu des années 1970, lorsqu'elle s'est développée en tant que théorie des cordes unidimensionnelle.

À noter que la théorie des cordes a été initialement développée, à la fin des années 1960 et au début des années 1970, en physique des particules - la *théorie bosonique des cordes*, qui ne traitait que des bosons. Après un succès temporaire en tant que théorie des hadrons, la chromodynamique quantique a été reconnue comme la théorie correcte des hadrons. En 1974, Tamiaki Yoneya a découvert que la théorie prévoit une particule massive de spin 2, considérée comme un graviton. John Schwarz et Joel Scherk ont réintroduit la théorie de Kaluza-Klein pour des dimensions supplémentaires, ont récupéré le programme de bootstrap abandonné et ont ainsi commencé le programme de recherche sur la théorie des cordes en gravité quantique. Un exemple typique de relance d'un programme de recherche au sens de Lakatos (le programme bootstrap) et de changement de direction de recherche d'un autre programme

¹Richard Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory », *Physics and Philosophy*, 2007.

²Katrin Becker, Melanie Becker, et John H. Schwarz, *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction* (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007), 2-3.

³Becker, Becker, et Schwarz, 3, 15-16.

⁴A. Capelli, « The Birth of String Theory Edited by Andrea Cappelli », Cambridge Core, avril 2012, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977725>.

(théorie des cordes) dont l'heuristique, en ajoutant une théorie supplémentaire (Kaluza-Klein), s'est avérée être beaucoup plus utile dans une direction différente de celle initialement envisagée. Plus tard, il a été développé dans la *théorie des supercordes*, basé sur la supersymétrie entre les bosons et les fermions⁵, puis est apparu d'autres versions de la théorie. Au milieu des années 1990, les scientifiques se sont concentrés sur le développement d'un programme de recherche unificateur, une théorie à onze dimensions appelée la théorie M.

Les cordes n'ont pas de nombres quantiques, mais elles diffèrent par leur forme topologique (ouverte ou fermée, modes de compactage) et leur dynamique (modes d'oscillation). Ils peuvent être perçus à l'échelle macroscopique comme des particules ponctuelles avec certains nombres quantiques. Changer le mode d'oscillation correspond à une transformation vers une autre particule. Les cordes au niveau fondamental n'ont pas des constants de couplage. L'interaction entre eux correspond à leur dynamique.⁶

Pour chaque version de la théorie des cordes, il n'y a qu'un seul type de corde, comme une petite boucle ou un segment de corde, qui peut vibrer de différentes manières. Dans le programme de recherche sur la théorie des cordes, l'échelle de longueur caractéristique des cordes est de l'ordre de la longueur de Planck (10^{-35} mètres), sur laquelle les effets de la gravité quantique sont considérés comme importants⁷. Aux dimensions ordinaires, ces objets ne peuvent pas être distingués des particules ponctuelles de dimension zéro. Il existe plusieurs variantes de la théorie des supercordes : type I, type IIA, type IIB et deux types de cordes hétérotiques, SO(32) et E8×E8.

Les théories des cordes nécessitent des dimensions d'espace-temps supplémentaires pour la cohérence mathématique. Dans la théorie des cordes bosoniques, l'espace-temps est à 26 dimensions, tandis que dans la théorie des supercordes, il est à 10 dimensions, et dans la théorie M, il est à 11 dimensions. Ces dimensions supplémentaires ne seront pas observées dans les expériences⁸, en raison de leur compactage par lequel elles « se ferment » sur elles-mêmes en formant des cercles. A la limite, lorsque ces dimensions supplémentaires tendent vers zéro, elles atteignent l'espace-temps habituel. Pour que les théories décrivent correctement le monde, les dimensions compactées doivent être sous la forme de la variété topologique Calabi-Yau.⁹

Une autre façon de réduire le nombre des dimensions est d'utiliser le scénario de cosmologie des membranes (« cosmologie branaire »), en considérant l'univers observable comme un

⁵Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 4.

⁶Vincent Lam, « Quantum Structure and Spacetime. », *Metaphysics in Contemporary Physics*, 1 janvier 2016, 81-99, https://doi.org/10.1163/9789004310827_005.

⁷Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 6.

⁸Barton Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 2 édition (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009).

