

# Les premières détections des ondes gravitationnelles

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'accélérateur linéaire, UMR8607 CNRS-Université Paris Sud, BP 34, 91898 Orsay Cedex et European Gravitational Observatory, Via E. Amaldi, 56021 S. Stefano a Macerata, Cascina (PI), Italie.

2016 restera l'année de la découverte des ondes gravitationnelles, annoncée par les collaborations LIGO et Virgo. En effet, les deux détecteurs LIGO ont enregistré en septembre et décembre 2015 deux signaux émis lors de la fusion de trous noirs de plusieurs dizaines de masses solaires au total. Des analyses longues et complexes ont permis de repérer ces ondes gravitationnelles dans le bruit de mesure et de démontrer l'origine astrophysique de ces signaux.

C'est à la fois l'aboutissement d'un programme de recherche qui couvre plusieurs décennies et l'ouverture d'une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Cet article raconte cette découverte du point de vue de l'expérience.

11 février 2016 : les collaborations internationales LIGO et Virgo annoncent la première détection directe des ondes gravitationnelles (OG). L'événement, nommé « GW150914 », a été enregistré par les deux détecteurs LIGO situés aux États-Unis (pour l'un à Hanford dans l'état de Washington, pour l'autre à Livingston en Louisiane) et analysé pendant cinq mois avant de pouvoir conclure qu'il s'agissait bien d'un signal provenant du cosmos, émis par la fusion de deux trous noirs situés à environ 1,3 milliards d'années-lumière de la Terre. Cette annonce sera suivie d'une autre, le 15 juin 2016, à nouveau pour une fusion de trous noirs – l'événement « GW151226 ».

Hasard du calendrier, ces découvertes surviennent un siècle après l'introduction du concept d'OG par Einstein, quelques mois après la publication de la théorie de la relativité générale en novembre 1915. C'est l'aboutissement d'un long feuilleton scientifique riche en rebondissements, frustrations, progrès, controverses... et dont la conclusion heureuse est un bon exemple de collaboration fructueuse entre théorie et expérience.

## Les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles

S'il fallait rédiger l'acte de naissance de la recherche des OG, on y inscrirait probablement « Chapel Hill, janvier 1957 ». En effet, une conférence d'une semaine sur « le rôle de la gravitation en physique » eut lieu à cette date à l'Université de Caroline du Nord et on y clarifia le statut des OG sur le plan théorique : elles avaient une réalité physique et pouvaient, au moins en principe, être détectées. Côté expérience, le défi à relever était immense :

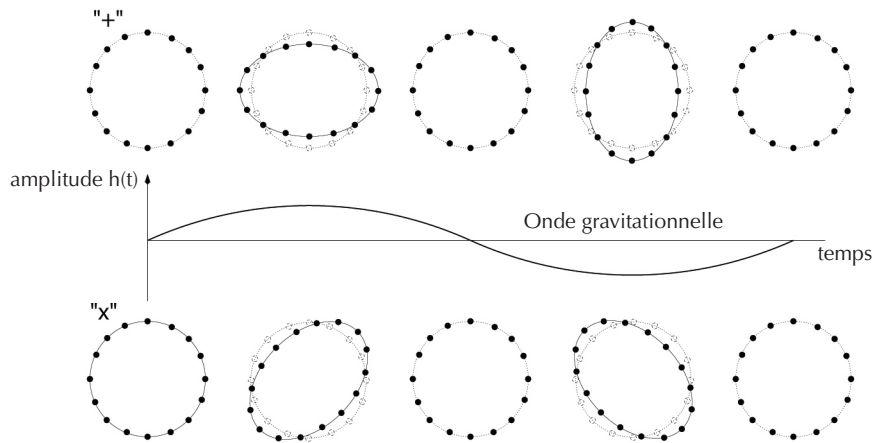
réussir à observer des signaux très ténus en provenance du cosmos. En effet, la gravitation étant de loin la plus faible des quatre interactions fondamentales, aucune source terrestre d'OG n'est assez puissante pour générer un signal observable.

Joseph Weber, l'un des participants à cette conférence, allait consacrer toute sa carrière à la recherche des OG. Dans les années 1960, il conçut un premier type de détecteur : une barre de métal résonante qui vibre au passage d'une OG, laquelle y dépose un peu d'énergie, convertie en signal électrique par un transducteur. Il réfléchit également aux moyens d'améliorer la sensibilité des détecteurs et aux méthodes d'analyse des données. Par ses travaux, il a vraiment lancé un domaine de recherche auquel très peu de gens s'intéressaient à l'époque. Plusieurs générations de « barres de Weber » de plus en plus perfectionnées ont été construites depuis, mais les défauts de ce type de détecteur – faible bande passante et physique de l'interaction barre résonante-OG complexe – ont fait qu'ils ont été supplantés par d'autres instruments : les interféromètres aux miroirs suspendus, comme LIGO et Virgo.

Le choix de cette technologie se comprend en revenant aux caractéristiques des OG. Une OG est une perturbation quadrupolaire de l'espace-temps, créée par une masse accélérée ; elle déforme localement cet espace-temps dans le plan transverse à sa direction de propagation (fig. 1). Pour mesurer ces variations, on peut utiliser un faisceau laser : celui-ci se propage à vitesse constante, et donc son temps de parcours entre deux points sera allongé (raccourci) si l'espace-temps qui les sépare est étiré (comprimé). Virgo et LIGO utilisent un laser de puissance infrarouge (longueur d'onde : 1064 nm).



