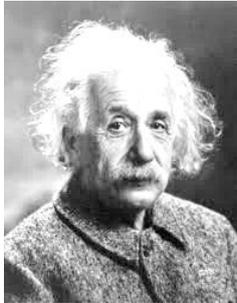


Le projet européen de « télescope géant » Einstein (ET) pour la détection des ondes gravitationnelles dans l'EUREGIO Meuse-Rhin ?

Yvon Renotte, Dr Sci., enseignant-chercheur honoraire de l'Université de Liège
Past-prof invité, co-fondateur du HOLOLAB, Dépt. AGO (Astrophysique)

y.renotte@uliege.be – www.hololab.ulg.ac.be – www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13

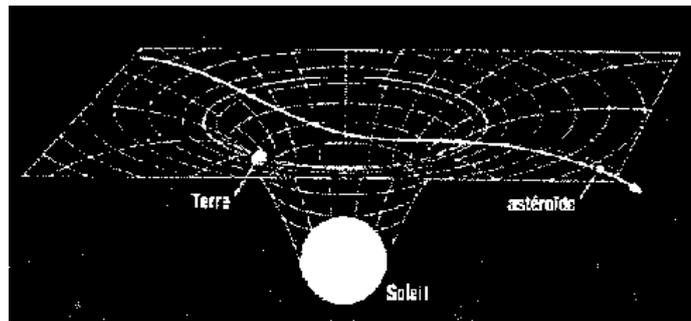
Les prémices¹



- **1905** **Albert Einstein** publie son article sur la **relativité restreinte**. Elle repose sur le postulat que *la vitesse de la lumière est une grandeur absolue*² et abandonne les concepts de temps universel et de simultanéité : l'espace, le temps et la masse deviennent relatifs. Il établit l'équivalence entre masse et énergie³. Le concept de **l'espace-temps quadri-dimensionnel** introduit par **Hermann Minkowski** permet une représentation élégante de la théorie⁴. Dès 1907, il réfléchit à une **théorie relativiste de la gravitation** et énonce le **principe d'équivalence entre gravité et accélération**⁵.

- **1915**, il soumet son manuscrit sur la **Relativité Générale** à l'Académie Royale des Sciences de Prusse⁶. Elle prédit des phénomènes jamais observés, tels *la déviation de la lumière par la gravitation, l'existence des quasars, des pulsars et des trous noirs*⁷! La gravité n'est plus une force mais *une courbure de l'espace-temps qui cesse d'être euclidien*.

- **1917**, Einstein montre que l'on peut trouver des solutions ondulatoires à partir des équations de la Relativité générale ce qui révèle l'existence d'**ondes gravitationnelles** produites par tout objet qui change de forme ou se déplace⁸, solutions précisées en 1937⁹. La Relativité générale est rapidement vérifiée expérimentalement : 1916, *l'avance du*



1. Christian Gruber & Philippe-André Martin, *De l'atome antique à l'atome quantique*, Presses polytechniques et universitaires romandes (2013), chap.6, pp.141-168 ; Michel Biezunski, *Histoire de la Physique moderne*, éditions La Découverte – Biblio-Essais (1993), pp.85-94, 103-110, 210-226 ; Martin Gardner, *La Relativité pour tous*, éd. Dunod (1969) ; Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *SpaceTime Physics*, W.H. Freeman and Co, San Francisco (1966)
2. Vitesse de la lumière : $c = 299\,792\,458$ m/s dans le vide – constante universelle
3. Albert Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik* (ser. 4), 17 (1905), 891–921 ; *Die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie*, *Annalen der Physik*, ser. 4, 23 (1907), 371–384 [$E = mc^2$]
4. Hermann Minkowski. *Das Relativitätsprinzip* (exposé présenté à Göttingen le 5.11.1907, publication posthume, par les
5. Albert Einstein, *Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*, *Jahrbuch der Radioaktivität*, (*On the Relativity Principle and the Conclusions Drawn from It*), 4 (1907), 411–462 ; *Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips*, (*On the Possibility of a New Test of the Relativity Principle*), *Annalen der Physik*, ser. 4, 23 (1907), 197–198
6. Albert Einstein, *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften, Berlin (manuscrit soumis le 25 novembre 1915)
7. Michel Le Bellac, *Relativité générale pour débutants*, HAL (2004), HAL Id: cel-00092961 Institut Non Linéaire de Nice UMR 6638, <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00092961>; <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/astronomie-quasar-305/>; <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/etoile-neutrons-quest-ce-quun-pulsar-864/>; <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-trou-noir-62/>
Stephen Hawking, *Une brève histoire du temps*, Flammarion (1989), pp.118-144
8. Albert Einstein, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, (*Approximative Integration of the Field Equations of Gravitation*), Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, part 1 (1916), 688–696 [première « prédiction » des ondes gravitationnelles] ; *Gravitationswellen*, (*On Gravitational Waves*), Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, part 1 (1918), 154–167 [second article sur les ondes gravitationnelles]
9. Albert Einstein & Nathan Rosen, *On gravitational waves*, *Journal of the Franklin Institute*, 223 (1937), 43–54 [cet article important a démontré que les ondes gravitationnelles sont possibles malgré la nature non linéaire des équations du champ d'Einstein]