⁹Shing-Tung Yau, *The Shape of Inner Space*, Reprint edition (Basic Books, 2012), chap. 6.

sous-espace tridimensionnel d'un espace multidimensionnel. Dans ces modèles, la gravité apparaît à partir des cordes fermées dans un espace multidimensionnel, expliquant ainsi la puissance de gravité inférieure par rapport aux autres forces fondamentales¹⁰. En théorie des cordes, une *brane* (en abrégé de « membrane ») généralise la notion de particule ponctuelle à des dimensions autres que zéro. Les branes sont des corps physiques qui obéissent aux règles de la mécanique quantique.¹¹

Une particularité des théories de ce programme de recherche sont les « dualités », des transformations mathématiques qui identifient les théories physiques au sein de ce programme entre elles, tirant la conclusion que toutes ces théories sont subsumées en une seule, la *théorie M*¹². Deux théories sont duales si elles sont exactement équivalentes en termes de conséquences observationnelles, bien qu'elles soient construites différemment et puissent impliquer différents objets et scénarios topologiques¹³. Les différentes théories du programme de recherche sur la théorie des cordes sont liées par plusieurs relations, l'une étant la relation de correspondance spécifique appelée dualité S¹⁴. Une autre relation, appelée la dualité T, considère les cordes qui se propagent autour d'une dimension circulaire supplémentaire. En 1997, la correspondance de la théorie des champs anti-Sitter/conformes (*AdS/CFT*)¹⁵ a été découverte, qui relie la théorie des cordes à une théorie quantique des champs¹⁶. Dans un cadre plus général, la correspondance AdS/CFT est une dualité qui met en corrélation la théorie des cordes avec d'autres théories physiques mieux comprises théoriquement, avec des implications dans l'étude des trous noirs et de la gravité quantique, mais aussi en physique nucléaire¹⁷ et en matière condensée.¹⁸

Les dualités de la théorie des cordes ont été liées par les philosophes à des problèmes spécifiques à la philosophie, tels que la sous-détermination, le conventionnalisme et l'émergence / la réduction. Ainsi, l'espace-temps est devenu considéré par certains physiciens comme une entité émergente, qui dépend, par exemple, de la puissance de couplage qui régit les interactions physiques. Selon la dualité ADS / CFT, une théorie des cordes à 10 dimensions est équivalente à une théorie de jauge à 4 dimensions - la dualité « jauge / gravité

¹⁰Lisa Randall et Raman Sundrum, « An Alternative to Compactification », *Physical Review Letters* 83, n° 23 (6 décembre 1999): 83 (23): 4690–4693, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.

¹¹Gregory Moore, « What Is... a Brane? », *Notices of the American Mathematical Society* 52, n° 2 (28 novembre 2005): 214, <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/what-is-a-brane>.

¹²Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 9-12.

¹³Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory ».

¹⁴Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*.

¹⁵Becker, Becker, et Schwarz, 14-15.

¹⁶Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 376.

¹⁷Igor R. Klebanov et Juan M. Maldacena, « Solving quantum field theories via curved spacetimes », *Physics Today* 62, n° 1 (1 janvier 2009): 62 (1): 28–33, <https://doi.org/10.1063/1.3074260>.

¹⁸Subir Sachdev, « Strange and Stringy », *Scientific American* 308 (1 décembre 2012): 308 (44): 44–51, <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0113-44>.

». Il résulte de ces dualités que les théories, étant équivalentes, ne sont pas fondamentales, et donc ni l'espace-temps décrit n'est fondamental, mais un phénomène émergent¹⁹. Dans ce programme, la théorie de jauge et la théorie gravitationnelle sont les limites classiques d'une théorie quantique plus complète et unificatrice. Les philosophes se demandent si deux théories duales sont physiquement distinctes ou seulement des variantes de notation de la même théorie.^{20,21}

En 1995, Edward Witten a suggéré que les cinq familles de théories du programme de recherche sur la théorie des cordes sont des cas limites particuliers d'une théorie à 11 dimensions appelée théorie M²². En 1997, Tom Banks, Willy Fischler, Stephen Shenker et Leonard Susskind ont proposé un modèle matriciel pour la théorie M à 11 dimensions, où la limite d'énergie réduite de ce modèle est la supergravité à onze dimensions.²³

Feynman considère la théorie quantique de la gravité comme « juste une autre théorie du champ quantique » telle que l'électrodynamique quantique. Différents types de particules existantes sont différentes excitations de la même corde. Étant donné que l'un des modes d'oscillation des cordes est un état sans masse et spin-2 qui s'identifie au graviton, la théorie des cordes inclut nécessairement la gravité quantique. La théorie des cordes modifie la gravité ponctuelle des particules à courte distance par l'échange des états massifs de cordes²⁴. En théorie des cordes, la dimension espace-temps n'est pas une propriété intrinsèque de la théorie elle-même, mais une propriété de la solution particulière.