Vues aériennes des détecteurs Virgo (a), LIGO Hanford (b) et LIGO Livingston (c).



**1. Visualisation de l'effet des deux polarisations « + » et « x » d'une onde gravitationnelle sur l'espace-temps.** On suppose l'OG périodique et se propageant perpendiculairement au plan de l'image. Un anneau de particules test initialement rond est déformé et se transforme en une ellipse : les longueurs se contractent et s'étirent alternativement dans deux directions perpendiculaires lors du passage de l'OG.

Dans un interféromètre de Michelson (fig. 2), la puissance lumineuse détectée en sortie dépend de l'état d'interférence entre les deux faisceaux qui se recombinaient au niveau de la lame séparatrice. Cette interférence reflète le déphasage entre les faisceaux, dû aux variations de longueur des bras (si l'on suppose le laser stable)... et donc potentiellement au passage d'une OG ! Prenons le cas optimal d'une OG d'amplitude  $h$  (un nombre sans dimension) se propageant perpendiculairement au plan contenant l'interféromètre. Dans chaque

bras de longueur  $L$ , l'espace-temps se déforme d'une quantité

$$\delta L = \frac{1}{2} \times h \times L$$

de manière différentielle : l'espace-temps s'étire le long d'un bras et se comprime dans la direction perpendiculaire, celle de l'autre bras. Si  $h$  vaut  $10^{-21}$ ,  $\delta L$  est de l'ordre de  $10^{-18}$  m pour une longueur de bras  $L = 3$  km.

L'équation ci-dessus montre que l'effet mesuré est directement proportionnel à l'amplitude de l'OG et qu'il est d'autant plus important que les bras du détecteur

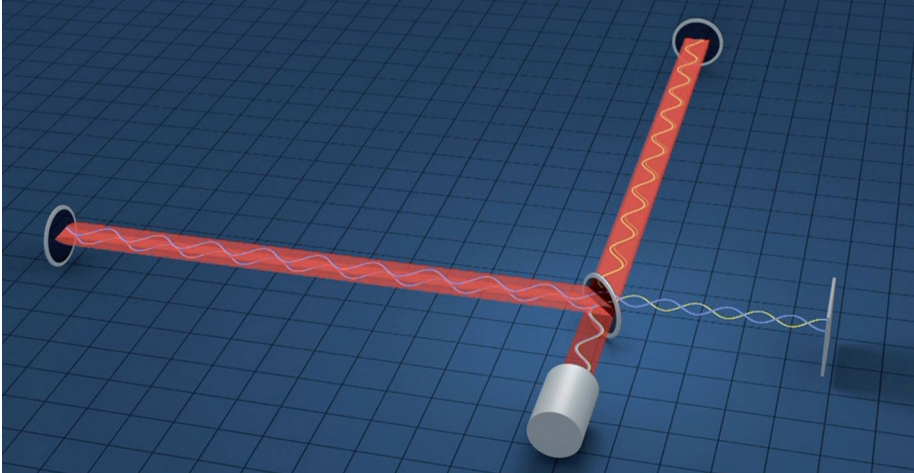
sont longs : deux observations sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir. De plus, utiliser un interféromètre plutôt qu'une cavité optique simple permet de faire une mesure relative et non absolue. L'impact de nombreuses sources de bruit qui pourraient obérer la sensibilité de l'instrument est ainsi réduit de manière importante.

Puisqu'on veut mesurer une variation de puissance lumineuse en sortie du détecteur, toute source de bruit la faisant varier aura un impact sur sa sensibilité. C'est en particulier le cas du bruit de grenaille, lié à la nature quantique de la lumière (le nombre de photons détectés en sortie de l'interféromètre, et donc la puissance mesurée, fluctuent). Comme c'est un processus gouverné par la statistique de Poisson, le calcul montre que la sensibilité de l'interféromètre s'améliore comme la racine carrée de la puissance du laser incidente sur la lame séparatrice. Et qu'elle est maximale lorsque le détecteur est réglé sur la « frange noire » – c'est-à-dire que les deux faisceaux recombinés interagissent de manière destructive en l'absence d'OG.

Nous disposons maintenant de tous les éléments pour comprendre les améliorations apportées à la configuration des instruments LIGO et Virgo par rapport à un interféromètre de Michelson simple. Tout d'abord, nous avons vu plus haut que les bras doivent être le plus long possible : ils font trois kilomètres pour Virgo, quatre

