

Holographie

Imagerie



Hologrammes

3^e partie

Yvon Renotte, Dr Sci., enseignant-chercheur honoraire de l'Université de Liège

Past-prof invité, co-fondateur du HOLOLAB, Dépt AGO (Astrophysique, Géophysique et Océanographie)

y.renotte@uliege.be – <https://orbi.uliege.be/profile?uid=p041181> - www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13
<https://hdl.handle.net/2268/300493>

Vivons-nous dans un hologramme ?

Introduction



Stephen W. Hawking
(1942-2018)

Cosmologiste britannique
University of Cambridge - UK

En 2001, le physicien britannique **Stephen W. Hawking** (1942-2018), éminent cosmologiste, spécialiste de la relativité générale, promoteur de « *la Théorie du Tout* », publie un deuxième ouvrage de vulgarisation : *L'Univers dans une coquille de noix*¹ dans lequel il résume ses réflexions quant à l'origine et l'évolution de l'Univers. Il y expose que la physique quantique travaille au développement d'une *théorie holistique de notre univers* suggérant que *celui-ci peut être comparé à un hologramme géant* car l'information du tout existe dans chaque partie constituante : **chaque particule contient toutes les informations relatives à tout ce qui existe ou existera**². Le concept peut surprendre et paraître résulter plus d'une réflexion philosophique que physique. Il mérite néanmoins quelques explications et commentaires ne fut-ce qu'en raison de l'exceptionnelle notoriété de son auteur.



L'Univers dans une coquille de noix

En fait, ce n'est pas l'holographie comme processus d'enregistrement et de restitution d'images en relief intégral qui est considérée mais le « **principe holographique** » qui présente la particularité de permettre l'enregistrement de l'informations 3D dans un substrat 2D (en réalité, un substrat à trois dimensions mais la troisième, l'épaisseur, est très nettement inférieure aux deux autres). *Même un fragment minuscule de plaque holographique en 2 dimensions contient assez d'informations pour reproduire l'image complète de l'objet holographié en 3 dimensions*. Par extrapolation, on pourrait imaginer qu'une correspondance analogue entre des concepts de la physique théorique pourrait ouvrir la voie à une interprétation de notre univers en moins de dimensions³.

1. Stephen W. Hawking, *L'Univers dans une coquille de noix*, éditions Odile Jacobs - Sciences (2001), 60-99 https://fr.wikipedia.org/wiki/Stephen_Hawking
2. Bernard Lelard, *Les trous noirs d'Hawking*, Commission Cosmologie de la SAF, 26 mai 2007, <http://www-cosmosaf.iap.fr/hawking.pdf> ; Jean-Luc Boissel, *Imaginer et comprendre notre Univers, des mythes aux modèles ou la recherche d'une représentation du Monde*, Université populaire de la Basse Ardèche, 10 février 2020, <https://www.universite-populaire-aubenas.fr/wp-content/uploads/LUnivers-des-mythes-aux-mode%CC%80les.pdf>
3. Paul Sutter, *Are we living in a Hologram ?*, Space.com (January 29, 2018) ; <https://www.space.com/39510-are-we-living-in-a-hologram.html> ; Jacob Bekenstein, *L'Univers holographique*, Pour la Science, 313 (2003), 42-48 ; Lee Smolin, *La révolution inachevée d'Einstein : au-delà du quantique*, Dunod éd. (2019) : *L'hypothèse holographique*, 251-255

Le principe holographique

Bien que « popularisé » au début du 21^e siècle, le concept « est né » plus tôt ⁴. En 1974, *Stephen Hawking*, déjà lui, démontre que les trous noirs subissent un phénomène d'évaporation et que l'information qu'ils contiennent, celle de la matière absorbée au cours du temps, est définitivement perdue lors de cette évaporation ⁵. Cependant, selon la mécanique quantique, l'information ne peut jamais être détruite, elle fait l'objet d'un principe fondamental de conservation : cette potentielle perte d'information dans les trous noirs, contraire aux postulats de la mécanique quantique, adopte très vite le nom de « *paradoxe de l'information* ». Dans le même temps, *Jacob Bekenstein* (1947-2015) montre qu'il existe une limite maximale à l'entropie, c'est-à-dire qu'il existe *une quantité maximale d'information* (masse et énergie exprimées en bits 0 et 1) *qu'un volume d'espace peut contenir* ⁶. **Mais surtout, il démontre** que cette quantité maximale d'information/entropie est proportionnelle à l'aire de la région considérée et par extension, **que l'entropie d'un trou noir est proportionnelle à l'aire de son horizon des événements, donc à sa surface** ⁷.

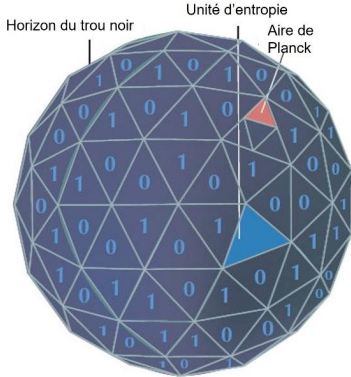
L'analogie conceptuelle a donc commencé lorsque des théoriciens ont étudié comment un trou noir « grossit » quand une « information » (au sens large : le terme désignant aussi bien un « paquet » d'énergie que de matière) tombe dedans. Paradoxalement, c'est sa surface et non son volume qui grossit proportionnellement à la quantité reçue . . . ce qui est totalement différent de la plupart des autres objets connus dans l'univers. Chez quasiment tous ceux que nous connaissons, c'est le volume qui augmente « d'une unité » et la surface seulement d'une fraction s'il « consomme un bit d'information ». Avec les trous noirs, la situation est inversée : **c'est comme si l'information n'était pas à l'intérieur du trou noir mais plutôt collée à sa surface** ! Un trou noir, objet entièrement tridimensionnel dans notre univers 3D, peut être complètement représenté uniquement par sa surface bidimensionnelle . . . et c'est ainsi que fonctionnent les hologrammes. **Curieusement un phénomène se produisant dans un univers à trois dimensions d'espace se réduit à deux dimensions.**