Bien que la théorie des cordes ne puisse pas actuellement fournir de prédictions falsifiables, elle a cependant inspiré de nouvelles propositions imaginatives pour résoudre des problèmes en suspens en physique des particules et en cosmologie. La théorie des cordes de la première période, lorsqu'elle traitait la physique des hadrons, peut expliquer pourquoi les fermions se présentent en trois générations hiérarchiques et les taux de mélange entre les générations de quarks²⁵. Dans la deuxième période où elle a approché la gravité quantique, la théorie a abordé le paradoxe de l'information sur le trou noir, en comptant l'entropie correcte des trous

¹⁹Tiziana Vistarini, « Emergent Spacetime in String Theory », 2013, 103.

²⁰Joseph Polchinski, « Dualities of Fields and Strings », *arXiv:1412.5704 [hep-th]*, 17 décembre 2014, <http://arxiv.org/abs/1412.5704>.

²¹Dean Rickles, « A philosopher looks at string dualities », *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 42: 54–67, <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.

²²Michael J. Duff, « The Theory Formerly Known as Strings », *Scientific American* 278 (1 février 1998): 278 (2): 64–9, <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0298-64>.

²³T. Banks et al., « M theory as a matrix model: A conjecture », *Physical Review D* 55, n° 8 (15 avril 1997): 55 (8): 5112–5128, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5112>.

²⁴Richard P Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995).

²⁵Jonathan J. Heckman et Cumrun Vafa, « Flavor Hierarchy From F-theory », *Nuclear Physics B* 837, n° 1-2 (septembre 2010): 837 (1): 137–151, <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2010.05.009>.

noirs²⁶ et les processus de changement de la topologie²⁷. La découverte de la correspondance AdS / CFT a conduit à une formulation de la théorie des cordes basée sur la théorie des champs quantiques, mieux comprise, et a fourni un cadre général pour résoudre les paradoxes des trous noirs²⁸, comme dans le rayonnement Hawkins des trous noirs (paradoxe de l'information)²⁹. Grâce à son programme de recherche, il a mené à de nombreuses découvertes théoriques en mathématiques et en théorie des jauges.

La théorie des cordes est considérée comme un outil utile pour étudier les propriétés théoriques de la thermodynamique des trous noirs³⁰, respectivement leur entropie³¹. La base théorique de ces investigations a considéré le cas des trous noirs idéalisés, avec la plus petite masse possible compatible avec une tâche donnée³². Ce résultat peut être généralisé à n'importe quelle théorie de la gravité³³ et peut s'étendre aux trous noirs astrophysiques non extrêmes.³⁴

Dans la théorie du Big Bang, qui fait partie du modèle cosmologique prédominant pour l'univers, l'expansion rapide initiale de l'univers est causée par une particule hypothétique appelée inflaton. Les propriétés exactes de cette particule ne sont pas connues. Ils devraient être dérivés d'une théorie plus fondamentale, telle que la théorie des cordes³⁵. L'élaboration de ce sous-programme dans le cadre du programme de recherche sur la théorie des cordes est en cours d'élaboration.³⁶

²⁶Andrew Strominger et CumrunVafa, « Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy », *Physics Letters B* 379, n° 1 (27 juin 1996): 379 (1–4): 99–104, [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00345-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00345-0).

²⁷A. Adams et al., « Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons », *Journal of High Energy Physics* 2005, n° 10 (11 octobre 2005): (10): 033, <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2005/10/033>.

²⁸Sebastian de Haro et al., « Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations », *Foundations of Physics* 43, n° 1 (1 janvier 2013): 2, <https://doi.org/10.1007/s10701-012-9691-3>.

²⁹Leonard Susskind, *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*, Reprint edition (New York: Back Bay Books, 2009).

³⁰de Haro et al., « Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations », 2.

³¹Yau, *The Shape of Inner Space*, 189.

³²Yau, 192-93.

³³Andrew Strominger, « Black Hole Entropy from Near-Horizon Microstates », *Journal of High Energy Physics* 1998, n° 02 (15 février 1998): (2): 009, <https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/02/009>.