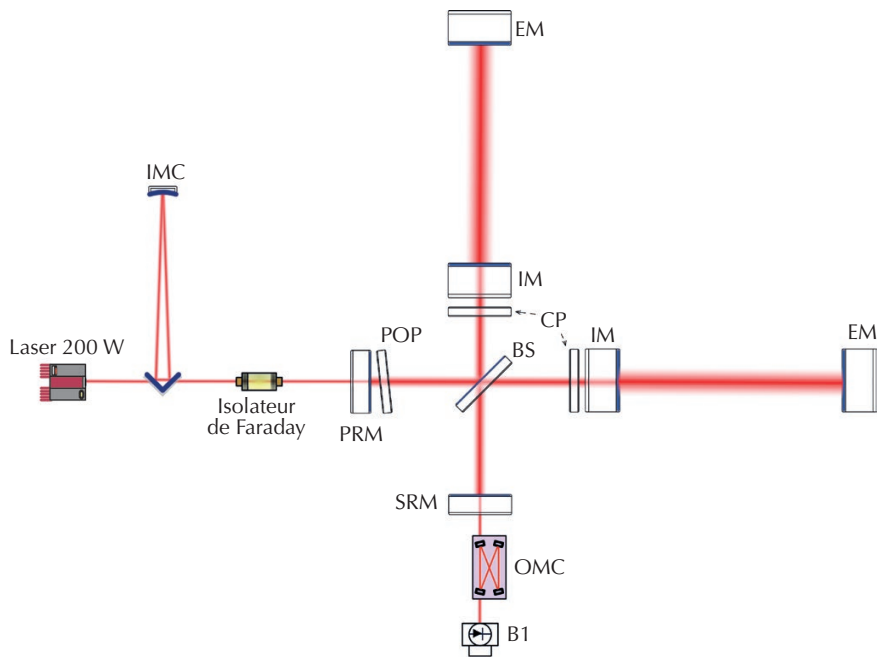


© I. Pye/LIGO.



**2. Schéma d'un interféromètre de Michelson réglé sur la frange noire.** Un faisceau laser (produit par le cylindre blanc) est divisé en deux par une lame séparatrice inclinée à 45 degrés. Chaque faisceau se propage dans un bras de l'instrument, est réfléchi par un miroir (noir) avant de se recombiner avec l'autre faisceau sur la lame séparatrice. La puissance lumineuse résultant de ces interférences est détectée en sortie du détecteur (par le disque le plus à droite). La frange noire correspond à des interférences destructives entre les deux faisceaux.

© The Virgo Collaboration.



**3. Configuration optique finale du détecteur Virgo avancé.** Dans cette vue d'artiste, le détecteur n'est pas représenté à l'échelle, tandis que l'épaisseur du trait rouge reflète la puissance du faisceau laser circulant à cet endroit.

- BS : lame séparatrice.
- IM et EM : miroirs d'entrée et de fond des cavités Fabry-Perot, longues de 3 km.
- PRM : miroir de recyclage de puissance.
- SRM : miroir de recyclage du signal.
- IMC : *Input Mode Cleaner*, cavité triangulaire de 144 m de long dont la fonction est de mettre en forme spatialement le faisceau pour ne laisser entrer dans l'interféromètre que le mode fondamental du laser.
- OMC : *Output Mode Cleaner*, un dispositif chargé de nettoyer spatialement le faisceau en sortie de l'interféromètre et en amont du banc de détection.
- B1 : banc de détection.
- POP : *Pick-Off-Plate*, un dispositif permettant de récupérer une petite partie du faisceau stocké dans l'interféromètre, afin d'obtenir des informations sur sa configuration.
- CP : *Compensating Plate*; la puissance lumineuse incidente sur les miroirs de Virgo est tellement importante que leurs surfaces se déforment; pour compenser cet effet et maintenir leur courbure nominale, on chauffe des plaques situées derrière eux.

Le cylindre jaune entre l'IMC et le miroir de recyclage de puissance est un isolateur de Faraday qui ne laisse passer la lumière laser que dans un seul sens : de l'IMC vers le laser.



pour LIGO. Un miroir supplémentaire, partiellement réfléchissant (IM), est installé à l'entrée de chaque bras, juste après la lame séparatrice (BS), pour former une cavité Fabry-Perot avec le miroir de fond (EM). La lumière laser y est stockée, ce qui revient à dire que le faisceau laser effectue de nombreux allers-retours dans la cavité. La longueur effective des bras est ainsi augmentée d'un facteur important – presque 300 pour le détecteur de deuxième génération Virgo avancé, décrit plus en détails dans la suite et schématisé dans la figure 3.

Les miroirs de Virgo et LIGO sont parmi les meilleurs au monde. Leur substrat en silice amorphe, lisse et sans défaut, est recouvert d'un revêtement multicouche (réalisé par le Laboratoire des Matériaux Avancés de Villeurbanne, CNRS) qui assure des pertes minimales (quelques parties par million) et offre aux miroirs de fond des bras une réflectivité record, très proche de 100%. La lumière présente dans l'interféromètre (réglé sur la frange noire) est donc réfléchi en totalité vers la source laser. Cette situation est exploitée en rajoutant un miroir (PRM) entre la source et la lame séparatrice; celui-ci « recycle » la lumière et la stocke dans le détecteur, ce qui revient à augmenter d'un facteur 50 la puissance effective du laser.

Le laser fournit une puissance continue de plusieurs dizaines de watts; il est ultra-stable en fréquence, en puissance et en direction. Son faisceau gaussien est également purifié spatialement par l'IMC, afin que seul son mode fondamental entre dans l'interféromètre. L'ensemble de ces performances est obtenu grâce à un système d'injection complexe, situé en amont du miroir de recyclage de puissance (PRM). Enfin, les faisceaux laser circulent sous ultravide (pression résiduelle de l'ordre du milliardième de milliardième d'atmosphère). Le tube qui les contient fait un peu plus d'un mètre de diamètre: LIGO et Virgo ont donc les plus grandes enceintes sous ultravide au monde.

Les données fournies par un interféromètre contiennent essentiellement du bruit. Celui-ci provient de sources très variées, qui sont chacune active dans une bande de fréquences donnée.

