

GWTC-1 : UN NOUVEAU CATALOGUE DE DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

Les collaborations [LIGO](#) et [Virgo](#) présentent un nouveau catalogue de sources d'[ondes gravitationnelles](#) découvertes durant les première et deuxième périodes de prises de données du réseau global de détecteurs d'ondes gravitationnelles de deuxième génération (Advanced LIGO et Advanced Virgo). Ce catalogue est référencé comme GWTC-1 pour « Gravitational-Wave Transient Catalog 1 », ou « Catalogue 1 de signaux transitoires d'ondes gravitationnelles ».

Ce catalogue inclut quatre nouvelles fusions de systèmes binaires de [trous noirs](#) qui n'avaient pas été publiées auparavant, dont une nouvelle « détection triple » (c'est-à-dire un signal observé conjointement par les deux détecteurs LIGO et par le détecteur Virgo) le 18 août 2017. Pour cet événement, la position dans le ciel du système binaire de trous noirs, situé à environ 2,5 milliards d'[années-lumière](#) de la Terre, a été déterminée avec une précision de 39 degrés carrés – soit mieux que pour toutes les autres fusions de trous noirs observées à ce jour.

Pour cette publication, les mesures des propriétés des sources des onze détections d'ondes gravitationnelles confirmées (dix systèmes binaires de trous noirs et un système binaire d'[étoiles à neutrons](#)) ont été améliorées. Une liste de « candidats marginaux » (des événements pour lesquels la présence d'une onde gravitationnelle n'est pas établie avec suffisamment de certitude pour qu'ils soient considérés comme des détections) est publiée, ainsi qu'une estimation améliorée du taux auquel les systèmes binaires de trous noirs et d'étoiles à neutrons fusionnent dans l'Univers. Une limite supérieure sur le taux de fusion des systèmes binaires mixtes trou noir et étoile à neutrons est également donnée.

LES DEUX PREMIÈRES PÉRIODES DE PRISES DE DONNÉES DES DÉTECTEURS DE DEUXIÈME GÉNÉRATION ADVANCED LIGO ET ADVANCED VIRGO

Les trois dernières années ont vu se dérouler les deux premières prises de données du réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles (OG) de deuxième génération, formé des détecteurs [Advanced LIGO](#) et [Advanced Virgo](#). LIGO a pris des données du 12 septembre 2015 au 19 janvier 2016 (période « O1 »), puis du 30 novembre 2016 au 25 août 2017 (période « O2 »). Au cours de O2, Virgo a rejoint LIGO le 1^{er} août 2017 pour une prise de données commune de trois semaines et demie.

Les principaux faits marquants de O1 et O2 sont :

- [GW150914](#) : la première détection d'OG, émise lors de la fusion de deux trous noirs situés à plus d'un milliards d'années-lumière et détectée le 14 septembre 2015.
- [GW170814](#) : le premier signal d'OG (à nouveau la fusion d'un système binaire de trous noirs, BTN dans la suite) détecté par le réseau de trois détecteurs, enregistré le 14 août 2017.
- [GW170817](#) : la première OG jamais détectée en provenance d'un système binaire d'étoiles à neutrons (BEN) et aussi le premier événement observé

simultanément en OG et dans l'ensemble du spectre électromagnétique par des dizaines de télescopes.