En 1993, le physicien *Gerard 't Hooft* (Prix Nobel de Physique 1999) ⁸ s'appuyant sur les travaux de Bekenstein montre que **la surface totale d'un trou noir peut être décomposée en unités**

-
- https://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_principle ; Thomas Boisson, *Qu'est-ce que le principe holographique ?*, Trust my Science (13 décembre 2016), <https://trustmyscience.com/quest-principe-holographique/>
 - Stephen Hawking, *Une brève histoire du temps – Du big bang aux trous noirs*, Bantam Book – New-York (1988), Nouvelle Bibliothèque Scientifique Flammarion (1989) ; *Black-hole explosions ?*, Nature, 248 (5443) (1974), 30–31 ; *Particule creation by black holes*, Communications in Mathematical Physics. 43 (3) (1975), 199–220 ; *Evaporation of two-dimensional black holes*, Physical Review Letters, 69 (1992), 406-409 ; *The Evaporation of Primordial Black-Holes*, Contribution to the proceedings of the 3d RESCUE International Symposium, (1998), 185-197 ; *Is information lost in black holes ?*, Black holes and relativistic stars, Wald R.M. ed. (1998), 221-240 ; <https://www.hawking.org.uk/in-print> ; *Information loss in black holes*, Physical Review D, 72 (8) (2005), 084013
 - [https://fr.wikipedia.org/wiki/Entropie_\(thermodynamique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Entropie_(thermodynamique)) ; <https://miao.ensad.fr/2018/08/21/le-principe-de-desordre-lentropie/> ; <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-entropie-3895/> ; <https://dridk.me/shannon-entropy.html> ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Entropie_de_Shannon#:~:text=L'entropie%20indique%20alors%20la%20de%20ce%20message%20cro%C3%A9t.
 - Jacob D. Bekenstein, *The Bekenstein-Hawking entropy or black hole entropy*, Scholarpedia, 3(10) (2008), 7375, http://www.scholarpedia.org/article/Bekenstein-Hawking_entropy ; *Black-holes and the second law*, Lettere al Nuovo Cimento, 4 (15) (1972), 99–104 ; *Black holes and entropy*, Physical Review D. 7 (8) (1973), 2333–2346 ; *Generalized second law of thermodynamics in black hole physics*, Physical Review D. 9 (12) (1974), 3292–3300 ; *Black-Hole Thermodynamics*, Physics Today, 33 (1) (1980), 24-31 ; *Information in the Holographic Universe*, Scientific American, 289 (2) (2003), 58-65 ; *Black-Holes and information theory*, Contemporary Physics, 45 (2004), 31-43
 - Gerard 't Hooft, *On the quantum structure of a black hole*, Nuclear Physics B. 256 (1985), 727–745 ; *Cosmology in 2+1 dimensions*, Nucl. Phys. B30 (Proc. Suppl.) (1993), 200-203 ; *The giant leap to the Planck length*, in:

fondamentales : les aires de Planck mesurant 10^{66} cm^2 . Il propose alors la solution suivante au paradoxe de l'information : lorsque de la matière ou de l'énergie tombe dans un trou noir, son information est encodée sur la surface bidimensionnelle du trou noir, c'est à dire dans le réseau formé par les aires de Planck, et cette information est restituée lors de l'évaporation du trou noir.

Figure 1 – Entropie de Bekenstein – Hawking (entropie des trous noirs)⁹



L'entropie d'un trou noir S_{BH} est proportionnelle à la surface de son horizon. Un trou noir dont l'horizon est constitué de A aires de Planck a une entropie de $A/4$ unités d'entropie $u_s = k / s_p$, k est la constante de Boltzmann ($1,3805 \cdot 10^{23} \text{ J/K}$). Une aire de Planck s_p ($2,6115 \cdot 10^{-70} \text{ m}^2$) est l'unité quantique fondamentale de surface ; elle est égale à la constante de gravitation G multipliée par la constante de Planck \hbar et divisée par le cube de la vitesse de la lumière c . Du point de vue de l'information, tout se passe comme si l'entropie était inscrite sur l'horizon du trou noir et que chaque bit d'information (sous forme de 0 ou de 1) correspondait à quatre aires de Planck

Formule de Bekenstein – Hawking : $S_{BH} = (A/4) u_s$
 [BH pour Black Hole ou Bekenstein Hawking]

$$s_p = \hbar G / c^3 \quad \text{et} \quad S_{BH} = \frac{A}{4} \frac{k}{\hbar G} c^3$$

$$\hbar = h/2\pi = 1,0545 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} ; \quad G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$$

Le modèle holographique a amené certains physiciens, notamment Lee Smolin, à émettre l'hypothèse qu'une « théorie ultime » ne devrait pas se focaliser sur les champs ni sur l'espace-temps, mais plutôt sur l'échange d'information entre les processus physiques.