- À basse fréquence (quelques Hz), c'est le bruit sismique qui domine: micro-séismes, activités anthropiques, etc. Pour s'en affranchir, les miroirs de LIGO et

Virgo sont accrochés à des suspensions complexes – par exemple, les « super-atténuateurs » de Virgo mesurent près de sept mètres de long, pour un poids d'une tonne. Chaque étage de ces suspensions est l'équivalent d'un pendule simple qui filtre les vibrations au-dessus de sa fréquence de résonance, choisie la plus basse possible. Toujours pour Virgo, l'atténuation totale du bruit sismique au niveau des miroirs dépasse 14 ordres de grandeur à 10 Hz, rendant ce bruit négligeable à partir de cette fréquence.

- À haute fréquence (plusieurs centaines de Hz), le bruit dominant est le bruit de grenaille du laser dont nous avons déjà parlé, augmenté de l'effet de filtrage des cavités Fabry-Perot (l'appareillage est moins sensible aux phénomènes qui évoluent plus rapidement que le temps de stockage de la lumière dans les bras kilométriques).
- C'est aux fréquences intermédiaires que la sensibilité est la meilleure. Elle est limitée par les bruits thermiques, causés par l'excitation à température ambiante des molécules des substrats des miroirs, de leurs revêtements multicouche et de leurs suspensions.

Virgo et LIGO sont bien entendu soumis à de nombreuses autres sources de bruits, certaines « fondamentales » comme celles que nous venons de voir (c'est-à-dire qu'il est impossible de s'en affranchir : la conception du détecteur permet simplement de les minimiser), d'autres d'origine instrumentale (par exemple les vibrations d'un moteur d'une pompe à vide) et que l'on cherche à éliminer une fois leur cause identifiée.

À mesure que les détecteurs s'améliorent, des bruits qui dominaient la sensibilité se retrouvent atténués, laissant la place à d'autres qui deviennent limitants. On peut citer dans cette catégorie la fluctuation de la pression de radiation, un autre bruit fondamental d'origine quantique, important à basse fréquence et causé par les fluctuations du nombre de photons incidents sur les miroirs. Ce bruit a un comportement opposé par rapport au bruit de grenaille : il augmente comme la racine carrée de la puissance du laser. La puissance utilisée dans les détecteurs actuels est donc un compromis entre ces deux effets antagonistes. Pour dépasser à terme cette limite quantique, des recherches basées sur des méthodes d'optique quantique

(utilisation d'états comprimés de la lumière, *squeezing* en anglais) sont en cours.

Un dernier impératif à mentionner est que ces détecteurs doivent être maintenus en permanence à leur point de fonctionnement pour être sensibles aux OG. Ce point de fonctionnement (cavités optiques résonantes et interféromètre de Michelson réglé sur la frange noire) est d'autant plus « étroit » que l'instrument est performant. Cela demande de contrôler avec une très bonne précision les positions et orientations des différents miroirs les uns par rapport aux autres : au niveau du picomètre, voire du femtomètre, pour les longueurs des cavités, et à quelques nanoradians près pour les désalignements. Pour atteindre cet objectif, des informations sur l'état du détecteur sont recueillies en permanence. Elles permettent de comparer la configuration actuelle de l'interféromètre à son point de fonctionnement optimal. On calcule alors des corrections qui sont appliquées aux positions des différents miroirs *via* leurs suspensions.

Si cette stratégie marche bien lorsque l'instrument est déjà proche de son point de fonctionnement, elle est inopérante lorsqu'il s'agit de partir d'une configuration où tout ou partie du détecteur est non contrôlé. Cette situation peut se produire pour de multiples raisons : une perte du contrôle de l'interféromètre due à un problème sur un composant ou à une augmentation du niveau d'un bruit (par exemple un tremblement de terre, y compris de faible magnitude), une période de maintenance ou de test, etc. Dans ce cas, il faut employer d'autres méthodes pour amener progressivement l'instrument dans une configuration où la stratégie décrite plus haut peut prendre le relais.

Enfin, sur chaque site, des milliers de capteurs (photodiodes, caméras, accéléromètres, sondes magnétiques, micros, etc.) surveillent l'instrument et son environnement. Il s'agit de détecter les perturbations qui pourraient nuire à la qualité des données et d'identifier les périodes pendant lesquelles celles-ci ne doivent pas être analysées car elles contiennent trop de bruit. Cette surveillance est un élément clef du processus qui permet d'aboutir à la détection d'une OG : sans elle, la quantité de « faux signaux » serait si importante qu'identifier une vraie OG reviendrait à chercher une aiguille dans une meule de foin.