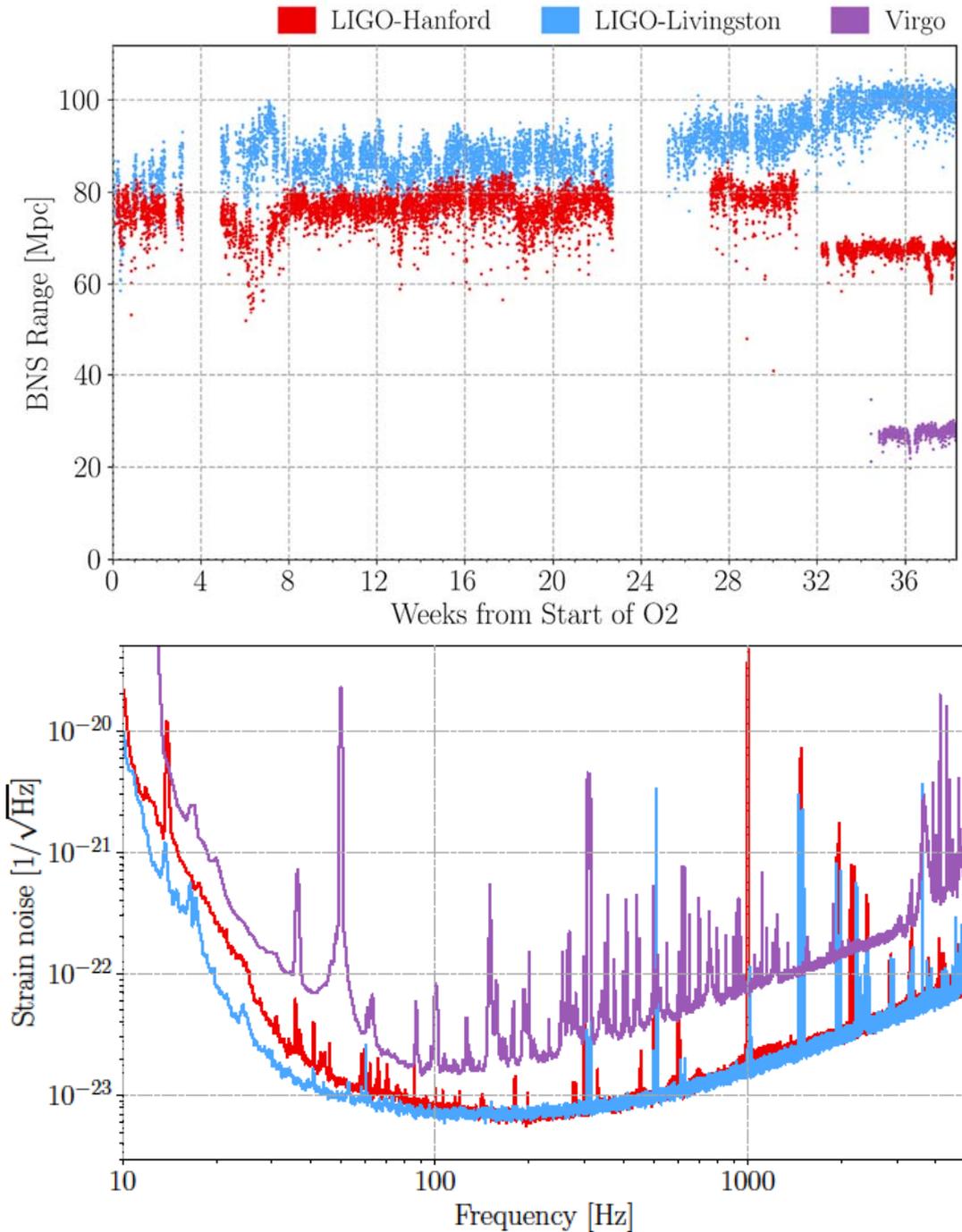


Figure 1 (adaptée de la figure 1 de [la publication scientifique](#)) : le graphique du haut montre la variation de la « portée en BEN » des détecteurs LIGO et Virgo pendant O2. L'interruption au niveau de la troisième semaine correspond aux fêtes de fin d'année 2016. Un autre arrêt a eu lieu pendant la semaine 23 pour améliorer la sensibilité des détecteurs. L'impact d'un tremblement de terre qui a eu lieu dans le Montana est visible pour LIGO-Hanford à partir de la semaine 31. Virgo a rejoint la prise de données au cours de la semaine 34. Le graphique du bas compare les

sensibilités de chaque détecteur, mesurée par la variation du bruit de mesure en fonction de la fréquence. Ces courbes montrent les meilleures performances de chaque détecteur.

Entre O1 et O2, la sensibilité des deux instruments LIGO a été améliorée. Pour le détecteur LIGO situé à Livingston en Louisiane (« LLO ») ce processus s'est poursuivi pendant O2. Le résultat de ce processus a été une amélioration très significative de la « portée en BEN »¹ de LLO : environ 60 Mpc (1 Mpc = un million de [parsecs](#)) pendant O1, puis 80 Mpc au début de O2 et plus de 100 Mpc à la fin de la période de prise de données. La portée en BEN du détecteur LIGO situé à Hanford dans l'état de Washington (« LHO ») était d'environ 80 Mpc à la fin de O1 et a augmenté d'environ 20% en moyenne pendant O2.

Le détecteur Advanced Virgo est le résultat d'un programme d'amélioration du détecteur Virgo de première génération, lequel a cessé de prendre des données en 2011. Les améliorations principales apportées à l'instrument incluent un nouveau schéma optique (un faisceau laser plus gros, de meilleures [cavités Fabry-Perot](#) dans les bras kilométriques du détecteur), des miroirs d'une qualité encore améliorée ainsi que des bancs optiques maintenant suspendus et sous vide. La portée en BEN de Virgo pendant O2 était d'environ 25 Mpc.

La figure 1 montre l'évolution de la portée en BEN des trois instruments ainsi que leur meilleure sensibilité atteinte pendant O2. Les détecteurs LIGO considérés séparément ont pris des données en moyenne 60% du temps, avec des coïncidences (fonctionnement simultané des deux observatoires) environ 45% du temps. Une fois retirées les périodes pendant lesquelles les détecteurs ne fonctionnaient pas de manière satisfaisante, 118 jours de données en coïncidence sont disponibles, dont quinze également en coïncidence avec Virgo qui, de son côté, a pris des données environ 80% du temps.

Les recherches de signaux d'ondes gravitationnelles produites par la fusion de systèmes binaires d'astres compacts ont été menées par deux algorithmes indépendants, appelés « PyCBC » et « GstLAL ». Tous deux comparent les données enregistrées aux signaux théoriques prédits par la [relativité générale](#) en utilisant une méthode appelée « [filtrage optimal](#) ». De plus, un troisième algorithme, « cWB », qui ne suppose pas connue a priori la forme d'onde du signal, a également été utilisé.

Les améliorations apportées à ces algorithmes et leur application à une gamme plus large de sources astrophysiques expliquent pourquoi les données enregistrées pendant la période O1 ont été ré-analysées. De même, l'application d'une procédure de « nettoyage » des données qui a permis de soustraire une partie du bruit de mesure et d'améliorer la sensibilité des instruments a motivé une ré-analyse des données enregistrées pendant O2.