Sur la base de tous ces travaux, Leonard Susskind publie en 1995, « **World as a Hologram** »¹⁰, dans lequel il donne une explication plus globale du phénomène : **tout ce qui est contenu dans un volume d'espace peut être décrit par l'information contenue à la surface de ce volume.** Ce principe adopte le nom de « **principe holographique** » en référence au processus de codage 2D de l'image 3D dans un hologramme. En 1997, Juan Maldacena¹¹ propose une description exhaustive du principe

Perspectives on High Energy Physics and Cosmology, Madrid 1992, Eds. A. Gonzalez-Arroyo and C. Lopez. World Scientific, Singapore (1993), 1-9 ; *Dimensional reduction in quantum gravity*, in : *Salamfestchrift: a collection of talks, World Scientific Series in 20th Century Physics*, vol. 4, ed. A. Ali, J. Ellis and S. Randjbar-Daemi (World Scientific, 1993) ; *Black hole evaporation without information loss*, *Class. Quantum Grav.* 11 (1994), 621-647 ; <https://web.archive.org/web/20110111000000/http://www.science.uu.nl/~hooft101/gthpub.html> ; *Black Holes, Hawking Radiation, and the Information Paradox*, *Nucl. Phys. B43 (Proc. Suppl.)* (1995), 1-11

9. Jacob Bekenstein, *L'Univers holographique*, Pour la Science, 313 (novembre 2003), 42-48 ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Surface_de_Planck ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Entropie_des_trous_noirs#:~:text=La%20formule%20de%20Bekenstein%20DHa%20king,celle%20de%20l'objet%20absorb%C3%A9 ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Lee_Smolin

10. J.G. Russo, Leonard Susskind, L. Thorlacius, *Black hole evaporation in 1+1 dimensions*, *Physics Letters B.* 292 (1992), 13-18 ; Leonard Susskind, L. Thorlacius, *Hawking radiation and back-reaction*, *Nuclear Physics, Section B.* 382 (1992), 123-147 ; Leonard Susskind, *The world as a hologram*, *Journal of Mathematical Physics*, 36 (1995), 6377-6399 ; <https://academic.oup.com/physics/publications.php?pid=169714>

11. Juan Maldacena, *The large N limit of superconformal field theories and supergravity*, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (1998), 231-252 ; Juan Maldacena, Leonard Susskind, *Cool horizons for entangled black holes*, *Fortschritte Der Physik.* 61 (2013), 781-811 ; T. Faulkner, A. Lewkowycz, Juan Maldacena, *Quantum corrections to holographic entanglement entropy*, *Journal of High Energy Physics.* (2013), 1-17 ; Anil Ananthaswamy, *Is our Universe a Hologram ? Physicists debate famous idea on its 25th anniversary - The Ads/CFT duality conjecture suggests our universe is a hologram, enabling significant discoveries in the 25 years since it was first proposed*, *Scientific American*, March 1 (2023) ; <https://www.scientificamerican.com/article/is-our-universe-a-hologram-physicists-debate-famous-idea-on-its-25th-anniversary1/> ; <https://academic.oup.com/physics/publications.php?pid=175892&searchstring=&showfilter=all>

holographique dans une théorie des cordes contenue dans un espace à 5 dimensions équivalente à une théorie conforme des champs (théorie quantique décrivant les interactions élémentaires) contenue sur le bord à 4 dimensions de cet espace (bord semblable à notre espace-temps).

Figure 2 - Ils ont révolutionné la cosmologie, conçu et imaginé le « Principe Holographique »



Stephen Hawking
(1942-2018) ¹²



Jacob
Bekenstein
(1947-2015)



Gerard 't Hooft
(1946-Prix Nobel de
Physique 1999)



Leonard Susskind
(1940)



Juan Maldacena
(1968)



Roger Penrose
(1931-Prix Nobel de
Physique 2020) ¹²

Plus récemment, en 2015, Hawking tenant compte des avancées en théorie des supercordes et se basant sur les travaux de Susskind et Maldacena, présente une nouvelle hypothèse résolvant son propre paradoxe de l'information : les particules absorbées par un trou noir modifient la géométrie de l'horizon des événements de ce dernier en réalisant une « supertranslation » (notion mathématique complexe décrivant la conservation de certaines symétries, notamment celle de l'information). **L'information des particules absorbées est donc encodée sous forme de supertranslations qui agissent comme des hologrammes sur l'horizon des événements et forment une empreinte quantique des particules disparues. Par la suite, l'horizon des événements étant le siège de fluctuations quantiques, l'information est réémise et donc restituée, par ces fluctuations composant le rayonnement de Hawking** ¹³.

Paradoxalement, le rayonnement de Hawking est un rayonnement qui doit être émis par tout trou noir du fait des lois de la mécanique quantique et qui provoque son évaporation par perte de masse, de moment cinétique si le trou noir était en rotation et de charge électrique, s'il était chargé. Le phénomène est surprenant car un trou noir ne devrait pas rayonner dans le cadre de la théorie de la relativité générale puisque rien de ce qui pénètre sous son horizon des événements ne peut plus en sortir. C'est en cherchant à démontrer que c'était bien le cas que S. Hawking a prédit finalement, à sa grande surprise, que les trous noirs doivent bel et bien rayonner ! En pratique, le rayonnement de Hawking s'avère extraordinairement faible pour les trous noirs d'échelle stellaire ou supermassif, et sa détection est énigmatique. Son existence pose un redoutable problème connu sous le nom de **paradoxe de l'information** ^{14,15}.