## Un réseau mondial de détecteurs

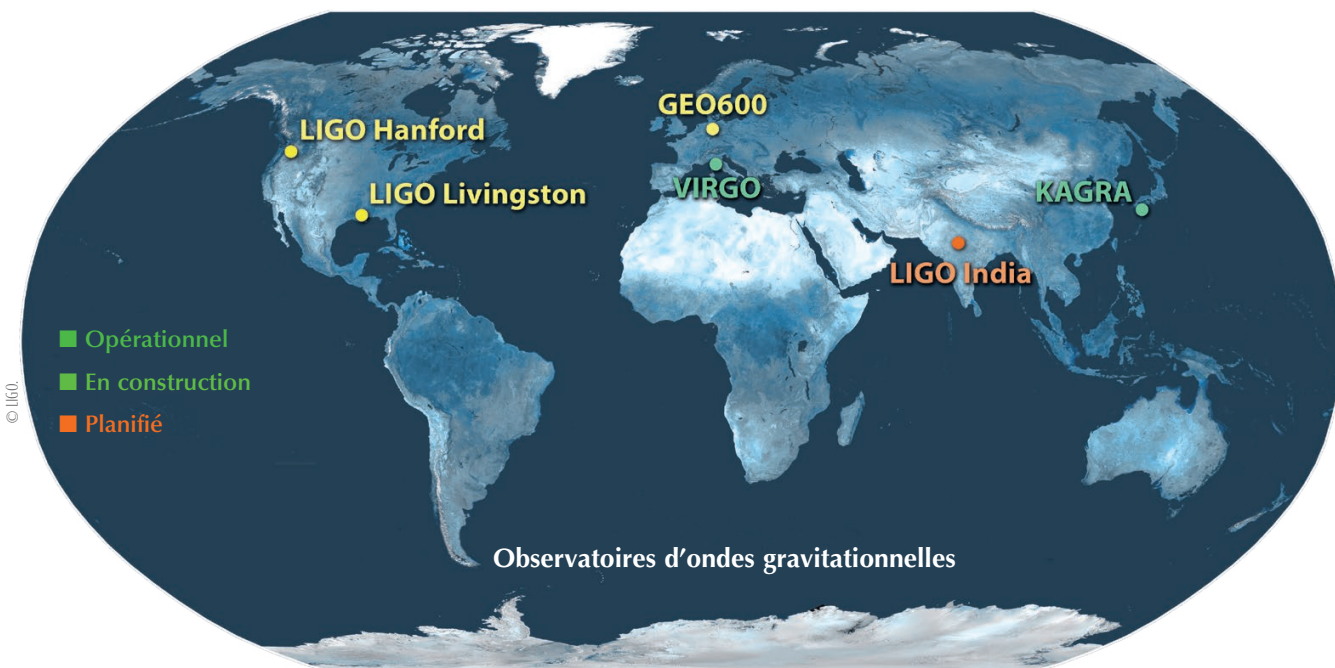
LIGO et Virgo sont des projets à long terme qui ont été lancés dans les années 1990, une vingtaine d'années après les premières études sur la possibilité d'utiliser des interféromètres pour chercher les OG. Après avoir été approuvés et financés (respectivement par la NSF américaine et par le CNRS et l'INFN italien), les trois détecteurs ont été construits au tournant des années 2000 (voir les photos p. 15). Ils ont mené plusieurs campagnes de prises de données entre 2005 et 2011 et ont atteint leurs sensibilités nominales, sans toutefois détecter d'OG. Des programmes d'amélioration d'une durée de plusieurs années ont donc été lancés, avec pour objectif de gagner un facteur 10 en sensibilité et donc d'observer un volume d'Univers 1000 fois plus important.

Les principales différences entre les détecteurs Virgo et Virgo avancé sont résumées ci-dessous.

- Augmentation de la puissance du laser (200 W à terme).
- Ajout du miroir de recyclage du signal (SRM, fig. 3), pour pouvoir optimiser la sensibilité dans une gamme de fréquences donnée.
- Miroirs deux fois plus massifs pour diminuer leur bruit thermique.
- Suspensions monolithiques en silice amorphe (au lieu de fils d'acier) pour les miroirs, également pour réduire leur contribution au bruit thermique.
- Augmentation de la taille du faisceau laser (6 cm de diamètre) sur les miroirs de fond des cavités Fabry-Perot, afin de diminuer les effets thermiques sur leur substrat.
- Amélioration de la capacité de pompage, avec l'ajout de pièges cryogéniques aux extrémités des bras kilométriques. Ceux-ci adsorbent les molécules de gaz résiduelles qui vont se coller sur les parois.
- L'ensemble de l'instrumentation – dont les différents bancs optiques – est suspendu et sous vide.

Les détecteurs LIGO avancés ont été les premiers à entrer en service : ils ont pris des données entre septembre 2015 et janvier 2016, et ont commencé leur seconde campagne de mesures fin novembre 2016. Virgo avancé est actuellement en phase de démarrage ; l'objectif est de rejoindre LIGO au printemps 2017 pour une première campagne de prise de données commune.





**4. Le réseau mondial de détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles en février 2016.** En jaune, les instruments en fonctionnement : les deux détecteurs LIGO avancés et GEO600, un interféromètre situé en Allemagne dont les bras font 600 m et qui sert de plateforme R&D à la collaboration LIGO. En vert, les instruments en cours de démarrage ou en construction : Virgo avancé en Italie et KAGRA (un détecteur cryogénique et souterrain) au Japon. En orange, le projet de troisième interféromètre LIGO qui serait installé en Inde.

>>>

Depuis 2007, Virgo et LIGO sont liés par des accords de collaboration qui sont venus formaliser une longue tradition d'échanges scientifiques, tant au niveau de l'instrumentation que de l'analyse des données. En effet, les interféromètres sont sensibles aux mêmes OG ; il est donc bien plus intéressant de mettre en commun toutes les données recueillies et de les analyser de manière conjointe. En premier lieu, la détection d'une OG transitoire (fusion de deux astres compacts, supernova de type II, etc.) demande au moins deux instruments pour s'assurer que le signal observé n'est pas une fluctuation de bruit. De plus, trois détecteurs au minimum sont nécessaires pour reconstruire par triangulation la position de la source dans le ciel : comme les OG se propagent à la vitesse de la lumière (très grande mais finie), elles arrivent légèrement décalées (jusqu'à une trentaine de ms entre Virgo et LIGO Hanford par exemple) dans les différents interféromètres. Le réseau mondial de détecteurs pourrait compter à terme jusqu'à cinq instruments (fig. 4) : les deux interféromètres LIGO construits aux États-Unis, Virgo, un détecteur japonais qui doit entrer en service avant la fin de la décennie (KAGRA), suivi peut-être

quelques années plus tard par un troisième instrument LIGO, installé en Inde.