¹ « BNS range » en anglais : un indicateur des performances d'un détecteur d'ondes gravitationnelles donné, correspondant, sous certaines hypothèses, à la distance moyenne jusqu'à laquelle on peut détecter la fusion d'un système binaire d'étoiles à neutrons. L'unité utilisée pour cet estimateur est le million de parsecs (Mpc), un parsec valant environ 3,26 années-lumière.

Chaque recherche produit une liste d'événements « candidats » qui sont classés par ordre décroissant en fonction de la force du signal mesurée, rapportée au niveau du bruit de mesure du détecteur – une quantité appelée de manière générique [rapport signal-sur-bruit](#) – en abrégé rapport S/B en français et « SNR » en anglais. Leur [signification statistique](#) est mesurée par le [taux de fausses alarmes](#) associé (acronyme « FAR », pour « False Alarm Rate » en anglais), c'est-à-dire le taux auquel on peut s'attendre à ce qu'un candidat similaire soit observé par hasard, à partir des fluctuations du bruit de mesure qui peuvent parfois ressembler à un vrai signal d'ondes gravitationnelles.

En définissant un seuil maximal pour les FAR à 1 / 30 jours (soit environ 12,2 / an) pour au moins un des deux algorithmes basés sur le filtrage adapté, on réduit de manière drastique la liste des signaux candidats en éliminant ceux qui sont très probablement des artefacts dus aux fluctuations du bruit. Parmi les candidats restants, onze ont une probabilité supérieure à 50%² d'avoir une origine astrophysique et donc de ne pas être du bruit d'origine terrestre. Ces signaux sont identifiés avec le préfixe « GW » (pour « Gravitational Waves », ondes gravitationnelles en anglais), suivi de la date de leur détection notée à l'américaine : par exemple « GW150914 » est un signal qui a été détecté le 14/09/2015. Les autres candidats sont considérés comme des événements « marginaux » dont il est peu probable qu'ils soient d'origine astrophysique.

VIEILLES CONNAISSANCES ET NOUVELLES DÉCOUVERTES

Les trois algorithmes utilisés pour analyser les données LIGO-Virgo ont identifié avec certitude au total onze détections dans les données O1+O2. Sept de ces signaux ont déjà été publiés : les trois BTN de O1 ainsi que trois autres BTN et une BEN de O2. L'une des BTN de O1 était jusqu'à maintenant identifiée comme « LVT151012 » (un candidat LIGO-Virgo détecté le 12 octobre 2015) car lorsque ce résultat avait été publié en 2016 sa signification statistique était trop faible pour qu'il soit considéré comme une onde gravitationnelle confirmée. Cependant, la nouvelle analyse de ces données a démontré que le signal satisfaisait en tout point les critères pour devenir une détection à part entière, ce qui explique pourquoi il a maintenant été promu « GW151012 ».

De plus, quatre nouveaux signaux d'ondes gravitationnelles ont été découverts dans les données O2 : GW170729 (détecté le 29 juillet 2017), GW170809 (9 août 2017), GW170818 (18 août 2017) et GW170823 (23 août 2017), tous issus de la fusion d'un système binaire de trous noirs. GW170818 se distingue parmi ces nouvelles observations. C'est la deuxième BTN observée par LIGO et Virgo après l'événement GW170814.

MESURER LES PROPRIÉTÉ DES SOURCES D'ONDES GRAVITATIONNELLES

Un couple de trous noirs tournant l'un autour de l'autre en suivant des orbites quasi-circulaires est décrit par un ensemble de quinze paramètres physiques. Huit de ces

² En pratique les détections confirmées du catalogue GWTC-1 (les événements dont le nom commence par "GW") ont une probabilité d'être d'origine astrophysique très proche de 1 – et donc bien supérieure au seuil de 50% utilisé pour définir une détection.

paramètres sont des propriétés du système de trous noirs lui-même : il s'agit des masses de ces astres et de leurs « spins » – une quantité reliée au [moment angulaire](#). Les sept autres paramètres déterminent la manière dont la source d'ondes gravitationnelles est observée depuis la Terre. Il s'agit de la position de la source dans le ciel, de sa distance par rapport à nous, de l'inclinaison du [plan orbital du système binaire](#) par rapport à la ligne de visée de la source, de l'angle de [polarisation](#) des ondes gravitationnelles émises par ladite source, de l'instant auquel les deux trous noirs ont fusionné et de la [phase](#) de l'émission d'ondes gravitationnelles à cet instant.

Comme les étoiles à neutrons sont faites de matière, les ondes gravitationnelles produites par des systèmes BEN dépendent également d'un autre paramètre appelé « déformation de marée ». Il rend compte de la déformation de chaque étoile sous l'effet des [forces de marée](#) exercées par l'astre compagnon lors des dernières orbites qui précèdent la fusion. Mesurer ces déformations renseigne sur la structure interne des étoiles à neutrons.