³⁴Alejandra Castro, Alexander Maloney, et Andrew Strominger, « Hidden conformal symmetry of the Kerr black hole », *Physical Review D* 82, n° 2 (13 juillet 2010): (2): 024008, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.024008>.

³⁵Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 533.

³⁶Becker, Becker, et Schwarz, 539-43.

Dans la théorie des branes, les branes D ont été identifiées avec des solutions de supergravitation avec de trous noirs. Leonard Susskind a identifié le principe holographique de Gerardus 't Hooft avec des états communs de trous noirs thermiques.

Récemment, certaines expériences dans d'autres domaines, comme la physique de la matière condensée, ont utilisé des résultats théoriques de la théorie des cordes³⁷. Et l'inséparabilité quantique dans les supraconducteurs est largement basée sur les idées de dualité et de dimensions spatiales supplémentaires développées dans la théorie des cordes. À l'aide de la dualité entre les théories de jauge à 4 dimensions et la gravité à 5 dimensions, les théoriciens des cordes ont prédit la valeur expérimentale de l'entropie dans le plasma, un résultat qui n'est obtenu par aucun autre modèle théorique, mais ce ne sont pas des validations expérimentales absolues.³⁸³⁹

On espère que les dimensions supplémentaires pourront être observées à l'aide du Grand collisionneur de hadrons du CERN, Genève, mais un éventuel déni ne signifierait pas une réfutation de la théorie.

Pour de nombreux chercheurs, la théorie de la jauge est considérée comme le seul moyen de renormaliser les relations, et la théorie des cordes est la seule option pour éliminer les infinités d'un programme unificateur de la physique quantique et de la gravité. La théorie des cordes a été expérimentalement corroborée initialement en tant que théorie de la physique des particules, mais dans le développement actuel, elle est considérée comme loin d'être falsifiable. La poursuite du programme est basée sur la confiance que la théorie est le meilleur candidat pour un programme unificateur total. Sa crédibilité est renforcée par les interconnexions créées au cours de son développement, comme dans le cas de la supersymétrie et de la cosmologie des trous noirs.

La théorie des cordes n'a toujours pas de définition satisfaisante en toutes circonstances. La théorie utilise des techniques perturbatrices⁴⁰, mais n'a pas encore clarifié les aspects de la

³⁷Sachdev, « Strange and Stringy », 44-51.

³⁸Richard Dawid, *String Theory and the Scientific Method*, 1 édition (Cambridge: Cambridge University Press, 2013).

³⁹Paul Verhagen, « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory » (Amsterdam University College, 2015), <http://www.uva.nl/binaries/content/documents/personalpages/h/a/s.deharo/en/tab-three/tab-three/cpitem%5B8%5D/asset>.

⁴⁰Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 8.

détermination des propriétés de l'univers⁴¹, elle a donc résumé les critiques des scientifiques, remettant en question la valeur de la recherche dans cette direction.⁴²

Les critiques de la théorie des cordes attirent l'attention sur le grand nombre de solutions possibles décrites par la théorie des cordes. Selon Woit,

« L'existence possible, par exemple, de 10^{500} des états de vide différents dans la théorie des supercordes, détruit probablement l'espoir d'utiliser la théorie pour prédire quoi que ce soit. Si l'on choisit seulement parmi les états dont les propriétés sont en accord avec les observations expérimentales actuelles, il est probable qu'il y en aura toujours un si grand nombre que toute valeur souhaitée pourra être obtenue pour les résultats de toute nouvelle observation. »⁴³

Les adeptes de la théorie soutiennent que cela peut être un avantage, permettant une explication anthropique naturelle des valeurs observées des constantes physiques.⁴⁴

Une autre critique porte sur la dépendance de la théorie de fond, par opposition à la relativité générale. Lee Smolin soutient que c'est la principale faiblesse de la théorie des cordes en tant que théorie de la gravité quantique.⁴⁵

Les solutions de la théorie ne sont pas uniques et il n'y a pas de mécanisme perturbateur pour sélectionner une solution particulière ou pour choisir le vrai vide. Ainsi, la formulation perturbative de la théorie des cordes perd son pouvoir prédictif. De plus, il n'y a pas de mécanisme de perturbation pour sélectionner des solutions qui prennent en charge des spectres de basse énergie qui ne sont pas supersymétriques.⁴⁶

Paul Verhagen se demande comment évaluer la théorie des cordes ; une théorie qui a des difficultés considérables avec la vérification expérimentale peut-elle être classée comme une science ? Pour répondre à cette question, nous devons analyser les origines des différents concepts utilisés en théorie, évaluer la nécessité d'une grande théorie unifiée et nous concentrer sur l'évaluation de sa situation scientifique. Certains soutiennent que la théorie des cordes a échoué, tandis que d'autres soulignent ses progrès théoriques. Il existe à cet égard une « rupture méta-paradigmatique » entre expérimentateurs et théoriciens.⁴⁷

⁴¹Becker, Becker, et Schwarz, 13-14.