Les OG ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers, qui vient compléter les moyens d'observation actuels : l'ensemble du spectre électromagnétique, les rayons cosmiques et les neutrinos. Des accords ont donc été passés avec plus de 70 collaborations qui reçoivent des alertes (de l'ordre de une par mois en moyenne) quand il y a une forte suspicion de détection d'une OG. Les télescopes ont accès aux coordonnées de la région du ciel où devrait se trouver la source et peuvent ainsi y chercher une contrepartie au signal gravitationnel. L'observation par exemple d'une supernova galactique de type II (issue de l'effondrement d'une étoile massive) en optique, en neutrinos et en OG serait une découverte sensationnelle !

La clef du succès de ce type de recherche est la rapidité de réaction, car la source peut n'être visible que pendant une très courte période (quelques jours, voire quelques heures). C'est pour cela que LIGO et Virgo ont développé un système d'analyse en temps réel des données enregistrées. Réciproquement, les recherches ciblées de contrepartie OG pour un événement détecté par ailleurs

(par exemple un sursaut gamma) sont une autre voie prometteuse. L'heure à laquelle le phénomène a été observé et la position de la source dans le ciel sont deux informations supplémentaires qui permettent de gagner en sensibilité.

### Les premières détections directes des ondes gravitationnelles

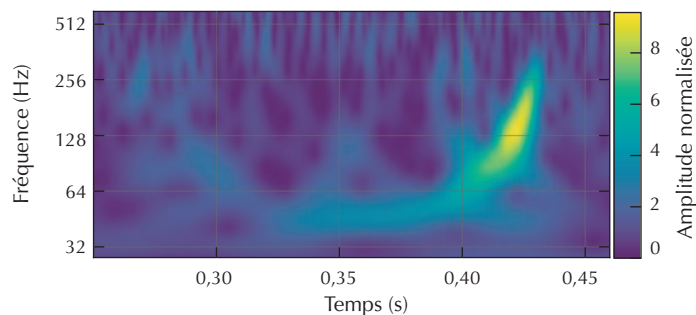
Entre mi-septembre 2015 et mi-janvier 2016, les deux détecteurs LIGO avancés ont accumulé un peu plus de 51 jours de données en coïncidence, dont environ 49 ont été conservés pour analyse après application des critères de sélection visant à garantir la bonne qualité des données. Deux signaux de fusion (ou coalescence) d'un système binaire de trous noirs y ont été observés :

- GW150914, enregistré le 14 septembre 2015 et annoncé le 11 février 2016 (fig. 5),
  - GW151226, enregistré le 26 décembre 2015 et annoncé le 15 juin 2016,
- tandis qu'un troisième candidat du même type (« LVT151012 », enregistré le 12 octobre 2015) a été mis en évidence, mais avec une signification statistique trop faible pour qu'on puisse parler de détection dans son cas. D'autres sources recherchées

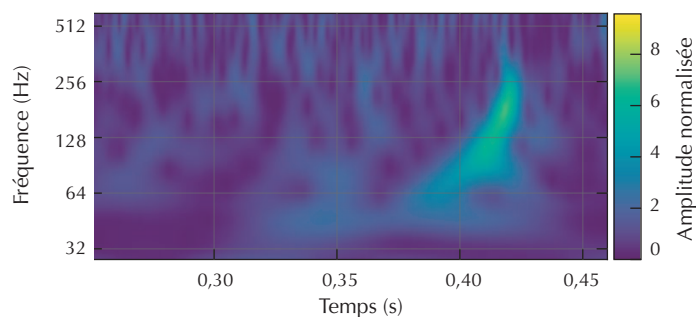
(comme les coalescences étoile à neutrons-trou noir ou de systèmes binaires d'étoiles à neutrons) n'ont pas été observées, ce qui a permis de mettre des limites supérieures sur le taux d'occurrence de ces événements dans l'Univers. Certaines analyses, comme la recherche de signaux continus émis par des pulsars qui ne seraient pas parfaitement sphériques, sont encore en cours.

Deux méthodes principales ont été utilisées pour chercher des signaux d'OG transitoires, d'une durée allant de quelques millisecondes à plusieurs secondes. La première ne fait aucune hypothèse sur la forme d'onde cherchée. Elle utilise les cartes temps-fréquence construites à partir des données enregistrées, y sélectionne des excès par rapport au niveau de bruit attendu et retient ceux qui sont cohérents entre les deux détecteurs. Un algorithme de ce type a identifié l'événement GW150914 (d'une durée d'environ trois dixièmes de seconde) comme prometteur trois minutes à peine après l'acquisition des données.