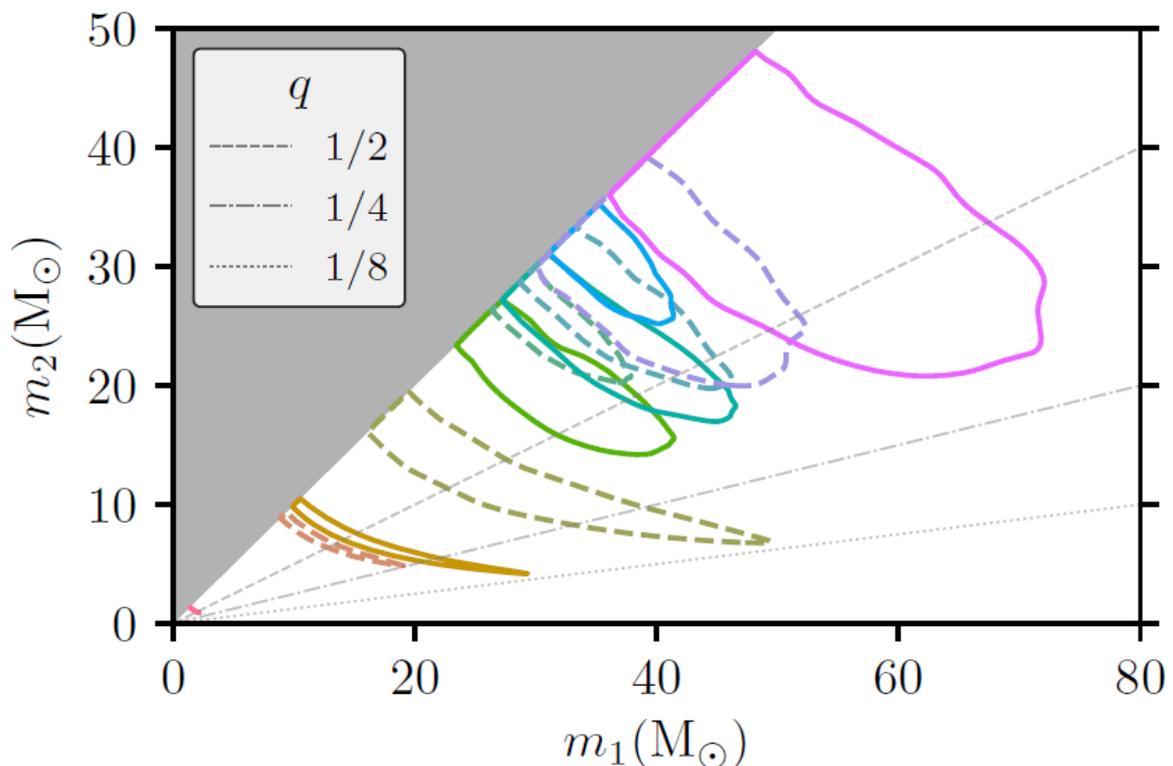


Figure 2 (adaptée de la figure 4 de la [publication scientifique](#)) : les contours montrent, pour chaque signal d'ondes gravitationnelles détecté, la région du plan m_1 - m_2 (m_1 : masse de l'astre le plus lourd du système binaire, m_2 : masse de l'astre le plus léger) qui a 90% de chance de contenir les vraies masses des composants du système binaire observé. Ces masses sont exprimées en multiples de la masse du Soleil. Les contours pour les masses des deux étoiles à neutrons de GW170817 sont à peine visible dans le coin inférieur gauche de ce graphique. Tous les autres événements sont des fusions de trous noirs : leurs masses couvrent un large intervalle, de 5 à 70 fois la masse du Soleil. A cause de la convention $m_1 \geq m_2$, la région du graphique grisée au-dessus de la diagonale est interdite.

La figure 2 montre les mesures des masses des astres de tous les événements OG découverts, estimées à partir des données enregistrées. Pour chaque signal, la surface représentée montre l'intervalle dans lequel la vraie masse à 90% de chances de se trouver – on l'appelle [l'intervalle de masse crédible](#) à 90%. Par convention, la masse la plus élevée est identifiée par l'indice « 1 » pour tous les systèmes binaires.

On peut voir que les masses des trous noirs des systèmes binaires couvrent un intervalle assez large, allant de cinq à soixante-dix fois la [masse du Soleil](#) – cette gamme de masse est compatible avec les prédictions disponibles pour les trous noirs de masse stellaire. Le système binaire de trous noirs le plus lourd est GW170729 tandis que les deux plus légers sont GW151226 et GW170608.

