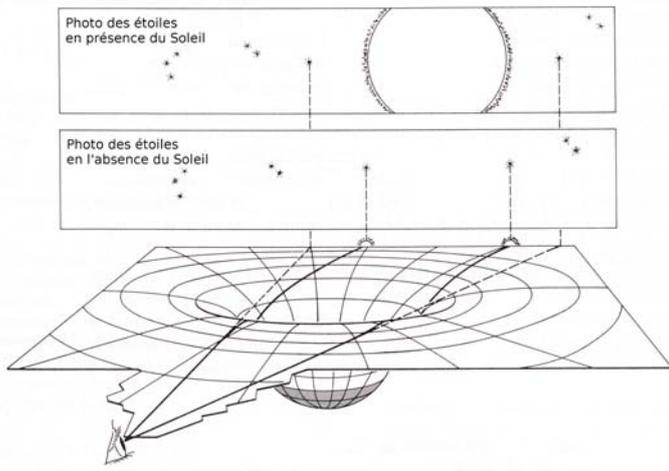


# Relativité générale et ondes gravitationnelles

La théorie de Newton de la gravitation (1687) décrit le mouvement des corps massifs dans un espace plat, où la lumière suit des lignes droites sans être influencée par la gravité.

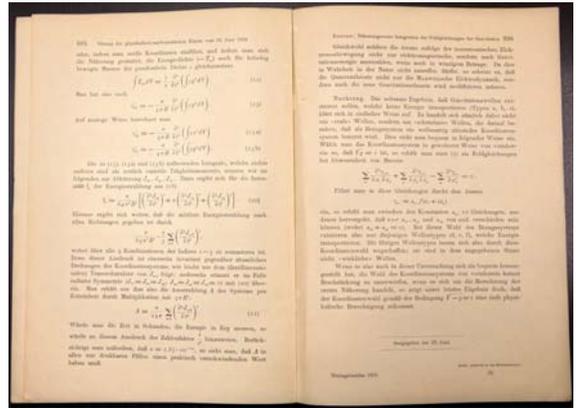
En revanche, la théorie de la relativité générale d'Einstein (1915) prédit que les corps massifs courbent l'espace-temps et dévient la lumière aussi bien que la matière. C'est donc la courbure de l'espace-temps qui impose aux corps célestes des trajectoires incurvées, comme celle de la Terre autour du Soleil.



La déflexion des rayons lumineux par le champ gravitationnel du Soleil est la première prédiction de la théorie de la relativité générale à avoir été vérifiée expérimentalement, en 1919.

Malgré sa complexité, la relativité générale a des applications dans la vie courante, comme les systèmes de positionnement globaux (GPS ou Galileo) qui ont besoin de prendre en compte cette théorie pour fonctionner.

Les masses peuvent aussi émettre des ondes gravitationnelles, oscillations de la courbure qui se propagent à la vitesse de la lumière, et s'atténuent en s'éloignant de leur source.



L'article original d'Albert Einstein prévoyant l'existence des ondes gravitationnelles. (© Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften)

Pour découvrir et étudier ces ondes, des scientifiques ont construit des instruments de mesure géants, très sensibles et extrêmement ingénieux, comme le détecteur Virgo.



Vue d'ensemble du détecteur Virgo : ses deux bras, perpendiculaires, font 3 km de long. (© The Virgo collaboration)

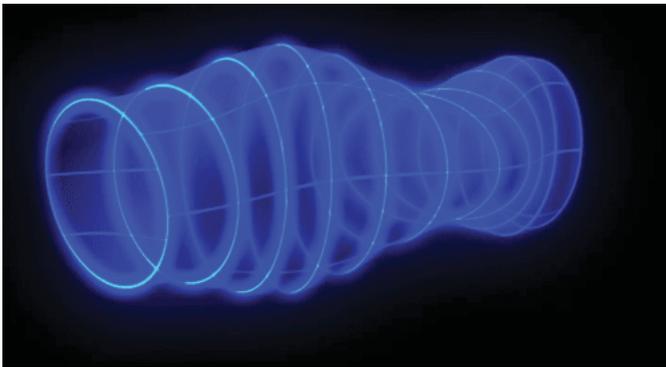
Cependant, la force de gravitation est si ténue que le signal émis est généralement trop faible pour être détecté. C'est le cas, notamment, de toutes les sources terrestres connues.