⁴²A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*, 2^e édition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010).

⁴³Peter Woit, *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*, Reprint edition (Basic Books, 2007), 242.

⁴⁴Woit, 242.

⁴⁵Lee Smolin, *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*, Reprint edition (Boston u.a: Mariner Books, 2007), 184.

⁴⁶Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation*.

⁴⁷Verhagen, « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory ».

Chalmers estime qu'une théorie doit être falsifiable au sens de Popper⁴⁸ pour être scientifique : « Si une déclaration est indifférenciée, alors le monde peut avoir des propriétés et peut se comporter de quelque manière que ce soit, sans conflit avec la déclaration. »⁴⁹ En ce sens, la théorie des cordes est considérée comme non falsifiable⁵⁰. La technologie actuelle n'est pas suffisamment précise pour développer des expériences permettant de vérifier la théorie des cordes. Mais la théorie est falsifiable « potentielle »; fait des prédictions, telles que l'existence de dimensions supplémentaires, mais elles ne peuvent pas être vérifiées, du moins pour l'instant. Et toutes les conséquences mathématiques des axiomes n'ont pas encore été élaborées pour détecter d'éventuels conflits avec la réalité observée. Mais des efforts sont faits dans ce sens, tant pour la partie expérimentale que pour la partie théorique.

Les physiciens des cordes sont accusés d'ignorer la testabilité empirique et remplacent ce critère par des arguments mathématiques. Certaines des questions des physiciens et des philosophes sont :

1. Une théorie doit-elle être testable ou les expériences mentales sont-elles suffisantes ?
2. Une théorie doit-elle faire des prédictions vérifiables ou la testabilité indirecte est-elle suffisante ?
3. La théorie sans prédiction, uniquement les distributions de probabilité, est-elle considérée comme testable ?
4. Les tests doivent-ils être nécessairement empiriques ou les contrôles de cohérence mathématique peuvent-ils être considérés comme des tests ?
5. Si des résultats contradictoires ou inacceptables sont obtenus à partir de tests mentaux par réduction à l'absurdité, quelle valeur ont ces tests ?
6. Quand la testabilité peut-elle être demandée ? La possibilité de futurs tests est-elle valable ?
7. Quelle est l'importance de la testabilité par rapport à d'autres désirs épistémiques ? Une théorie est-elle facile à tester mais avec une faible valeur explicative est préférable à une théorie non testable mais avec un pouvoir explicatif plus élevé ? Mais si la théorie testable est trop compliquée et la théorie non-testable est simple et élégante ?
8. Les prévisions de nouveaux phénomènes sont-elles plus importantes que les pré- ou rétrodictions de phénomènes déjà connus ?⁵¹

Reiner Hedrich suggère⁵² que l'échec actuel de la théorie des cordes pourrait être dû au mauvais dispositif mathématique choisi, en utilisant les mathématiques du continuum. Il est

⁴⁸Karl Popper, *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, 2nd edition (London ; New York: Routledge, 2002).

⁴⁹Alan F. Chalmers, *What Is This Thing Called Science?*, 3 edition (Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1999), 63.

⁵⁰H. Georgi et Paul Davies, *Grand Unified Theories, in The New Physics* (Cambridge University Press, 1992).

⁵¹Helge Kragh, « Fundamental Theories and Epistemic Shifts: Can History of Science Serve as a Guide? », *arXiv:1702.05648 [physics]*, 18 février 2017, <http://arxiv.org/abs/1702.05648>.

possible que lorsque la théorie trouve son principe fondamental, elle puisse conduire à une base mathématique plus appropriée. Une formulation indépendante de fond et un principe holographique pourraient aider l'heuristique à trouver ce principe. Mais il est possible que le principe ne soit jamais trouvé, peut-être en raison de fausses hypothèses de base.