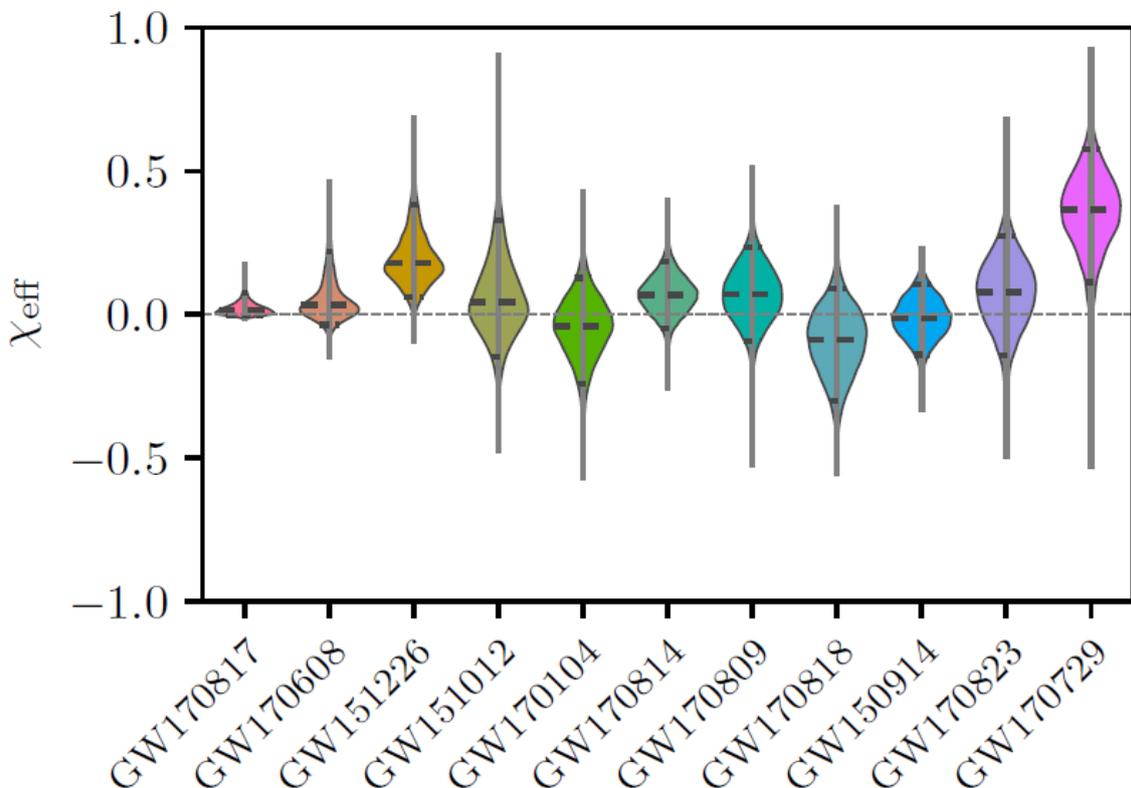


Figure 3 (adaptée de la figure 5 de la [publication scientifique](#)) : Valeurs estimées du spin aligné effectif de chacune des sources d'ondes gravitationnelles détectées – la forme de chaque contour rend compte de l'incertitude de la mesure. Dans la plupart des cas, le spin estimé est centré autour de zéro. La situation est différente pour les événements GW170729 et GW151226 : dans les deux cas, une valeur du spin égale à zéro est exclue avec une probabilité supérieure à 90%.

Le signal d'ondes gravitationnelles émis en amont de la fusion – appelé « [phase spiralante](#) » – dépend principalement d'une combinaison particulière des masses individuelles des composants du système binaire appelée « [chirp mass](#) » en anglais – une traduction en français donnerait « masse du gazouillis ». Ce paramètre est mesuré avec une précision d'autant meilleure que le système binaire a une masse totale faible. D'autres paramètres importants, comme le rapport des masses et le « spin effectif aligné » (une combinaison particulière des spins des deux astres avant qu'ils ne

fusionnent) sont plus difficiles à mesurer car différentes valeurs de ces paramètres peuvent produire des effets similaires sur le signal d'ondes gravitationnelles prédit.

La figure 3 montre par exemple que pour la plupart des événements la distribution du spin aligné effectif est centrée autour de zéro. Au contraire, cette valeur est exclue avec plus de 90% de confiance pour GW170729 et GW151226. Les futures mesures précises des masses et des spins nous permettront de tester de manière plus poussée les différents scénarios possibles pour la formation et l'évolution des systèmes binaires de trous noirs de masse stellaire. Actuellement, la sensibilité des détecteurs n'est pas suffisante pour mesurer les spins individuels des trous noirs.

Parmi les autres quantités importantes à mesurer pour chaque signal d'ondes gravitationnelles on peut citer la masse et le spin de l'astre final créé lors de la fusion, la quantité d'énergie émise sous forme d'OG et la puissance émise au pic du signal. Quelques pourcents de la masse totale du système binaire sont convertis en ondes gravitationnelles et la quantité d'énergie émise (énorme) est d'autant plus grande que le système qui fusionne est lourd. Par exemple, pour GW170729 – la BTN la plus lourde détectée jusqu'à maintenant – l'énergie émise correspond à la conversion d'environ cinq fois la masse du Soleil et la puissance crête mesurée³ dépasse les 4×10^{56} erg/s – soit une « [luminosité](#) » environ 50 fois plus que la lumière émise par l'ensemble des étoiles de l'Univers visible !

L'amplitude d'une OG est inversement proportionnelle à la distance de la source (de manière plus technique, la distance mesurée ici est appelée « [distance de luminosité](#) ») : on peut donc estimer cette distance une fois le signal mesuré. Ces calculs ont encore une incertitude assez élevée, en particulier pour les systèmes binaires les plus lointains, mais il est clair que ces événements se sont produits « il y a bien longtemps dans des galaxies lointaines, très lointaines ».

Parmi les dix BTN du catalogue, six sont à des distances estimées de l'ordre du gigaparsec (1 Gpc = 1 milliard de parsecs) ou plus. La source la plus lointaine (également la plus lourde) est GW170729 : 2,76 Gpc, soit environ 9 milliards d'années-lumière. Tandis que la plus proche est GW170608 : 0,32 Gpc soit environ 1 milliard d'années-lumière. En comparaison, la BEN GW170817 est sur le pas de notre porte (cosmique), à une distance de seulement 0,04 Gpc, soit 130 millions d'années-lumière.