Pour détecter des ondes gravitationnelles, il faut donc **se tourner vers le cosmos** et chercher des phénomènes cataclysmiques comme la fusion de deux astres. Ces événements sont rares et très éloignés de la Terre, donc le signal qui atteint les instruments reste très faible et difficile à mesurer. C'est pourquoi il a fallu un siècle (1916-2015) pour mener à bien cette quête !

# Le détecteur Virgo

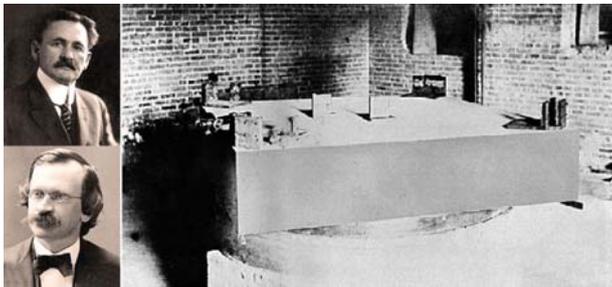
Le fonctionnement de Virgo repose sur le fait qu'une **onde gravitationnelle déforme l'espace-temps perpendiculairement à sa direction de propagation** en l'étirant et en le comprimant alternativement dans des directions orthogonales.

Si de petites masses-tests, sensibles uniquement à la gravitation, sont disposées en cercle et sont traversées par une onde gravitationnelle, ce cercle sera déformé en ellipse oscillante. La déformation attendue est très faible : elle correspond à la taille d'un atome rapportée à la distance Terre-Soleil !



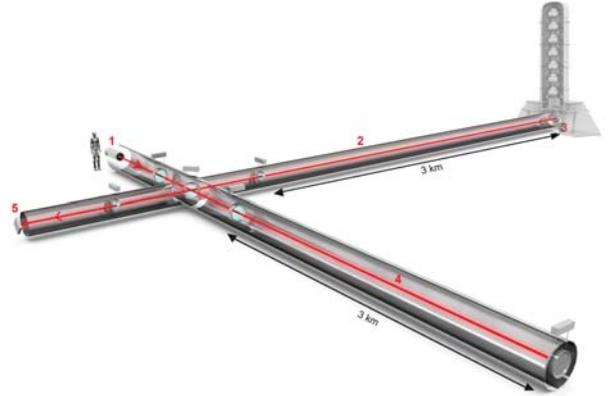
Une onde gravitationnelle déforme l'espace-temps dans des plans perpendiculaires à sa direction de propagation. (© ESA-C. Carreau)

Pour mettre en évidence cet effet, on utilise la lumière, qui se propage à vitesse constante dans le vide (~ 300 000 km/s). Un **interféromètre de Michelson** est un dispositif optique dans lequel un faisceau lumineux est séparé en deux par un premier miroir (lame séparatrice) tourné de 45 degrés autour d'un axe vertical.



Le premier interféromètre construit par Albert Michelson (haut) et Edward Morley (bas) en 1887. (© Case Western Reserve University)

Les deux faisceaux ainsi obtenus se propagent dans des directions perpendiculaires, sont réfléchis sur deux miroirs terminaux puis viennent se recombinaison sur la lame séparatrice où ils interfèrent. La lumière détectée en sortie dépend de la manière dont les deux faisceaux se superposent.



Chaque miroir de l'interféromètre Virgo est suspendu mais un seul stabilisateur est représenté. Les bras mesurent 3 km de long et les stabilisateurs des miroirs 7 m de haut. (© The Virgo Collaboration - LAPP)

Quand deux vagues de même amplitude se croisent à la surface de l'eau, leurs crêtes et leurs creux vont s'ajouter : si les vagues sont **en phase**, on obtiendra une crête ou un creux plus élevé ; si elles sont **en opposition de phase**, la crête de l'une va compenser le creux de l'autre, donnant un calme plat.

Dans un interféromètre, les deux faisceaux peuvent s'ajouter pour produire un faisceau plus brillant, ou s'annuler pour donner de l'obscurité. Le résultat dépend du décalage entre les deux ondes lumineuses, donc de la **différence de temps de parcours des faisceaux dans les deux bras de l'interféromètre**.

Un détecteur d'ondes gravitationnelles comme Virgo mesure en permanence les déformations de l'espace-temps en comparant le temps de parcours de la lumière dans deux directions perpendiculaires. Un éventuel écart est converti en signal détectable (une puissance lumineuse) par le phénomène d'interférences.