Actuellement, la théorie des cordes est le programme de recherche dominant dans la physique théorique des hautes énergies⁵³, considéré par certains scientifiques comme sans alternatives viables⁵⁴. Peter Woit considère ce statut de la théorie comme malsain et préjudiciable à l'avenir de la physique fondamentale, sa popularité en grande partie en raison de la structure financière de l'environnement académique et de la concurrence féroce des ressources limitées⁵⁵. Roger Penrose exprime des opinions similaires, déclarant : « La concurrence souvent frénétique que cette facilité de communication crée conduit à des effets de mouvement, où les chercheurs ont peur de prendre du retard s'ils ne se joignent pas. »⁵⁶

Les positivistes logiques ont considéré que la méthode scientifique signifie la déduction des modèles de la nature des observations. La théorie des cordes a été initialement développée sur la base d'un fait observé, les pentes de Regge, qui à l'heure actuelle n'est plus considérée comme expliquée par cette théorie. Et la théorie n'a jusqu'à présent été confirmée par aucune expérience ou observation empirique. Mais il a continué à se développer, soutenu par la croyance de nombreux physiciens qu'il est bien meilleur que la théorie du champ quantique pour la gravité quantique, et dans l'espoir qu'il aidera à unifier la gravité avec les autres forces fondamentales. La plupart des adeptes semblent être complètement indifférents aux expériences et observations, étant plutôt préoccupés par « l'élégance » de la formulation mathématique de la théorie⁵⁷. Pour cette raison, une réconciliation entre la théorie des cordes et les positivistes logiques semble impossible.⁵⁸

Richard Dawid soutient que la théorie des cordes est basée sur des observations, mais son problème serait l'énorme « distance théorique » entre les phénomènes observables et les concepts scientifiques. Certains chercheurs soutiennent que le principe de la sous-détermination empirique des théories scientifiques n'admet pas que cette « distance théorique » puisse être faite pour permettre des affirmations fiables sur la nature. À cette fin, Dawid

⁵²Reiner Hedrich, « The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View », *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, n° 2 (2006): 261–278.

⁵³Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007), 1017.

⁵⁴Woit, *Not Even Wrong*, chap. 16.

⁵⁵Woit, 239.

⁵⁶Penrose, *The Road to Reality*, 1018.

⁵⁷F. David Peat, *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*, 1 edition (Place of publication not identified: McGraw-Hill Education, 1989), 276.

⁵⁸Verhagen, « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory ».

estime que le principe de la sous-détermination doit être remplacé par des arguments qui soutiennent la théorie des cordes. Le problème de cette théorie est, selon Dawid, l'arbitraire dans le choix de ses principes fondamentaux. La théorie a un certain ensemble de postulats physiques, mais il y a une érosion continue de ces postulats qui suit un chemin linéaire déterminé de manière unique. Ainsi, Dawid déclare que le désaccord entre les théoriciens des cordes et les physiciens phénoménologiques concernant le statut des cordes disparaît en raison d'un changement spectaculaire dans les caractéristiques de la théorie scientifique : l'ancien concept de sous-détermination des théories scientifiques dans la physique des particules moderne perd progressivement du terrain par rapport à la théorie de l'unicité. La théorie des cordes induirait une nouvelle compréhension de ce que l'on pourrait appeler une déclaration scientifique sur la nature : la revendication d'unicité théorique est suffisante pour l'adoption d'une nouvelle théorie scientifique.⁵⁹

En 1995, à partir des théories des cordes unificatrices, le programme de recherche sur la gravité le plus exigeant, unificateur, la théorie M à 11 dimensions est née⁶⁰, afin d'unifier la gravité avec toutes les autres forces fondamentales de la physique.

⁵⁹Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory ».

⁶⁰Duff, « The Theory Formerly Known as Strings », 278 (2): 64–9.