12. Roger Penrose, *L'esprit, l'ordinateur et les lois de la physique*, Oxford University Press (1989), Dunod – InterÉditions (1998) ; Roger Penrose et Stephen Hawking, *La nature de l'espace et du temps*, Princeton University Press (1996), Paris-Gallimard (1997)

13. Stephen W. Hawking, Malcolm J. Perry, and Andrew Strominger, *Soft Hair on Black Holes*, Phys. Rev. Lett. 116 (2016), 231301, 23 pages ; *Superrotation charge and supertranslation hair on black holes*, Journal of High Energy Physics, Article number 161 (2017), Published for SISSA by Springer, 32 pages ; <https://academictree.org/physics/publications.php?pid=4583> ; S. Carlip, *Black hole thermodynamics*, International Journal of Modern Physics D. 23 (11) (2014), 1430023–736 ; Stephen Hawking, “The Information Paradox for Black Holes”, arXiv (2015), 1509.01147 <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218271814300237>

14. Laurant Sacco, *Rayonnement de Hawking ; qu'est-ce que c'est ?*, Futura Science (5 septembre 2021) <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/astronomie-rayonnement-hawking-4889/>

15. *First Observation of Hawing Radiation*, Archived 2012-03-01 at the Wayback Machine from the MIT Technology Review, <https://www.technologyreview.com/2010/09/27/200255/first-observation-of-hawking-radiation/> ; F. Belgiorno, S.L. Cacciatori, M. Clerici, V. Gorini, G. Ortenzi, L. Rizzi, E. Rubino, V.G. Sala, Daniele Faccio, *Hawking radiation from ultrashort laser pulse filaments*, Phys. Rev. Lett. (2010), 4 pages, <https://arxiv.org/abs/1009.4634>

Aujourd'hui, le sujet continue à faire l'objet d'études approfondies et la quête initiée par S. Hawking se poursuit au sein de nombreuses équipes internationales¹⁶, y compris par ses successeurs. Digne élève du Maître, *Thomas Hertog*, qui fut un de ses collaborateurs pendant plus de 20 ans, vient de publier un ouvrage explicitant la « *Folle Théorie du célèbre Physicien* », cinq ans après sa disparition. Il y rappelle que S. Hawking était passionné par deux questions à propos de l'origine de notre Univers : comment s'est-il formé... et pourquoi ? Il n'a jamais su répondre à la seconde mais la première a fait l'objet d'une théorie très intéressante dans les dernières années de sa vie : *l'Univers est une projection holographique*. Plus précisément, **c'est en réalité le temps qui serait une dimension holographique, une projection apparue avec le Big Bang**. T. Hertog explique : **le temps « n'a pas d'existence a priori. C'est une dimension qui émerge d'un hologramme et qui a donc une limite**. En effet, si on va de plus en plus loin dans le passé, on va trouver de moins en moins d'informations encodées dans l'hologramme. Le big bang, du point de vue holographique, est la limite de la dimension du temps. En clair, il n'y a rien avant le big bang ! »¹⁷.

Figure 3 – La dernière « conception de l'Univers holographique » de Stephen Hawking

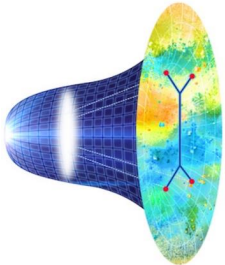
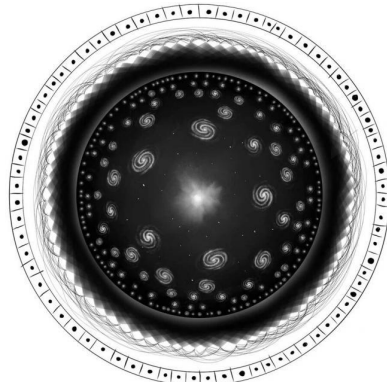


Diagramme conceptuel du calcul des corrélations de fluctuation de densité dans l'univers primitif basé sur une théorie utilisant l'holographie¹⁶



Théorie imagée ci-dessus : le cercle extérieur représente un hologramme intemporel comportant un grand nombre d'informations (appelées "qubits", en informatique quantique). Le disque intérieur, représente un univers en expansion depuis un point unique : l'origine du Big Bang. Plus on se rapproche de ce point, plus on s'éloigne de l'hologramme et moins les informations encodées sont nombreuses. **Une fois le centre atteint, il n'existe plus de temps, plus d'informations, ni-même de lois physiques : "il ne peut rien y avoir avant le Big Bang, car le passé qui en émerge holographiquement ne remonte pas plus loin"**. Cette théorie a permis une véritable prise de conscience de la part de Stephen Hawking, qui a mis de côté la conception qu'il s'est faite de l'univers pendant toute sa vie : **il n'y aurait pas de lois absolues, "pourquoi" à l'origine de celui-ci**. Mais ça, c'est un débat théologique sans fin.¹⁷



Thomas Hertog

16. Heng-Yu Chen and Yasuaki Hikida, *Three-Dimensional de Sitter Holography and Bulk Correlators at Late Time*, Physical Review Letters, 129 (2022), 061601 – 7 pages ; Jake G. Tobiyama, *Seeing is more than believing : Holography help our understanding of our early universe*, Article Highlight 31-MAR-2023, EurekAlert ! Kyoto University, 3 pages, <https://www.eurekalert.org/news-releases/984672>
17. Thomas Hertog, *L'origine du temps, la dernière théorie de Stephen Hawking*, Odile Jacob (2023) ; https://hitek.fr/actualite/explication-theorie-hologramme-hawking_41000 ; The Universe is a hologram: Stephen Hawking's final theory, explained by his closest collaborator, BBC Science Focus Mag. (14th March 2023), <https://www.sciencefocus.com/space/stephen-hawking-final-theory/> ; *Le testament de Stephen Hawking : L'origine du temps décrypté par Thomas Hertog*, Dossier Sciences et Avenir – La Recherche réalisé par Fabrice Nicol, n° 920 (octobre 2023), 28-43

En tentant d'unifier les différentes forces de l'univers dans un cadre théorique unique, les théoriciens ont découvert qu'il est plus simple de résoudre le problème dans un univers 2D que dans l'univers « classique » en 3D. Dans ces cas, la 2D suffit ce qui a fait penser à un hologramme, « support en 2D » (moyennant la remarque relative à son épaisseur) qui contient une information 3D¹⁸.