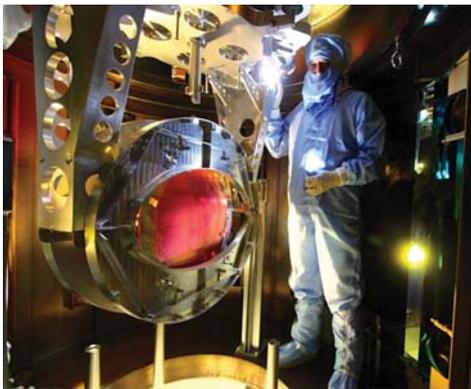
# Les meilleurs miroirs du monde

Les miroirs de Virgo sont réalisés en trois étapes : la fabrication du substrat, son polissage et l'ajout d'une couche mince comme revêtement de surface.

Le substrat est en **silice fondue**, un verre homogène, isotrope et peu absorbant. Les miroirs, qui pèsent 40 kg, ont un diamètre de 350 mm et une épaisseur de 200 mm. Ils forment des cavités optiques de trois kilomètres.

Grâce au polissage, **les défauts atteignent à peine une hauteur de cinq atomes** au centre du miroir. Légèrement courbé, il focalise la lumière à mi-parcours du bras.

Le **revêtement de surface**, réalisé au Laboratoire des Matériaux Avancés (Villeurbanne), donne aux miroirs terminaux une réflectivité maximale pour la longueur d'onde du laser ( $\lambda \sim 10^{-6}$  m, proche infrarouge) : **moins de 0,0001% de lumière est perdue à chaque réflexion** (par absorption, transmission résiduelle ou diffusion).

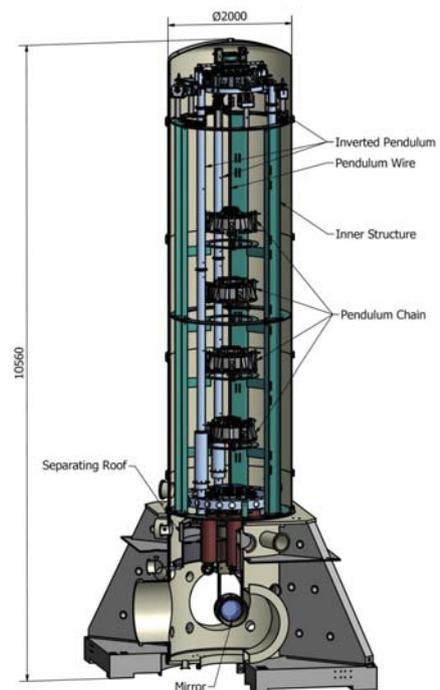


La lame séparatrice de Virgo, installée au bas de sa suspension.  
Le miroir est recouvert d'un film protecteur, de couleur rose. (© M. Perciballi)

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles sont très sensibles aux vibrations du sol, imperceptibles pour l'être humain mais bien plus fortes que les signaux attendus du cosmos. Il faut donc atténuer les premières pour détecter les seconds.

On y parvient en suspendant les miroirs à une structure métallique (sept mètres de haut, poids d'une tonne) qui agit comme des **pendules en cascade**. Chaque pendule a une **fréquence caractéristique de résonance** qui dépend de sa longueur. Quand le sommet d'un pendule est excité à cette fréquence, son autre extrémité oscille fortement : un tel dispositif amplifie alors les mouvements. Par contre, quand on l'excite à une fréquence supérieure à sa fréquence de résonance, le mouvement n'est pas transmis mais largement atténué.

Ces suspensions réduisent d'un facteur  $10^{14}$  (cent mille milliards) les vibrations issues du sol de fréquence supérieure à une dizaine de hertz. La détection d'ondes gravitationnelles de fréquence plus élevée est donc possible. A plus basse fréquence, les suspensions ne jouent plus leur rôle d'atténuateur.