Bibliographie

- Adams, A., X. Liu, J. McGreevy, A. Saltman, et E. Silverstein. « Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons ». *Journal of High Energy Physics* 2005, n° 10 (11 octobre 2005): 033-033. <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2005/10/033>.
- Banks, T., W. Fischler, S. H. Shenker, et L. Susskind. « M theory as a matrix model: A conjecture ». *Physical Review D* 55, n° 8 (15 avril 1997): 5112-28. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5112>.
- Becker, Katrin, Melanie Becker, et John H. Schwarz. *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007.
- Capelli, A. « The Birth of String Theory Edited by Andrea Cappelli ». Cambridge Core, avril 2012. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977725>.
- Castro, Alejandra, Alexander Maloney, et Andrew Strominger. « Hidden conformal symmetry of the Kerr black hole ». *Physical Review D* 82, n° 2 (13 juillet 2010): 024008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.024008>.
- Chalmers, Alan F. *What Is This Thing Called Science?* 3 édition. Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1999.
- Dawid, Richard. « Scientific Realism in the Age of String Theory ». *Physics and Philosophy*, 2007.
- . *String Theory and the Scientific Method*. 1 édition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- Duff, Michael J. « The Theory Formerly Known as Strings ». *Scientific American* 278 (1 février 1998): 64-69. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0298-64>.
- Feynman, Richard P, Fernando B Morinigo, William G Wagner, et Brian Hatfield. *Feynman Lectures on Gravitation*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.
- Georgi, H., et Paul Davies. *Grand Unified Theories, in The New Physics*. Cambridge University Press, 1992.
- Haro, Sebastian de, Dennis Dieks, Gerard 't Hooft, et Erik Verlinde. « Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations ». *Foundations of Physics* 43, n° 1 (1 janvier 2013): 1-7. <https://doi.org/10.1007/s10701-012-9691-3>.
- Heckman, Jonathan J., et Cumrun Vafa. « Flavor Hierarchy From F-theory ». *Nuclear Physics B* 837, n° 1-2 (septembre 2010): 137-51. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2010.05.009>.
- Hedrich, Reiner. « The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View ». *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, n° 2 (2006): 261–278.
- Klebanov, Igor R., et Juan M. Maldacena. « Solving quantum field theories via curved spacetimes ». *Physics Today* 62, n° 1 (1 janvier 2009): 28-33. <https://doi.org/10.1063/1.3074260>.
- Kragh, Helge. « Fundamental Theories and Epistemic Shifts: Can History of Science Serve as a Guide? » *arXiv:1702.05648 [physics]*, 18 février 2017. <http://arxiv.org/abs/1702.05648>.
- Lam, Vincent. « Quantum Structure and Spacetime. » *Metaphysics in Contemporary Physics*, 1 janvier 2016, 81-99. https://doi.org/10.1163/9789004310827_005.
- Moore, Gregory. « What Is... a Brane? » *Notices of the American Mathematical Society* 52, n° 2 (28 novembre 2005): 214-15. <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/what-is-a-brane>.
- Peat, F. David. *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*. 1 édition. Place of publication not identified: McGraw-Hill Education, 1989.

- Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.
- Polchinski, Joseph. « Dualities of Fields and Strings ». *arXiv:1412.5704 [hep-th]*, 17 décembre 2014. <http://arxiv.org/abs/1412.5704>.
- Popper, Karl. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. 2nd edition. London ; New York: Routledge, 2002.
- Randall, Lisa, et Raman Sundrum. « An Alternative to Compactification ». *Physical Review Letters* 83, n° 23 (6 décembre 1999): 4690-93. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.
- Rickles, Dean. « A philosopher looks at string dualities ». *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.
- Sachdev, Subir. « Strange and Stringy ». *Scientific American* 308 (1 décembre 2012): 44-51. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0113-44>.
- Smolin, Lee. *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*. Reprint edition. Boston u.a: Mariner Books, 2007.
- Strominger, Andrew. « Black Hole Entropy from Near-Horizon Microstates ». *Journal of High Energy Physics* 1998, n° 02 (15 février 1998): 009-009. <https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/02/009>.
- Strominger, Andrew, et Cumrun Vafa. « Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy ». *Physics Letters B* 379, n° 1 (27 juin 1996): 99-104. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00345-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00345-0).
- Susskind, Leonard. *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. Reprint edition. New York: Back Bay Books, 2009.
- Verhagen, Paul. « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory ». Amsterdam University College, 2015. <http://www.uva.nl/binaries/content/documents/personalpages/h/a/s.deharo/en/tab-three/tab-three/cpitem%5B8%5D/asset>.
- Vistarini, Tiziana. « Emergent Spacetime in String Theory », 2013, 103.
- Woit, Peter. *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*. Reprint edition. Basic Books, 2007.
- Yau, Shing-Tung. *The Shape of Inner Space*. Reprint edition. Basic Books, 2012.
- Zee, A. *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*. 2 edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010.
- Zwiebach, Barton. *A First Course in String Theory*. 2 edition. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009.