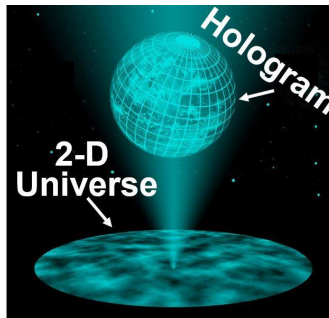
Il ne faut toutefois pas oublier qu'il s'agit en quelque sorte d'un « tour de passe-passe » mathématique permettant de résoudre un peu plus simplement un problème fort compliqué dans un modèle (sans gravité ni expansion) très éloigné du nôtre. *Cette approche ne signifie nullement que notre univers est réellement en 2D avec une 3D qui n'est qu'illusion : il ne faut pas confondre le territoire et sa carte, ... la réalité avec une équation simplifiée.* Un artifice mathématique, aussi pratique soit-il, ne dicte pas nécessairement notre vision de la nature fondamentale de la réalité. ***Si les principes holographiques sont utiles pour résoudre des problèmes, cela ne signifie pas nécessairement que nous vivons dans un hologramme. Et même si nous vivions dans un hologramme, nous ne serions pas nécessairement capables de faire la différence de toute façon. Ne nous faisons pas d'illusion, la réalité complexe nous échappe certainement.***

Les informations précédentes, assez complexes, sont remarquablement expliquées dans une série de notes proposées par Jean-Pierre Luminet¹⁹. Tout en étant d'un excellent « niveau scientifique », la « vulgarisation intelligente » permet une compréhension relativement aisée des processus évoqués moyennant une connaissance minimale des lois de la physique . . .

Figure 4 – Représentation naïve de l'holographie appliquée à l'univers dans son ensemble¹⁹



Jean-Pierre Luminet



18. Yaël Nazé, *Astronomie de l'étrange, Individus singuliers, Objets bizarres, Idées insolites*, Belin éditeur (2021), 334-336

19. Jean-Pierre Luminet, *L'Univers holographique*

(1) : *Le paradoxe de l'information*, Luminescences : le blog de Jean-Pierre Luminet (juillet 2016),

<https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2016/07/27/lunivers-holographique-1/>

(2) : *La gravité quantique façon théorie des cordes* (août 2016),

<https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2016/08/07/lunivers-holographique-2-gravite-quantique-facon-theorie-cordes/>

(3) : *De l'entropie à l'hypothèse holographique* (août 2016),

<https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2016/08/20/lunivers-holographique-3-de-lentropie-a-lhypothese-holographique/>

(4) : *La conjecture de Maldacena* (septembre 2016),

<https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2016/09/13/lunivers-holographique-4-conjecture-de-maldacena/>

(5) : *La quête des dualités* (septembre 2016),

<https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2016/09/22/lunivers-holographique-5-quete-dualites/>

(6) : *Black Holisme* (octobre 2016),

<https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2016/10/18/lunivers-holographique-6-black-holism/>

Jean-Pierre Luminet, *Les trous noirs*, 2^e éd. Seuil (1992), *Le destin de l'univers, trous noirs et énergie sombre*, Paris – Fayard (2006), Folio (2010)

Conclusion . . . (provisoire)

Du point de vue strictement optique, on peut objecter que les hologrammes sont des structures spatiales inscrites dans des volumes dont une des dimensions, l'épaisseur, est certes beaucoup plus petite que les deux autres . . . mais pas vraiment négligeable. Alors, peut-on consilier cette réalité physique avec le concept suggéré par S. Hawking qui insiste et base son raisonnement sur le fait que l'holographie permet de restituer des informations en 3D alors qu'elles ont été enregistrées et sont stockées dans un composant holographique en 2D ?

Conservant à l'esprit que son propos concerne principalement le *principe holographique*, on peut effectivement concevoir et réaliser des composants holographiques qui n'ont réellement que deux dimensions. Ces composants, souvent assez « simples », sont inscrits dans un plan et permettent d'effectuer des opérations en photonique. Je citerai pour l'exemple les **coHOEs** (computer generated holographic elements) construits sur mesure pour corriger les aberrations de composants optiques classiques (réfractifs) tels des objectifs d'instruments, . . . ou simplement une lentille plate de Fresnel. Ces composants, peu encombrants, peuvent être répliqués aisément donc produits industriellement à bon compte. Ils sont ainsi très intéressants pour la construction spatiale : des collègues du CSL [*Centre Spatial de Liège*] et chez AMOS [*Advanced Mechanical and Optical Systems - Liège*] sont spécialisés en la matière. Ces hologrammes ont la particularité de pouvoir être inscrits en surface sur un substrat, y compris sur des microcircuits²⁰. Bien entendu ce type de composants ne permet pas de construire des images 3D complexes, telles une scène, on n'en est pas encore là !

. . . Quoique associée aux systèmes d'intelligence artificielle, l'imagerie holographique « peut faire / fera des merveilles » !

Pilier principal de la physique des cordes, nous venons de voir que **le principe holographique permet aujourd'hui de résoudre le paradoxe de l'information ou encore de simplifier des calculs en physique de la matière condensée**. Hypothèse prééminente et déterminante en physique théorique, il est actuellement utilisé dans un grand nombre de théories, **il constitue un des socles de base des théories à gravité quantique**.

Craig Hogan, professeur à l'Université de Chicago et directeur du **Fermilab Center for Particle Astrophysics**, laboratoire qui étudie l'interface de la physique des particules et de la cosmologie, est connu pour sa théorie du « **bruit holographique** » qui soutient que le *principe holographique* [axiome dans les théories des cordes et propriété supposée de la gravité quantique qui stipule que la description d'un volume d'espace peut être considérée comme codée sur une limite de dimension inférieure à la région] peut impliquer des fluctuations quantiques qui conduiraient à un « *bruit holographique* » mesurable par les détecteurs d'ondes gravitationnelles²¹.