L'atténuateur de vibrations des miroirs de Virgo dans sa version initiale.  
(© The Virgo Collaboration)

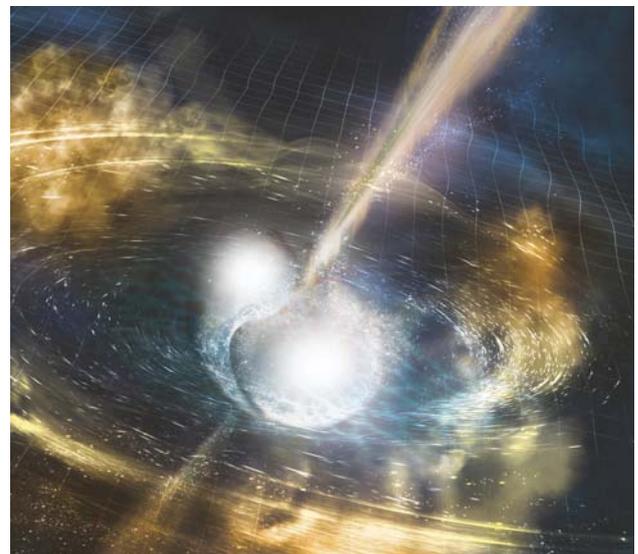
# Sources gravitationnelles et sensibilité du détecteur

Virgo détecte une variation relative de la longueur des bras produite par le passage d'une onde gravitationnelle. Durant sa propagation, celle-ci se dilue dans l'espace et son amplitude décroît comme l'inverse de la distance parcourue depuis sa source.

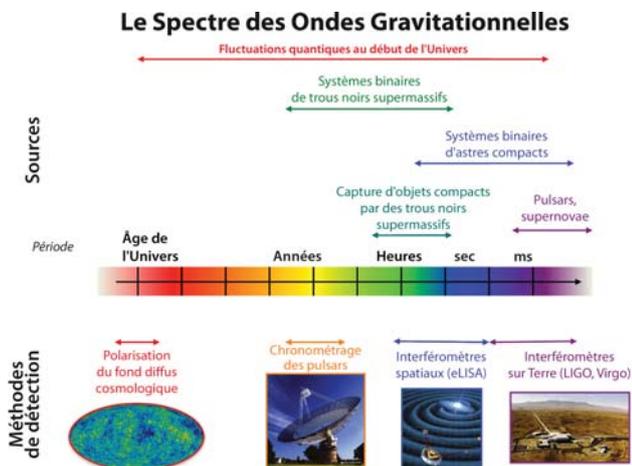
Dans un détecteur, le signal produit par le passage d'une onde gravitationnelle se mélange aux divers bruits de mesure qui parasitent les données enregistrées par l'instrument. Un signal ne sera détectable que s'il émerge du bruit.

Si ce bruit diminue de moitié, une même source pourra être détectée deux fois plus loin, et le volume d'Univers exploré augmentera d'un facteur 8. Si l'on gagne un facteur 10 en sensibilité, le gain en volume est un facteur 1000. Donc chaque gain de sensibilité se traduit par une augmentation notable du volume accessible et accroît le nombre de sources observables.

Il y a quelques années, le volume d'univers observé était encore trop faible pour rendre une détection probable. A partir de 2010, d'ambitieux programmes d'amélioration ont été menés et ont fait progresser la sensibilité des instruments, qui ont soudain vu assez loin pour être témoins de fusions de systèmes doubles d'astres compacts, trous noirs ou étoiles à neutrons, principales sources d'ondes gravitationnelles attendues et cherchées depuis deux décennies.



Vue d'artiste de la fusion de deux étoiles à neutrons.  
(© LIGO / Sonoma State University / A. Simonnet)



En haut : quelques types de sources d'ondes gravitationnelles classées en fonction de leur fréquence.  
Au milieu : leur gamme de fréquences possibles (la couleur n'a pas de signification physique).  
En bas : méthodes de détection ou instruments utilisés selon cette fréquence.

(© LIGO-Virgo - LAL)

L'augmentation de la sensibilité des détecteurs comme Virgo est un travail de longue haleine qui mobilise l'ensemble de la collaboration.

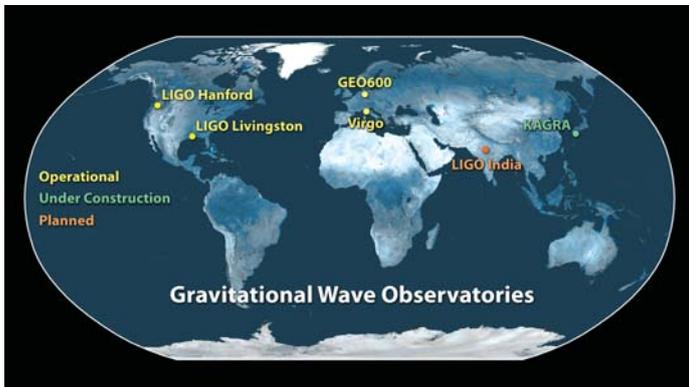
Côté instrument, il s'agit d'améliorer ses composants, la précision avec laquelle ceux-ci sont contrôlés et de mener un véritable travail de détective pour comprendre l'origine des bruits qui polluent les données et risquent de masquer les signaux d'ondes gravitationnelles. Côté analyse, il faut améliorer les logiciels qui cherchent les ondes gravitationnelles dans les données et, après chaque découverte, extraire du signal mesuré le plus d'informations possible.