L'IMPORTANCE DU RÉSEAU DE DÉTECTEURS

Lorsqu'une OG atteint la Terre, elle est observée avec des petits délais temporels (de l'ordre de quelques millisecondes) dans les détecteurs du réseau, éloignés de plusieurs milliers de kilomètres. Ces différences de temps d'arrivée ainsi que les variations de l'amplitude du signal mesuré permettent de localiser la zone du ciel d'où provient l'OG. Avec deux instruments, les contraintes obtenues font que cette zone est une partie d'un anneau tracé sur la voûte céleste. L'ajout d'un troisième détecteur améliore grandement la qualité de la localisation de la source : ces informations sont cruciales pour alerter les astronomes qui peuvent observer cette région du ciel avec

³ Un erg correspond à 10^{-7} joule.

des télescopes couvrant l'ensemble du [spectre électromagnétique](#) (la lumière visible et les autres gammes de longueur d'onde).

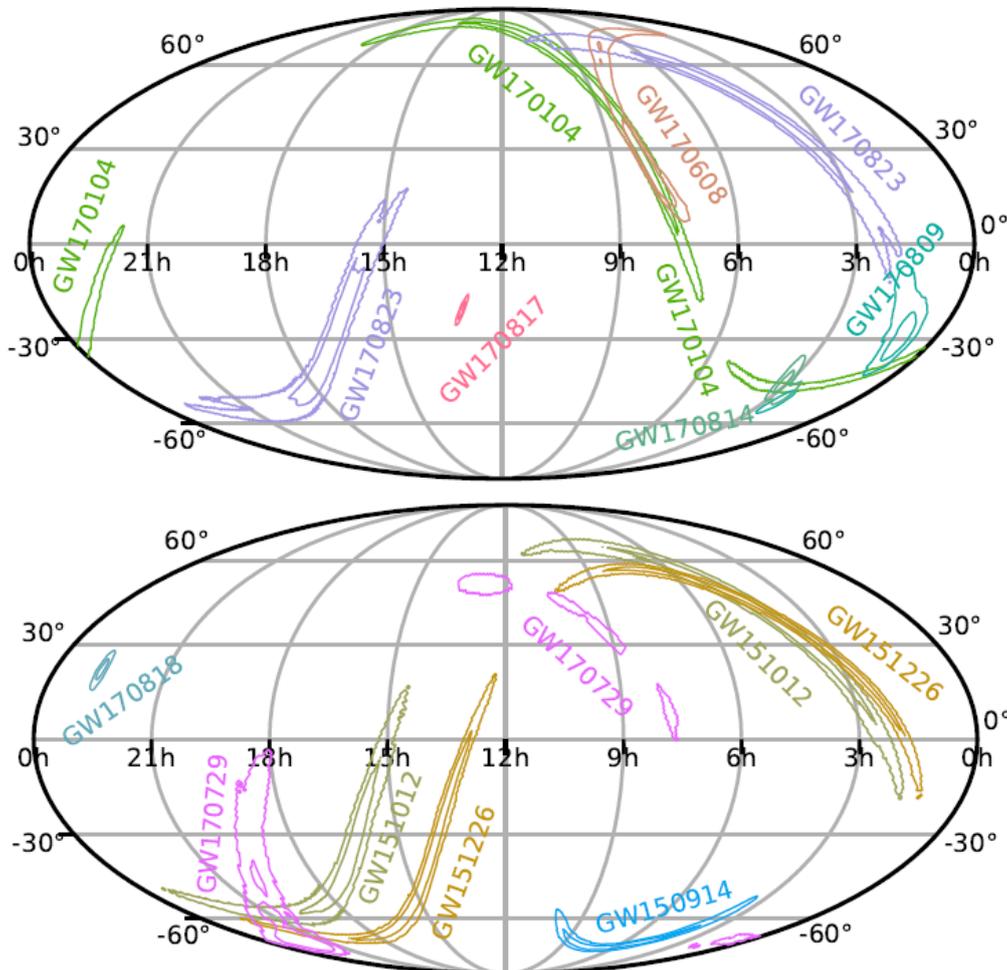


Figure 4 (adaptée de la figure 8 de la [publication scientifique](#)) : Ces cartes du ciel (une par hémisphère) montrent la précision avec laquelle chaque source d'ondes gravitationnelles a été localisée dans le ciel. Les contours délimitent les régions du ciel qui contiennent une source donnée avec une probabilité de 50% (les régions intérieures) ou 90% (les régions extérieures). Le réseau de trois détecteurs (LIGO-Hanford, LIGO-Livingston et Virgo) améliore grandement la précision de cette localisation, comme on peut le voir par exemple pour l'événement GW170818.

L'amélioration de la localisation de la source dans le ciel apportée par le réseau de trois détecteurs LIGO-Virgo est clairement visible sur la figure 4 qui montre les localisations obtenues pour chaque signal du catalogue GWTC-1. Par exemple, l'événement du catalogue le moins bien localisé dans le ciel est la BTN GW170823 qui a été uniquement observée par les deux détecteurs LIGO : sa direction est noyée dans une région de plus de 1 600 degrés carrés (soit environ 5 000 fois la taille de la pleine lune). Au contraire la BTN GW170818, dont le signal est du même ordre que celui de GW170823, a été détectée par les trois instruments, ce qui a permis de localiser sa source dans le ciel avec une précision de 39 degrés carrés. Seule la BEN GW170817 a été localisée avec une meilleure précision : seulement 16 degrés carrés.