Il a imaginé et construit l'**holomètre au Fermilab** qui serait l'interféromètre²² LASER le plus sensible au monde. Théoriquement, il serait capable de détecter des fluctuations holographiques d'un seul attomètre (1 am = 10⁻¹⁸ mètre = 1 trillionième de mètre). De telles détections, si elles s'avéraient, auraient un impact considérable : *ce serait une première preuve que l'espace-temps, le tissu même de l'univers, est quantique*. L'holomètre qui est en réalité composé de deux interféromètres identiques, a commencé à collecter des données en août 2014. Après une année de collecte, **les résultats** de

20. Yvon Renotte, *Holographie, Hologrammes, Imagerie 3D, 2^e partie : Des Applications*, Le Ciel, Bull. SAL (2023), à paraître

21. [Craig Hogan - Wikipedia](#) ; [Holographic principle - Wikipedia](#) ; <https://astro.uchicago.edu/people/craig-j-hogan.php> ; [Observatoire d'ondes gravitationnelles — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

22. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A9trie> ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A8tre_de_Michelson ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A8tre_de_Michelson

l'expérience publiés le 3 décembre 2015 **ont révélé que l'espace-temps n'est pas quantifiable à l'échelle mesurée**²³ et n'apportent pas la preuve que « nous vivons dans un hologramme »²⁴.

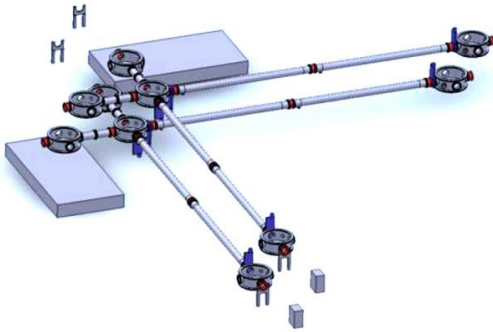


Figure 5 – L'Holomètre du Fermilab

Constitué d'un doubleinterféromètre LASER

Chaque interféromètre en forme de L a deux bras perpendiculaires de 131 pieds de long [~ 40 mètres]



Craig Hogan

Indépendamment, des interféromètres LASER « gigantesques » ont été construits : le duo **Ligo** (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) aux États-Unis, à Livingston - Louisiane et à Hanford - Washington, et **Virgo** (*d'après l'amas de la Vierge*) en Europe – franco-italien près de Pise. Ils ont des bras de plusieurs kilomètres : respectivement 4 et 3 kilomètres et sont donc extrêmement sensibles, ils peuvent détecter des variations inférieures à $10^{-21}m$ (= 1 zm, zeptomètre = 1 trilliardième de mètre). Le 15 septembre 2015 à 11h51, ils ont détecté une onde gravitationnelle²⁵ pour la première fois : **la découverte a été annoncée officiellement le 11 février 2016**²⁶. **Une ère nouvelle s'ouvrait pour l'astrophysique !**

23. <https://www.wired.com/2010/10/holometer-universe-resolution/> ; [Holomètre \(Fermilab\) — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Holom%C3%A8tre_(Fermilab)) ; [Holometer rules out first theory of space-time correlations \(fnal.gov\)](https://fnal.gov/)

24. <https://news.uchicago.edu/story/do-we-live-2-d-hologram> (26 août 2014)

<https://www.science.org/content/article/controversial-experiment-sees-no-evidence-universe-hologram> (3 décembre 2015)

25. L'existence des **ondes gravitationnelles** est prédite par la théorie de la relativité générale et leurs caractéristiques peuvent en être déduites mais les conditions susceptibles d'en permettre l'observation expérimentale sont extrêmement difficiles à rencontrer et furent longuement « hors de portée ». Il fallut attendre quasiment un siècle pour que leur détection soit rendue possible et intervienne effectivement. Ce sont des « oscillations » provoquées par des mouvements de matière ou d'énergie, qui se propagent dans l'espace-temps. La théorie prévoit qu'elles se propagent à la vitesse de la lumière, qu'elles sont émises par des corps « extrêmement massives » (plus que nos planètes et notre soleil) qui se déplacent à très grande vitesse (de l'ordre d'une fraction appréciable de celle de la lumière), que leur amplitude est extrêmement faible, inférieure à la limite de sensibilité des instruments les plus sensibles dont nous disposons encore il y a peu. **Ce monde nous est donc totalement étranger et le problème essentiel est celui de la détection de tels « objets »**. Les variations de distance concernées sont inférieures ou égales à 10^{-21} mètre, moins que la taille du noyau d'un atome, . . . quasiment rien ! Il est évident que nous ne ressentons pas de telles déformations mais **les scientifiques ont mis au point** des instruments capables de détecter des déplacements aussi infimes : ce sont **des interféromètres gigantesques, hypersophistiqués** (LASERs et miroirs de très haute qualité optique), **dont les bras font plusieurs kilomètres de long**. La vitesse de la lumière, constante [$c = 299\,792\,458$ m/s], sert d'unité de référence. Albert Einstein, *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften, Berlin (manuscrit soumis le 25 novembre 1915)

26. B.P. Abbott et al. (Ligo Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. 116 (2016), Phys. Rev. Lett. 116, 061102 – 16 pages ; <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

Figure 6 – Les pionniers à l'origine de la découverte des ondes gravitationnelles

Prix Nobel de Physique 2017



Barry C. Barish



Kip S. Thorne



Rainer Weiss



L'interféromètre franco-italien **VIRGO** (près de Pise)
deux bras orthogonaux de **L = 3 km**
collaboration entre cinq pays européens