# Astronomie multi-messagers

Le détecteur Virgo se trouve sur le site de l'*European Gravitational Observatory* (EGO, à Cascina, près de Pise, en Italie). Ce consortium franco-italien est chargé du fonctionnement de Virgo, de son amélioration et des infrastructures associées, comme le centre informatique qui analyse les données en temps réel.

Virgo regroupe en une vingtaine d'équipes et plus de 300 scientifiques issus de huit pays : la France (CNRS) et l'Italie (INFN), qui sont les deux pays fondateurs, rejoints ensuite par les Pays-Bas (Nikhef), la Pologne, la Hongrie, l'Espagne, la Belgique et l'Allemagne.

L'homologue de Virgo est LIGO (*Laser Interferometer Gravitational wave Observatory*), qui fédère une centaine de groupes (18 pays, 1200 membres) et gère deux détecteurs, construits aux Etats-Unis.



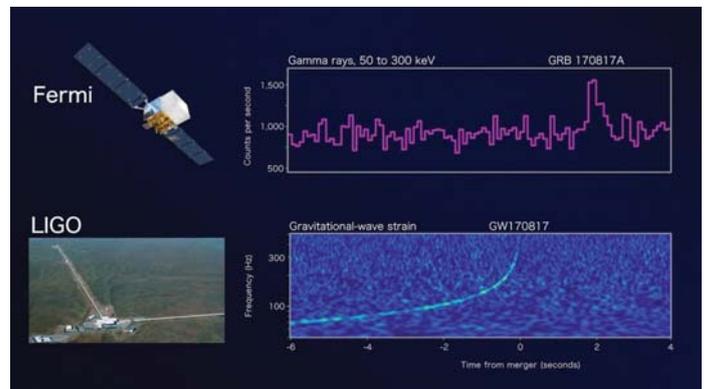
Les antennes gravitationnelles opérationnelles (jaune), en construction (vert) et en projet (orange) courant 2019. (© LIGO-Virgo)

LIGO et Virgo étant sensibles aux mêmes ondes gravitationnelles, ils ont tout intérêt à analyser ensemble leurs données pour y chercher des signaux vus de manière similaire par les différents instruments. C'est le moyen le plus sûr de séparer le bon grain (les ondes gravitationnelles) de l'ivraie (le bruit de mesure) : les antennes gravitationnelles étant distantes de plusieurs milliers de kilomètres, il est peu probable qu'elles soient affectées simultanément par les mêmes bruits. Ceux-ci étant d'origine instrumentale ou environnementale, ils sont le plus souvent locaux.

Depuis 2007, les résultats obtenus par LIGO et Virgo sont publiés conjointement. En 2020, un quatrième détecteur devrait rejoindre ce réseau : KAGRA, au Japon. D'ici quelques années, un cinquième détecteur, de type LIGO mais installé en Inde, devrait également être construit.

Ces antennes gravitationnelles sont liées à d'autres observatoires : télescopes dans toutes les gammes de longueur d'onde du spectre électromagnétique, et détecteurs de rayons cosmiques ou de neutrinos. Chaque observation bénéficie aux autres en indiquant la région du ciel à explorer.

Cette **astronomie multi-messagers** (lumière, particules, ondes gravitationnelles) a montré son potentiel avec la première observation d'une fusion de deux étoiles à neutrons le 17 août 2017.



Signaux détectés à 1,7 secondes d'intervalle par le satellite Fermi (rayons gamma) et LIGO-Virgo, le 17 août 2017, indiquant la fusion de deux étoiles à neutrons. (© ESA)

Dans les années à venir, les astronomes pourront aussi bien détecter les vibrations géométriques, matérielles et électromagnétiques du cosmos. L'écoute de cette symphonie nous permettra de mieux comprendre la naissance de l'Univers, son histoire et son probable devenir.