La seconde méthode suppose connu le signal d'OG : c'est le filtrage adapté. Elle s'applique parfaitement au cas des coalescences de systèmes binaires d'astres compacts grâce aux progrès théoriques enregistrés depuis les années 1990 (voir l'article de L. Blanchet, pp. 6-12). Elle consiste à corrélérer ce signal, appelé « calque », aux données et à identifier des périodes où la corrélation mesurée est importante. Là où les choses se compliquent, c'est que cet algorithme n'est efficace que si le calque et le vrai signal sont très ressemblants. Or, l'OG produite lors d'une coalescence particulière dépend des paramètres du système (inconnus *a priori*), notamment des masses et des moments angulaires des deux astres compacts. Il s'agit donc en pratique de balayer un espace des paramètres multidimensionnel qui contient toutes les configurations de systèmes binaires recherchés par Virgo et LIGO. Ce sont ainsi plus de 200 000 calques qui ont été utilisés en parallèle pour la recherche de fusions trou noir-trou noir. Leur nombre est un compromis entre la volonté de couvrir au mieux l'espace des paramètres dans son ensemble et les ressources informatiques, forcément limitées, disponibles pour mener à bien cette analyse. Cette méthode a également détecté le signal GW150914, lequel a donc été identifié par deux analyses complètement indépendantes, ce qui renforce son statut de découverte.

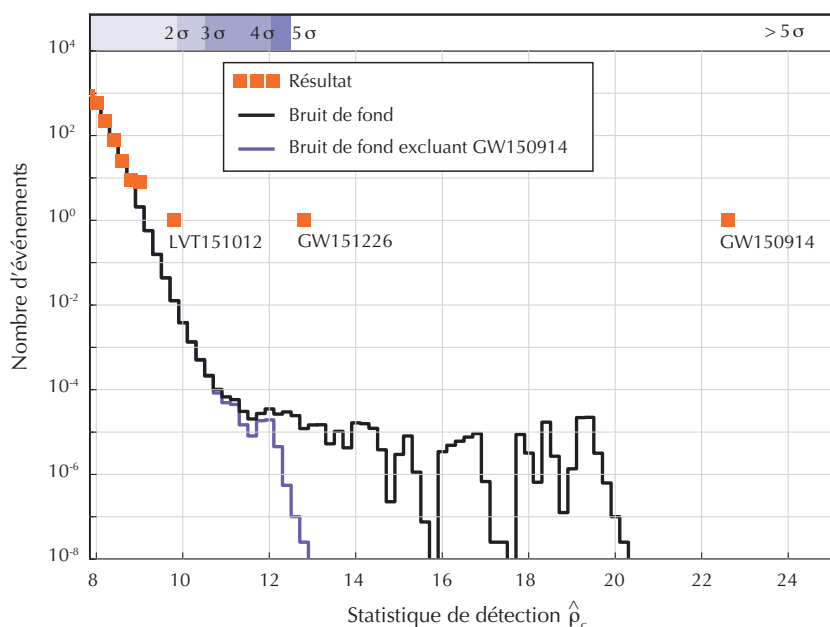


a)



b)

**5. Diagrammes temps-fréquence montrant le signal GW150914 observé dans les détecteurs LIGO avancés de Hanford (a) et Livingston (b).** Dans ces cartes, plus la couleur imprimée est chaude (du bleu foncé au jaune) et plus l'énergie de la bande de fréquence correspondante, mesurée à un instant donné, est importante. On observe dans les deux cas une augmentation de la fréquence et de l'amplitude du signal au cours du temps, une évolution caractéristique de la fusion de deux astres compacts.



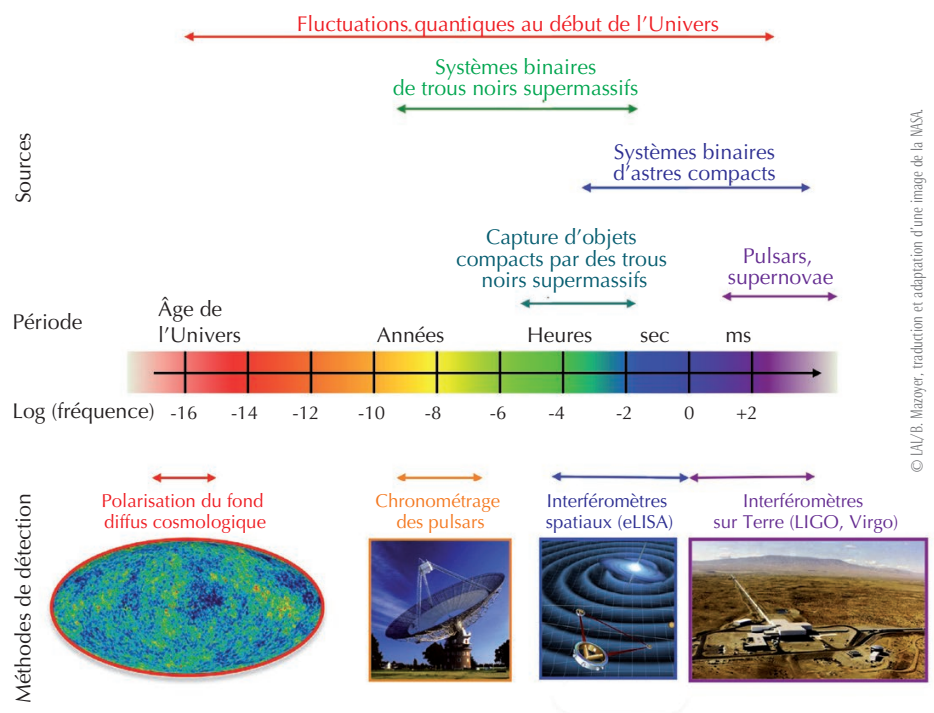
**6. Résultats de l'analyse des données des détecteurs LIGO avancés par une méthode de recherche d'OG utilisant le filtrage adapté.** En abscisse, on a la statistique de détection utilisée pour ordonner les candidats OG sélectionnés dans les données et dont la distribution est indiquée par les carrés orange. Les histogrammes en trait plein montrent la distribution de la statistique de détection en l'absence d'OG, calculée de deux manières différentes – selon que l'on prend en compte (histogramme noir) ou pas (histogramme violet) le très fort signal GW150914 pour estimer le bruit de fond. Les événements GW150914, GW151226 et LVT151012 sont bien visibles : les trois carrés orange de droite à gauche.