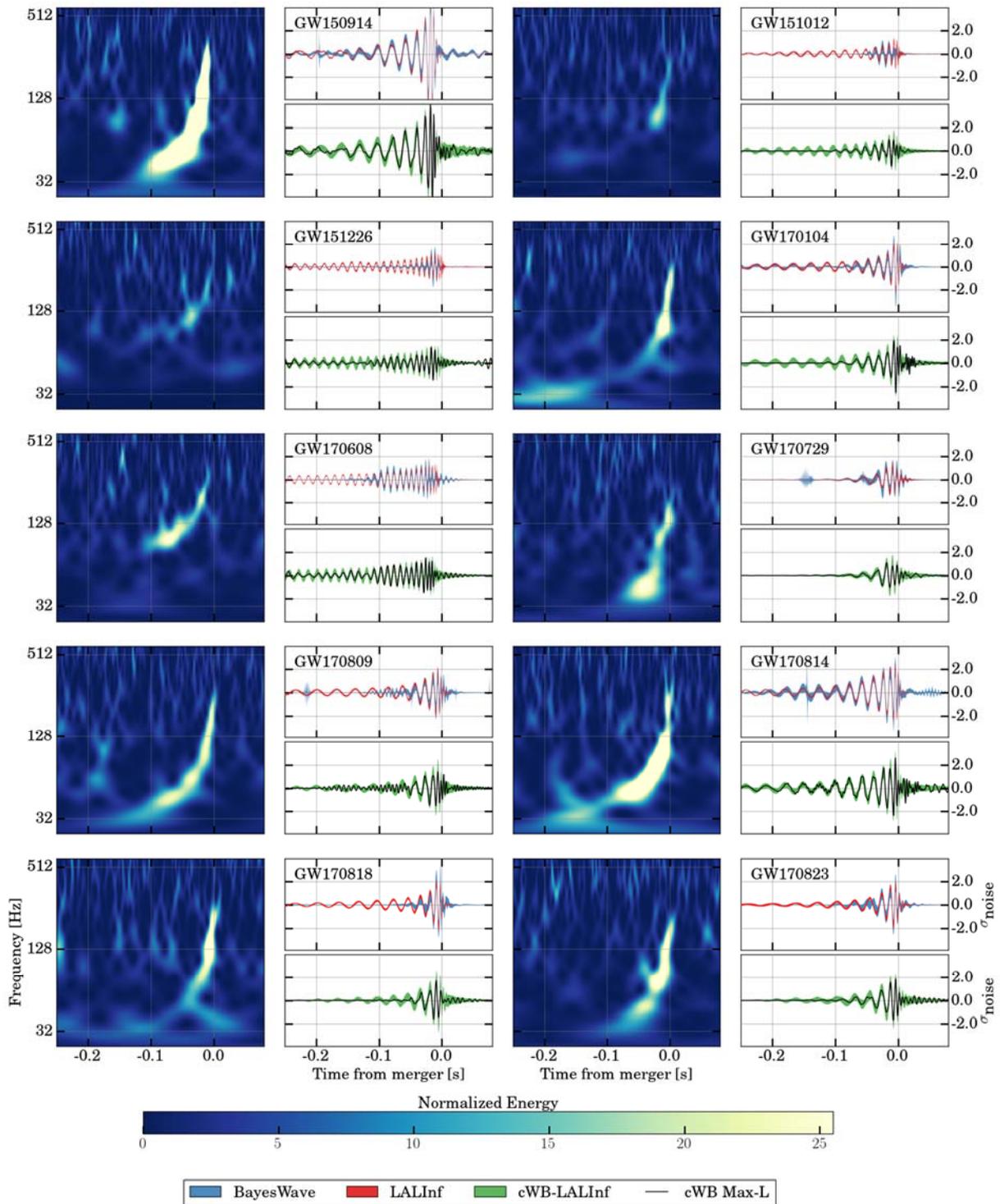


Figure 5 (adaptée de la figure 10 de la [publication scientifique](#)) : Cartes temps-fréquence et formes d'ondes reconstruites pour les dix fusions de systèmes binaires de trous noirs publiées dans le catalogue GWTC-1. Pour chaque détection, les courbes de couleurs différentes correspondent chacune à une méthode particulière de reconstruction des formes d'ondes. Une fois leurs incertitudes prises en compte, toutes ces méthodes donnent des résultats compatibles entre eux.

Finalement, la figure 5 rassemble les données des dix BTN détectées : cinq événements dans la première colonne et les cinq autres dans la seconde. Pour

chacune des dix fusions, l'image bleutée à gauche est une [carte temps-fréquence](#) du signal, une représentation des données qui utilise le temps sur l'axe des abscisses, la fréquence de l'OG sur l'axe des ordonnées et un code couleur représentant l'intensité du signal à un instant donné et dans une gamme de fréquence particulière. Sur la plupart de ces cartes, la trace caractéristique attendue pour la fin de la phase spirale d'une BTN (un signal dont la fréquence instantanée et l'intensité augmentent à mesure que la fusion se rapproche, appelé « chirp » en anglais, c'est-à-dire un « gazouillis ») est clairement visible. Pour chaque fusion de trous noirs, le graphique de droite compare la forme d'onde du signal reconstruite à l'aide de deux méthodes différentes d'analyse des données. Ces résultats sont en accord, une fois les incertitudes de ces algorithmes prises en compte.