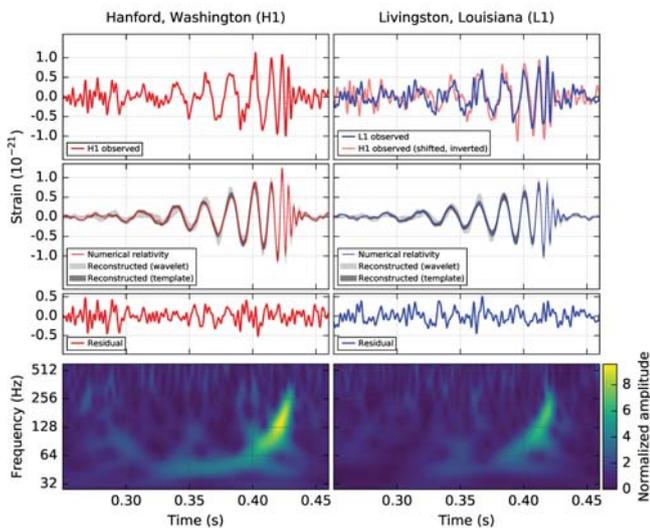
# Premières détections : des fusions de trous noirs

**Lundi 14 septembre 2015**, vers midi à Paris : le détecteur Virgo est encore en phase d'amélioration alors que les deux détecteurs LIGO viennent de démarrer une première prise de données en configuration avancée, beaucoup plus sensible. Un signal extrêmement faible de quelques dixièmes de seconde est enregistré par les deux instruments américains. Il est vite identifié comme prometteur par des algorithmes qui analysent les données en temps réel. C'est le début d'une période excitante et bien occupée pour les deux collaborations LIGO et Virgo, qui débouchera, le 11 février 2016, sur l'annonce de la première détection d'ondes gravitationnelles, associée à la première observation d'un signal issu directement de **trous noirs**. Cet événement a été baptisé **GW150914**.

La puissance de cette fusion a dépassé d'un facteur 10 la puissance lumineuse émise par les étoiles de l'univers visible.

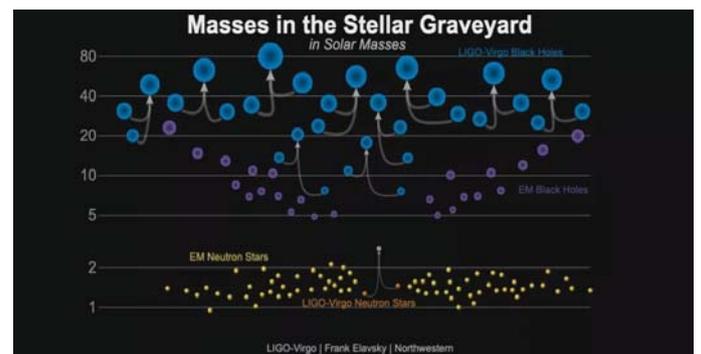
Lors de la fusion de deux astres compacts (trous noirs ou étoiles à neutrons), la théorie prédit avec précision la forme du signal qui doit être observé. Cela permet d'utiliser les méthodes les plus efficaces pour rechercher cette signature dans les données des interféromètres. En parallèle, un travail long et minutieux doit être mené pour éliminer la possibilité que les signaux enregistrés aient une origine terrestre. Pour GW150914, l'accord entre la théorie et les observations est très bon : c'est un nouveau test expérimental passé avec succès pour la théorie de la relativité générale !

Le signal détecté ce jour-là est caractéristique de la fusion de deux trous noirs. En effet, on peut en extraire la masse des deux astres (~30 masses solaires), leur vitesse orbitale (~150 000 km/s) et la distance qui les sépare au moment du choc (quelques centaines de kilomètres). Dans notre bestiaire cosmique, seuls des trous noirs ont de telles propriétés.



Signal gravitationnel (déformation) émis par la fusion de deux trous noirs (haut) comparé aux courbes théoriques attendues (milieu), et spectre du signal reçu (bas).  
(© LIGO-Virgo)

Il y a environ un milliard d'années, dans une lointaine galaxie, deux trous noirs ont fusionné, produisant le phénomène alors le plus énergétique et le plus puissant jamais observé dans l'histoire de l'astronomie. Trois masses solaires ont été converties en énergie lors de cet événement (bien plus que l'énergie brûlée par le Soleil au cours de sa vie).