périhélie de la Planète Mercure¹⁰, 1919, Arthur Eddington mesure la déviation d'un rayon lumineux par le Soleil lors d'une éclipse¹¹, . . . dans les années 60, observation des premiers quasars et pulsars¹². Les **ondes gravitationnelles** sont des « rides » dans la courbure de l'espace-temps provoquées par exemple par deux étoiles à neutrons tournant l'une autour de l'autre. Elles se propagent à la vitesse de la lumière mais leur amplitude est inférieure à la limite de sensibilité des instruments disponibles. Les variations de distance concernées sont inférieures ou égales à 10⁻²¹ mètre. **Il faudra attendre quasiment un siècle pour que leur détection soit rendue possible** par la mise au point d'**interféromètres gigantesques**, hypersophistiqués, dont les bras font plusieurs kilomètres de long¹³.

La preuve du concept

- **1974, détection indirecte** : un pulsar tournant autour d'une étoile à neutrons permet de montrer que la variation de période orbitale observée est exactement expliquée par l'émission d'ondes gravitationnelles¹⁴ (Russell A. Hulse et Joseph H. Taylor Jr. : prix Nobel en 1993).

- **2016, 11 février**, les **collaborations Ligo** aux États-Unis, et **Virgo** en Europe, annoncent la **première détection directe d'ondes gravitationnelles**¹⁵. Le **14 septembre 2015 à 11h15** : les **interféromètres de LIGO détectent tous, indépendamment, des distorsions de l'espace-temps provoquées par le bref passage d'ondes gravitationnelles** produites par le rapprochement puis la fusion de deux trous noirs (Barry C. Barish, Kip S. Thorne et Rainer Weiss, à l'origine de cette découverte ont reçu le prix Nobel de Physique en 2017).

Aujourd'hui¹⁶

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** : une infrastructure triangulaire avec 3 tunnels de 10 km de long à une profondeur d'environ 250 m. Soutenu par la Commission Européenne, **ET**¹⁷ 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 l'**EUREGIO Meuse – Rhin** (B, PB et D) candidate à son installation, en

10. Albert Einstein, *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*, (*Explanation of the Perihelion Motion of Mercury from the General Theory of Relativity*), Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, part 3 (1915), 831–839

11. La séance du 6 novembre 1919 de la Royal Society londonienne donne solennellement raison à Einstein contre Newton

12. Les **pulsars** sont des étoiles de neutrons qui émettent des bouffées d'ondes électromagnétiques de façon très brève (environ 50 millisecondes) à intervalle extrêmement régulier. Les premiers ont été découverts en 1967 à l'observatoire radioastronomique de Cambridge par *Jocelyn Bell Burnell* . . . et le prix Nobel (1974) a été attribué à son directeur de thèse Antony Hewish, ce qui déclencha une très vive controverse

Les **quasars** sont des astres distants très brillants lorsqu'on les observe au télescope. Leur prodigieuse énergie provient de l'accrétion de la matière par des **trous noirs** supermassifs en rotation pouvant contenir des millions à des milliards de masses solaires

Le terme « **trou noir** » a été inventé par le physicien américain *John Wheeler* en 1967 pour décrire une concentration de masse-énergie qui s'est effondrée gravitationnellement sous sa propre force d'attraction et qui est devenue si compacte que même les photons ne peuvent se soustraire à cette force gravitationnelle. Ils sont décrits par une solution particulière des équations d'Einstein trouvée par *Karl Schwarzschild* en 1917. En 1963, *Roy Kerr* étend les solutions au cas des trous noirs en rotation

- Karl Schwarzschild (1873-1916), *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzber. Deut. Akad. Wiss. (1916), 189-196 [singularité de l'espace-temps : les trous noirs de Schwarzschild]