à gauche : duo d'interféromètres **LIGO** – USA
deux bras orthogonaux de **L = 4 km**
haut : Livingston (Louisiane) – bas : Hanford (Washington)



Le projet européen de « télescope géant » Einstein

Plusieurs équipes européennes (plus de 1200 scientifiques et ingénieurs) ont entrepris de développer un ambitieux projet de détection et d'étude des ondes gravitationnelles à l'aide d'un « télescope géant » de troisième génération, *le meilleur observatoire de ce type d'événement jamais conçu*. Il s'agit d'une infrastructure triangulaire avec 3 tunnels de 10 km de long à une profondeur d'environ 250 m (d'autres infrastructures existent, *VIRGO* et *LIGO*, mais sont de bien plus petite taille – 3 à 4 km de long, ont seulement deux bras et sont en surface).

Soutenu par la Commission Européenne dans le cadre du septième programme cadre, le **Télescope Einstein**²⁷ pourra détecter jusqu'à mille fois plus de sources d'ondes gravitationnelles que tous ses prédécesseurs. Un défi de niveau mondial, avec de grandes opportunités pour la science, la technologie et peut-être la région puisque *l'EMR, EUREGIO Meuse – Rhin* (Belgique, Pays-Bas et Allemagne) est candidate à son installation (en concurrence avec la Sardaigne et peut-être la région de Saxe).

Le télescope Einstein ne pourra effectuer ses mesures que dans un environnement optimal, très calme, comme celui de la région frontalière des Pays-Bas, de la Belgique et de l'Allemagne. La stabilité du sol y permettra des mesures très sensibles. De plus, le maillage régional des centres d'expertise et des entreprises de haute technologie permettra une construction rapide de l'outil, ainsi qu'un développement à long terme²⁸.

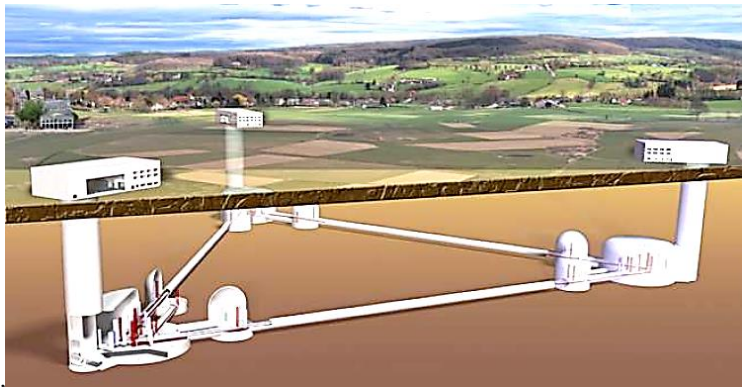
27. Le télescope Einstein ?, https://www.einsteintelelescope.nl/fr/?set_lang=fr ; Einstein Telescope — Wikipédia ([wikipedia.org](https://fr.wikipedia.org/wiki/Einstein_Telescope))

28. *Télescope Einstein en EMR* – Fiche d'information pour l'Euregio Meuse – Rhin, 35 pages, https://euregio-mr.info/euregio-mr-wAssets/docs/Einstein-Teleskop/FR_Telescope-Einstein-factsheet-EMR_032023.pdf ; Annick Pierrard, *E-Test – Einstein Telescope, EMR Site & Technology*, Coordination Office : ULiege – RISE &

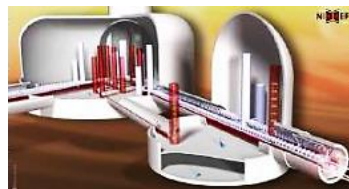
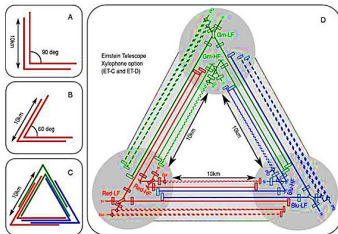
Des chercheurs de nombreuses institutions belges (UHasselt, KULeuven, UCLouvain, VUB, ULB, UAntwerpen, UGent, UMONS, . . .), dont l'Université de Liège, participent aux études et travaux préparatoires du projet. Plusieurs équipes locales issues de différentes facultés, départements et même d'entreprises, interviennent sous la « houlette bienveillante » de RISE (Service Recherche, Innovation, Support et Entreprise), anciennement l'Interface Entreprise-Université, (Annick Pierrard, senior Interreg Project Manager) et la direction scientifique des Prs Christophe Collette, Frédéric Nguyen et Cédric Lenaerts. Très impliquée dans le projet, l'Université de Liège s'est vue confiée la coordination du **projet important E-TEST** dont l'objectif est double :

1. Concevoir un prototype d'un grand miroir en silicium plongé à température cryogénique et isolé des vibrations provenant du sol. Ce prototype, unique au monde, est en cours d'installation au Centre Spatial de Liège, en collaboration avec AMOS s.a. (Advanced Mechanical and Optical Systems). La mise en place de ce prototype permettra de valider la technologie qui pourra améliorer grandement la sensibilité du télescope Einstein aux ondes gravitationnelles de basses fréquences, générées par la fusion de trous noirs très massifs.
2. L'exploration géologique de l'EMR, autre sous-projet consistant en une étude approfondie des sous-sols via des capteurs et senseurs enfouis à 300 mètres de profondeur. Il permet de cartographier et modéliser les sous-sols de la région afin de s'assurer de leur stabilité et consolider l'emplacement du télescope Einstein, pour optimiser sa conception dans la région EMR. Cette étape est essentielle pour la sélection du site qui interviendra en 2026.