Chaque algorithme fournit une liste de candidats OG potentiels, classés par « statistique de détection » croissante : il s'agit d'un nombre d'autant plus élevé que le signal ressort nettement du bruit de mesure. La statistique de détection est propre à une analyse donnée ; elle inclut toutes les informations disponibles sur les candidats : force du signal dans les différents détecteurs, cohérence entre ces signaux, ressemblance avec le calque sélectionné dans le cadre du filtrage adapté, etc. C'est cette quantité qui est utilisée pour calculer la signification statistique du candidat et donc décider finalement s'il s'agit ou pas d'une OG. Pour cela, une fois écartée la possibilité que le signal observé soit dû à un problème instrumental ou à l'interaction de l'environnement avec les détecteurs, on utilise les données enregistrées pour estimer la distribution de la statistique de détection en l'absence d'OG.

Au final, et pour reprendre un vocabulaire utilisé en physique des hautes énergies pour estimer le niveau de confiance d'un résultat, la probabilité que GW150914 soit une OG dépasse les « cinq sigmas », le seuil communément admis pour une détection (environ une chance sur 3,5 millions de se tromper). Idem pour GW151226. En revanche, le troisième candidat identifié, LVT151012, n'a pas une signification statistique suffisante pour pouvoir prétendre au titre de détection (fig. 6).

Des méthodes statistiques bayésiennes exploitant la relation entre formes d'onde et paramètres des systèmes binaires compacts ont permis de mesurer certaines des caractéristiques des astres progéniteurs (et finaux) des événements GW150914 et GW151226. Il s'agit des premières détections directes de trous noirs, des premières détections de systèmes binaires de trous noirs et des premières détections tout court de trous noirs dans cette gamme de masses. GW150914 est également l'événement le plus puissant jamais observé dans l'Univers, puisque l'équivalent de trois masses solaires ont été converties en OG au moment de la fusion. Les données recueillies permettent aussi de valider la relativité générale dans un régime de champ fort, jusque-là inaccessible à l'expérience. Avec seulement deux événements confirmés, il est encore difficile d'estimer avec précision le taux des coalescences de systèmes binaires de trous noirs. Mais au minimum on devrait en observer



**7. Le spectre des ondes gravitationnelles.** Il existe de très nombreuses sources attendues d'OG. Différents types de détecteurs ou de méthodes de détection doivent être utilisés selon la bande de fréquence du signal recherché. Les détecteurs interférométriques comme Virgo et LIGO sont des instruments à large bande, sensibles entre quelques dizaines de Hz et 10 kHz.

d'autres lors des prochaines prises de données LIGO-Virgo.

## Perspectives

Les événements GW150914 et GW151226 ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers. L'astronomie des OG devrait se développer dans les prochaines années, avec des interféromètres terrestres plus sensibles et plus nombreux ainsi que d'autres méthodes de détection (fig. 7). On peut citer notamment le chronométrage de pulsars millisecondes effectué par des réseaux de radiotélescopes (dont celui de Nançay en France) ou le projet d'interféromètre spatial eLISA, prévu pour la fin de la prochaine décennie et dont la mission de démonstration LISA Pathfinder, lancée en décembre 2015, a obtenu des résultats très prometteurs. À suivre ! ■

L'auteur souhaite remercier Fabien Cavalier pour ses conseils et ses relectures du présent article.

## Pour en savoir plus

- Site internet public et en français de l'expérience Virgo : <http://public.virgo-gw.eu/language/fr>
- Site internet des détecteurs LIGO (en anglais) : [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu)
- Site internet de la collaboration scientifique LIGO (en anglais) : [www.ligo.org](http://www.ligo.org)
- Compilation de ressources pédagogiques à destination des enseignants et de leurs élèves : <http://public.virgo-gw.eu/ressources-pedagogiques>
- Communiqué de presse du CNRS pour la première détection (GW150914) : [www2.cnrs.fr/presse/communiqu/4409.htm](http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/4409.htm)
- Communiqué de presse du CNRS pour le deuxième événement (GW151226) : [www.in2p3.fr/recherche/actualites/2016/cp\\_ondes\\_gravitationnelles\\_juin.html](http://www.in2p3.fr/recherche/actualites/2016/cp_ondes_gravitationnelles_juin.html)
- Communiqué de presse du CNRS sur le satellite LISA Pathfinder : [www2.cnrs.fr/presse/communiqu/4575.htm](http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/4575.htm)
- Site internet de l'European Pulsar Timing Array : [www.epta.eu.org](http://www.epta.eu.org) (en anglais).