- Roy Kerr (1934), *Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics*, Physical Review Letters, 11 (5) (1963), 237-238

13. L'interféromètre franco-italien **VIRGO** (près de Pise) : deux bras orthogonaux de 3 km ; collaboration entre cinq pays européens, et le duo d'interféromètres **LIGO** (4 km) aux USA, Livingston en Louisiane et Hanford (état de Washington)

14. Russell Hulse & Joseph Taylor, *Discovery of a pulsar in a binary system*, The Astrophysical Journal, 195 (1975), L51-L53

15. 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), 061102 – 16 pages ; <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

16. Valérie Putzeys, *Télescope Einstein : une opportunité majeure pour notre région*, Vivre la Wallonie (03-2024), 13

17. Le télescope Einstein ?, https://www.einsteintelelescope.nl/fr/?set_lang=fr

concurrence avec la Sardaigne ¹⁸. Des chercheurs belges, hollandais et allemands participent aux études et travaux préparatoires.

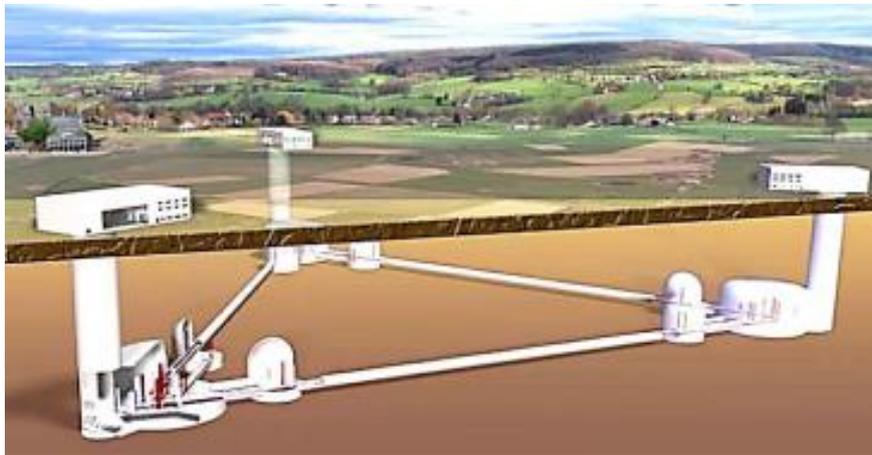
L'Université de Liège s'est vu confier la coordination du **projet E-TEST** dont l'objectif est double :

- *Concevoir un prototype d'un grand miroir en silicium plongé à température cryogénique et isolé des vibrations provenant du sol.* Unique au monde, il est en cours d'installation au *Centre Spatial de Liège*, en collaboration avec *AMOS s.a.* (Advanced Mechanical and Optical Systems).

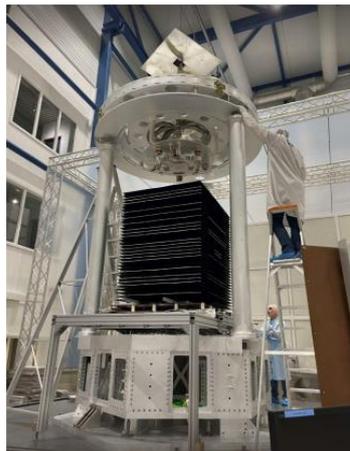
- *L'exploration géologique de l'EMR* consistant en une étude approfondie des sous-sols afin de s'assurer de leur stabilité et consolider l'emplacement de l'instrument pour optimiser sa conception.

Le télescope Einstein est conçu pour mesurer au moins dix fois plus précisément que les détecteurs actuels. Il 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 ¹⁹.

Organigramme du Projet ET : 2018, Naissance de la collaboration ET ; 2021, ET est inscrit sur la feuille de route *ESFRI* (European Strategic Forum for Research Infrastructure) et devient une infrastructure prioritaire en Europe ; 2023, candidature officielle de l'*EUREGIO* ; 2026, choix du site.



Le projet de Télescope Einstein



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

18. Télescope Einstein en EMR – Fiche d'information pour l'Euregio Meuse – Rhin, 35 pages, https://euregiomr.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 & B53/3 Active aerospace structures and advanced mechanical systems, Campus Sart Tilman, <https://www.etest-emr.eu/>

19. Christophe Collette, https://www.news.uliege.be/cms/c_11389743/fr/un-pas-de-plus-dans-la-mise-en-placede-l-ambitieux-projet-du-telescope-einstein