Masses des trous noirs (bleu) ou étoiles à neutrons (jaune), exprimées en masses solaires, et dont la fusion a été détectée par LIGO-Virgo depuis 2015.  
(© LIGO-Virgo / Frank Elavsky / Northwestern University)

Depuis, neuf autres fusions de systèmes doubles de trous noirs ont été découvertes par LIGO et Virgo. Avec l'amélioration des instruments, d'autres sources d'ondes gravitationnelles, attendues ou surprenantes, seront peut-être découvertes lors de la prise de données «O3» qui démarre au printemps 2019 et devrait durer un an.

# La première observation de la fusion d'étoiles à neutrons

Fin juillet 2017, Virgo a rejoint les deux instruments LIGO pour quatre semaines d'observations et de mesures communes. Deux fusions de trous noirs ont alors été observées par les trois détecteurs : **GW170814** le 14 août et **GW170818** le 18 août, démontrant ainsi la capacité de localisation du réseau global (la zone délimitée dans le ciel est environ vingt fois plus petite que celle identifiée par les détecteurs LIGO seuls).

Mais l'événement le plus remarquable fut **la première découverte d'une fusion de deux étoiles à neutrons, GW170817**, détectée le 17 août 2017. Le phénomène a été enregistré avec un décalage de 1,7 s par LIGO-Virgo et par le satellite Fermi qui observe les **sursauts gamma**, brusques bouffées de photons très énergétiques qui apparaissent dans le ciel chaque jour sporadiquement.

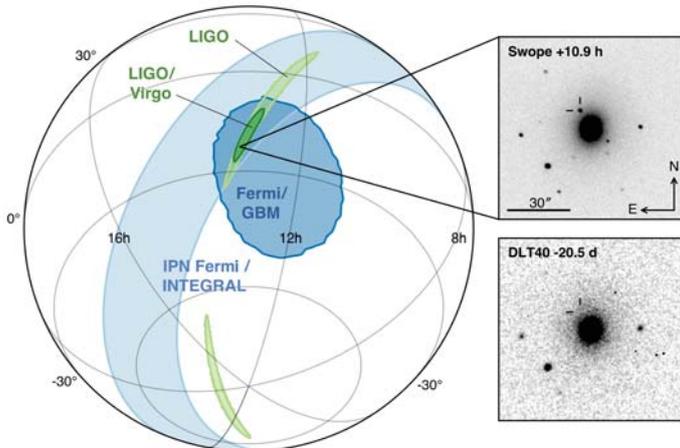
Cette coïncidence entre deux événements rares indiquait peut-être une origine commune. Et si la source émettait des rayons gamma, on pouvait probablement la détecter aussi dans d'autres longueurs d'onde du spectre électromagnétique. Grâce à la localisation fournie par LIGO-Virgo, le télescope Swope (Chili) a identifié la contrepartie optique de GW170817 onze heures après l'enregistrement des données par les détecteurs d'ondes gravitationnelles. Très rapidement, tous les télescopes qui pouvaient avoir cette source dans leur champ de vision l'ont observée. Pendant plusieurs semaines, la **kilonova** GW170817 fut l'événement le plus suivi de l'histoire de l'astronomie.



Le satellite Fermi conçu pour détecter les rayons gamma. (© NASA)



Le télescope Swope au Chili. (© Yuri Beletsky)



Localisation de GW170817 par LIGO, Virgo, Fermi et INTEGRAL. L'étoile détectée par le télescope Swope (carré haut) n'existait pas trois semaines plus tôt (carré bas).

(© LIGO-Virgo-Swope-DLT40)

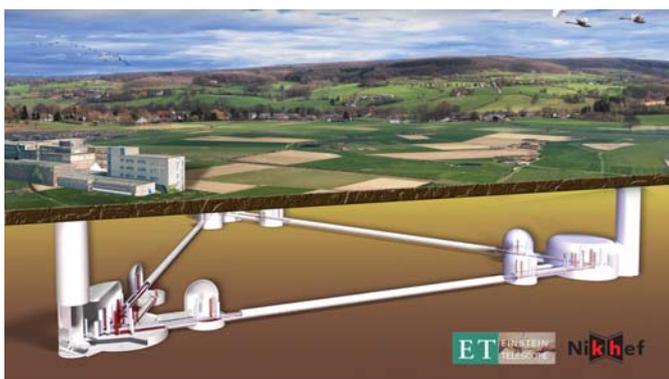
Les onze signaux d'ondes gravitationnelles détectés par LIGO et Virgo en 2015 puis 2017 sont répertoriés dans un catalogue qui décrit ces différentes observations et les résultats obtenus en analysant leurs données, tant pour chaque événement individuel que pour la population de systèmes binaires de trous noirs dans son ensemble.

