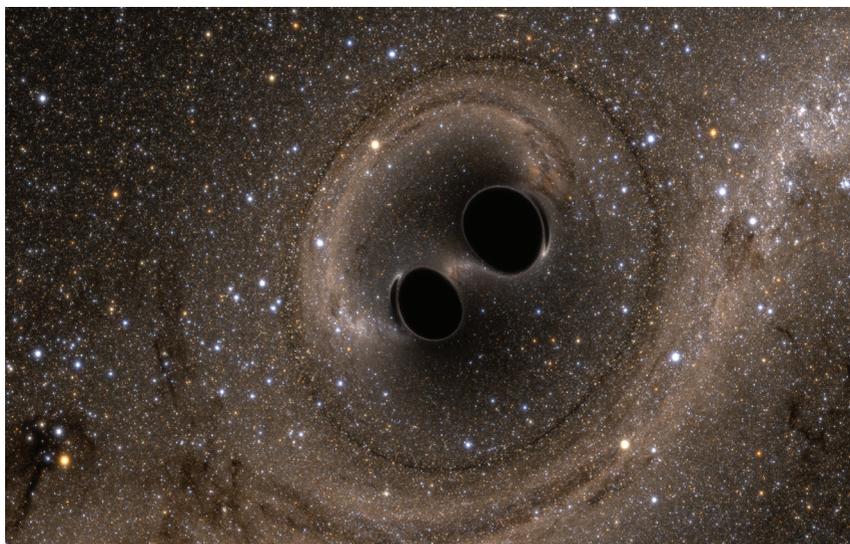


Centre de Géologie

# TERRAE GENESIS

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir  
sur les ondes gravitationnelles.



*Image de stimulation informatique montrant la fusion  
de deux trous noirs (d'après Simulating eXtreme Spacetime project).*

Centre de géologie  
Terraë Genesis  
28 rue de la Gare  
Peccavillers  
88120 Le Syndicat  
03 29 26 58 10  
lemusee@terraegenesis.org



– TerraCom 53 –  
Juillet 2023

– TerraCom – [www.terraegenesis.org](http://www.terraegenesis.org)

Faisant suite à son intervention de 2018 sur les quarks et le boson de Higgs, Gérard Bonneaud est venu nous faire partager quelques idées sur une thématique très actuelle : les ondes gravitationnelles. Même s'il a passé plus de 25 ans de sa vie de chercheur sur les secrets de l'antimatière, ce professeur émérite du CNRS a également participé de près à cette quête du Graal de la physique. La gravitation est probablement l'ultime frontière entre la relativité et la mécanique quantique : après les travaux de Galilée et Newton au 17<sup>e</sup> siècle, c'est au 20<sup>e</sup> qu'Albert Einstein montre qu'une masse (donc de la matière) est capable de déformer l'espace et le temps. Il propose en 1918 que l'accélération d'une masse génère une « lumière gravitationnelle ». Or, ces ondes gravitationnelles constituent la plus faible des forces fondamentales de l'Univers : elles induisent des déplacements de l'ordre de  $10^{-18}$  mètre, soit mille fois moins que la taille d'un proton ...

Comment alors repérer, observer, décrire ces ondes ? Les premières révélées seront produites par le mouvement rapide d'une (très) importante quantité de matière : nous parlons ici de plusieurs masses solaires. Quatre sources sont potentiellement observables : deux étoiles en rotation rapide dans un système stellaire double, la coalescence de deux trous noirs, l'explosion d'une étoile massive (de type supernova) ou encore l'explosion du Big-bang lui-même. Ces corps doivent être non seulement massifs mais aussi posséder une densité très importante. Rappelons quelques ordres de grandeur des masses volumiques : l'eau liquide possède une masse volumique de 1 gramme par centimètre cube, le Soleil  $1,41 \text{ g/cm}^3$ , le granite  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , la planète Terre  $5,52 \text{ g/cm}^3$ , l'osmium  $22,6 \text{ g/cm}^3$ , une naine blanche 1 tonne/cm<sup>3</sup>, une étoile à neutron 1 milliard de tonnes/cm<sup>3</sup>, un trou noir au minimum cent milliards de tonnes/cm<sup>3</sup>.