Figure 7 – Le projet de Télescope Einstein ²⁹



Christophe Collette



6 interféromètres – 10 km de long – larges miroirs température cryogénique

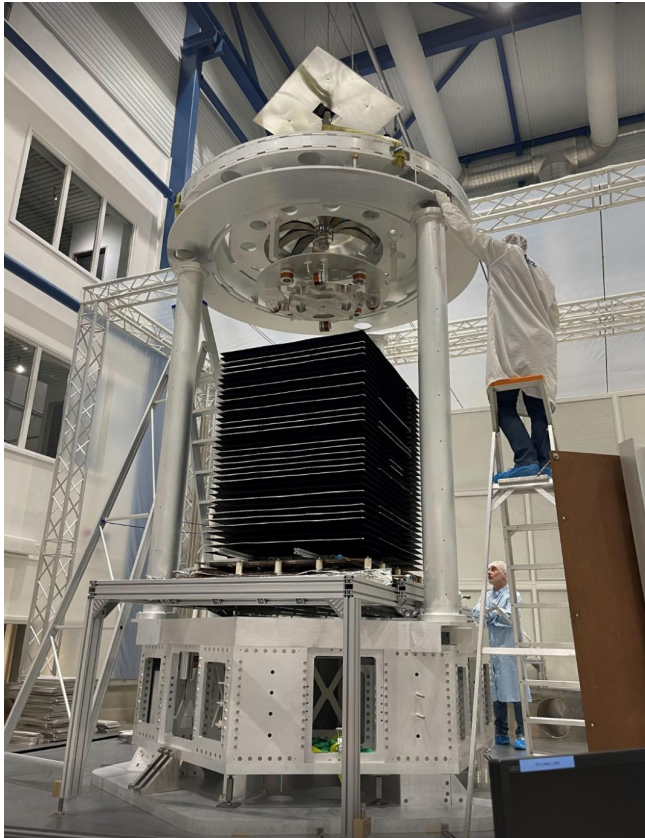
B53/3 Active aerospace structures and advanced mechanical systems, Campus Sart Tilman, <https://www.etest-emr.eu/>

29. Christophe Collette, *Conception mécanique des détecteurs d'ondes gravitationnelles: performances actuelles et challenges pour les détecteurs de 3^e génération*, Journée PromOptica – Uccle, , présentation le 20 juin 2018, 38 slides (communication privée) ; https://www.news.uliege.be/cms/c_11389743/fr/un-pas-de-plus-dans-la-mise-en-place-de-l-ambitieux-projet-du-telescope-einstein ; Precision Mechatronics Laboratory <http://www.pmlab.be>

Le télescope Einstein est conçu pour mesurer au moins dix fois plus précisément que les détecteurs actuels ce qui permettra de balayer un volume mille fois plus grand et de détecter des sources trop faibles pour être perceptibles par les détecteurs actuels. Avec ces nouvelles connaissances, les physiciens pourront tester la théorie de la relativité générale comme jamais auparavant et perfectionner — ou amender — leur connaissance de l'univers. Le télescope sera conçu pour une sensibilité de 22 zéros après la virgule : des différences de distance qui sont dix mille fois plus petites que les protons dans un noyau atomique. Pour atteindre cette précision, l'observatoire fera se réfléchir des faisceaux LASER sur des kilomètres de tunnels. Un ultravide et des « super-atténuateurs » spécialement conçus annuleront les vibrations perturbatrices de l'environnement. La technique est silencieuse, sûre et propre. ²⁷



Projet ET - organisation et calendrier : 2018, Naissance de la collaboration ET ; 2021, le Télescope Einstein est inscrit sur la feuille de route ESFRI (European Strategic Forum for Research Infrastructure). Il s'agit donc d'une infrastructure prioritaire en Europe ; 2023, candidature officielle de l'EUREGIO ; 2026, choix du site.



Prototypage ETEST au CSL : phase finale de l'assemblage avant la fermeture de la chambre à vide
(Pr Christophe Collette : communication privée, novembre 2023)

En résumé : de ce qui précède, nous retiendrons principalement que **l'holographie est passée du « simple » statut de technique d'imagerie**, l'adjectif « simple » étant certainement fort réducteur puisque nous savons maintenant que c'est loin d'être le cas, **à celui de principe physique jouant un rôle essentiel au niveau des théories quantiques et cosmologiques les plus « en pointe »**.

Merci à Yaël Nazé pour les conseils, suggestions, discussions et documents partagés.

Merci à Christophe Collette, partenaire des « LIGO Scientific Collaboration » et « VIRGO Collaboration », pour les informations et documents relatifs au projet européen ET (Télescope Einstein).

Merci à Christophe Collette et à Cédric Lenaerts pour l'accueil sur site (CSL).



Emmeth Leith, Steve Benton et Yuri Denisjuk

<https://www.museeholographie.com/>

Addendum

Un proverbe populaire dit que « **le hasard fait parfois bien les choses** » . . .

Effectivement, au moment où paraissait la partie de l'article traitant d'applications de l'holographie dans le spatial*, sans la moindre concertation, le Département AGO (Astrophysique, Géophysique, Océanologie) – Pr Olivier Absil - organisait à l'ULiège un **Vortex Workshop** (9 – 11 octobre 2023) réunissant plusieurs chercheurs évoqués. Dans la foulée, le 12 octobre, Monsieur **Lorenzo König** a soutenu une thèse doctorale intitulée « *Development of Metasurface Implementations for high-performance Vortex Phase Masks* ».

*) *Holographie, Hologrammes, Imagerie 3D – 2^e partie : Des applications*, Le Ciel (Bulletin de la Société Astronomique de Liège), Vol. 85, novembre 2023, 525 – 541, <https://hdl.handle.net/2268/308424>