Les détections à venir permettront de mieux comprendre comment et à quel rythme de tels systèmes se forment dans l'Univers.

# L'avenir des détecteurs

Fin août 2017, LIGO et Virgo ont entamé de nouveaux programmes d'amélioration ambitieux pour gagner en sensibilité et augmenter le nombre de détections futures. Début 2019, ces programmes touchent à leur fin et après un mois de tests, une année de prises de données communes LIGO-Virgo doit démarrer au printemps 2019. Cette alternance de mesures et d'améliorations techniques se poursuivra dans les prochaines années, afin d'atteindre les limites de l'infrastructure actuelle.

Un projet de détecteur de troisième génération est en développement. Le **Télescope Einstein** aura la forme d'un triangle équilatéral de 10 km de côté, enterré à une centaine de mètres de profondeur pour s'affranchir au mieux du bruit sismique, concentré en surface. Chaque sommet sera le centre d'un interféromètre utilisant deux des trois côtés du triangle, formant trois détecteurs en un même lieu. Chacun d'eux sera doublé : l'un pour les hautes fréquences ( $\geq 30$  Hz) et l'autre pour les basses fréquences ( $\leq 30$  Hz). Le site, les équipes et les financements sont encore à déterminer pour ce projet à long terme (plus d'une décennie).

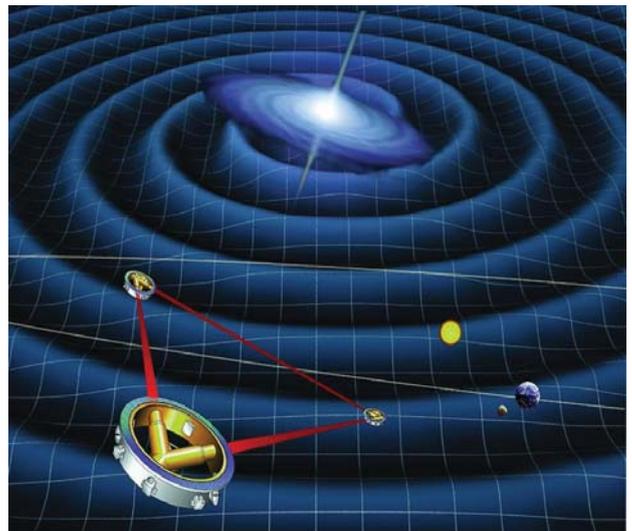


Vue d'artiste d'une possible implantation du Télescope Einstein. (© The Einstein Telescope)

Pour détecter des ondes gravitationnelles de fréquence plus basse, il faut s'affranchir totalement des bruits sismiques. Une première piste consiste à suivre les impulsions émises par des **pulsars**, étoiles à neutrons qui nous envoient des flashes lumineux réguliers, tels des phares cosmiques.

Si l'espace-temps se déforme sous l'effet d'une onde gravitationnelle, le trajet de ces bouffées électromagnétiques est modifié, donc la cadence avec laquelle elles sont détectées sur Terre l'est aussi. Cette méthode n'a pas encore permis de détection directe mais sa sensibilité progresse régulièrement.

Le système LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*, collaboration ESA-NASA), qui devrait être lancé vers 2030, est un interféromètre géant formé de **trois satellites distants d'environ 2,5 millions de kilomètres**, qui échangeront en permanence des faisceaux laser permettant de suivre les déformations de l'espace-temps et de mettre en évidence des ondes gravitationnelles, en particulier celles émises par des trous noirs supermassifs.



Le projet de télescope spatial LISA. (© NASA)

Les défis lancés par ce projet spatial sont inédits. Son objectif est de découvrir des sources auxquelles LIGO et Virgo ne sont pas sensibles, tout en permettant de réaliser des mesures complémentaires sur des sources comme celles déjà détectées par LIGO et Virgo. En effet, LISA pourrait observer l'évolution de systèmes binaires d'astres compacts plusieurs mois avant qu'ils ne fusionnent et soient alors détectables sur Terre, assurant un suivi du même phénomène sur une longue durée.