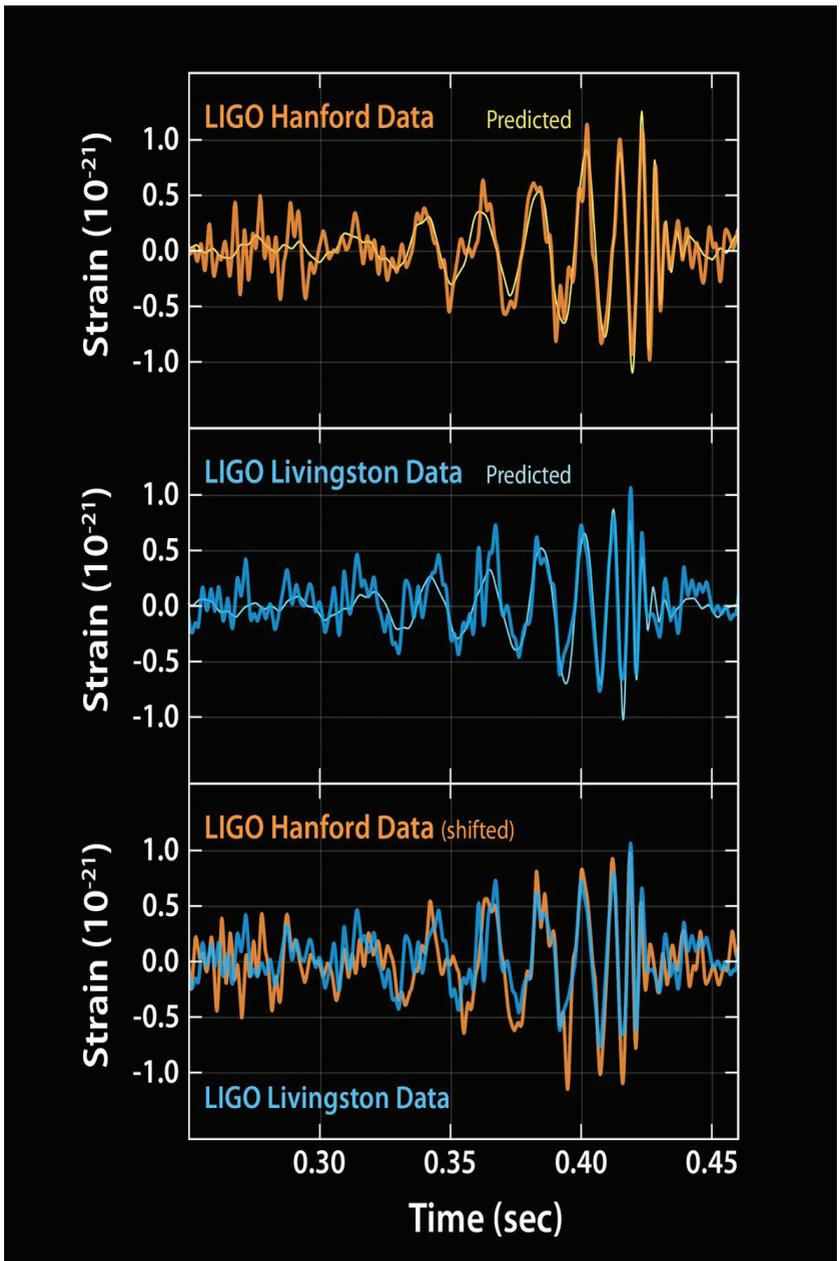
Les premiers appareils de détections LIGO fonctionnent depuis 2002 à Hanford (état de Washington) et à Livingstone (Louisiane), rejoints par VIRGO (Italie) en 2017 et enfin LIGO-India en 2024. Il s'agit de réaliser des figures d'interférométrie entre deux faisceaux de lumière laser circulant dans deux bras perpendiculaires de plusieurs kilomètres de long chacun. Le passage d'une onde gravitationnelle va déformer l'espace davantage dans un bras que l'autre et un déphasage va ainsi apparaître. Le tout premier événement détecté en 2015 est nommé GW150914. Il est enregistré avec 7 millisecondes de décalage entre les deux LIGO.

Deux trous noirs ont fusionné en 0,2 secondes à une distance de la Terre de 1,34 milliards d'années-lumière. Les deux astres super massifs avaient 36 et 29 masses solaires et ont donné un nouveau trou noir de 62 masses solaires. Les 3 masses solaires manquantes ont été converties en ondes gravitationnelles ... Aujourd'hui, 91 événements détectés constituent la somme de la collecte d'information de ces nouveaux physiciens gravitationnels. Dans le futur, de nouvelles générations d'interféromètres naîtront, de plus en plus sensibles, sur Terre avec le télescope souterrain Einstein, ou dans l'espace avec le projet européen eLISA. Au-delà d'une confirmation majeure de la relativité générale, la connaissance des ondes gravitationnelles permettra peut-être de décrypter plus avant les formidables secrets de l'infiniment petit et de l'infiniment grand dans l'Univers.

Cyrille Delangle, conservateur du centre de géologie Terrae Genesis.

*Page suivante :*

Les deux graphiques du haut montrent les données reçues à Livingston et Hanford, ainsi que les formes d'onde. Ces formes prédites montrent à quoi devraient ressembler deux trous noirs fusionnés selon les équations de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, ainsi que le bruit omniprésent de l'instrument. Le temps est porté sur l'axe horizontal et la contrainte sur l'axe vertical. La déformation représente la quantité fractionnaire par laquelle les distances sont déformées. Comme le révèlent ces tracés, les données LIGO correspondent très étroitement aux prédictions d'Einstein. Le graphique du bas est le tracé final qui compare les données des deux détecteurs. Les données de Hanford ont été inversées en raison des différences d'orientation des détecteurs sur les deux sites. Les données ont également été décalées pour corriger le temps de trajet des signaux d'ondes gravitationnelles entre Livingston et Hanford (le signal a d'abord atteint Livingston, puis, voyageant à la vitesse de la lumière, a atteint Hanford sept millièmes de seconde plus tard). Comme le montre le graphique, les deux détecteurs ont été témoins du même événement, confirmant ainsi la détection.



*Signaux observés par les détecteurs LIGO  
(d'après Caltech, MIT, LIGO lab).*