UN REGARD VERS LE FUTUR

Les détections d'OG publiées dans ce premier catalogue LIGO-Virgo nous ont permis d'améliorer notre estimation du taux de fusion de systèmes binaires de trous noirs ou d'étoiles à neutrons dans l'Univers. Et, comme aucune fusion trou noir – étoile à neutrons n'a été détectée, ni pendant O1 ni pendant O2, une limite supérieure sur le taux de fusion de ces systèmes binaires mixtes a été calculée. Des informations plus détaillées sur l'estimation de ces taux – ainsi que les méthodes utilisées pour les estimer – se trouvent dans [un autre article publié en complément du catalogue GWTC-1](#). Si ces taux d'occurrence estimés ont encore une incertitude élevée, leur précision continuera à s'améliorer à mesure que de nouvelles détections d'OGs seront faites dans le futur.

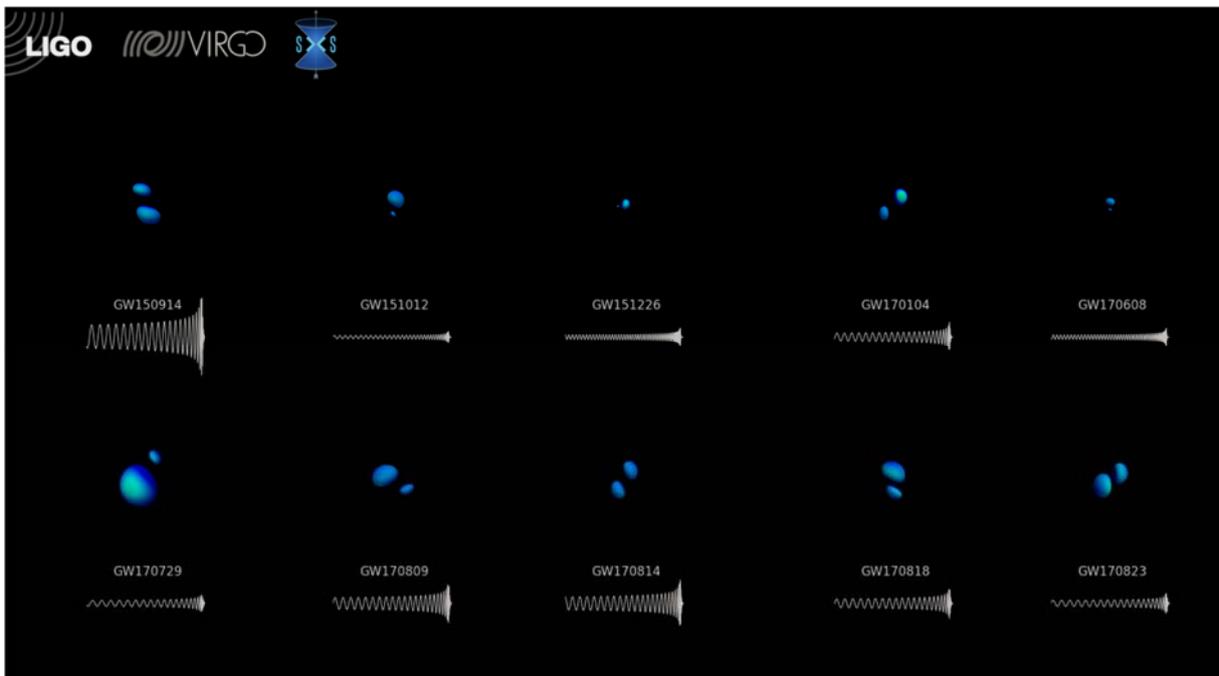


Figure 6 : Copie d'écran de l'animation LIGO-Virgo intitulée « Binary Black Hole Orrery » (en français « [Planétaire](#) des systèmes binaires de trous noirs »). Il s'agit d'une visualisation simultanée de l'ensemble des fusions de trous noirs que LIGO et Virgo ont observées jusqu'à maintenant. Cette vidéo ([cliquer ici](#) pour la visionner) présente le résultat de calculs de relativité générale numérique qui simulent

l'évolution des horizons des trous noirs ainsi que les ondes gravitationnelles émises par le système binaire lors des dernières orbites qui précèdent la fusion puis la relaxation du trou noir final nouvellement formé. Chaque simulation utilise les paramètres de l'une des sources du catalogue LIGO-Virgo. Au fur et à mesure que les horizons des trous noirs se rapprochent puis fusionnent, l'émission d'ondes gravitationnelles devient plus « audible » (l'amplitude augmente) et « aiguë » (la fréquence instantanée du signal augmente). Ce film est inspiré du [Planétaire Kepler](#). (Crédits : Teresita Ramirez / Geoffrey Lovelace / SXS Collaboration / LIGO-Virgo Collaboration).

Les détecteurs Virgo et LIGO sont actuellement engagés dans un nouveau programme d'amélioration de leur sensibilité. Une [troisième période de prise de données, « O3 »](#), doit commencer au printemps 2019 et devrait durer un an – pour un total attendu de plusieurs dizaines de nouvelles détections de fusion de systèmes binaires. De plus, le [détecteur japonais KAGRA](#) devrait rejoindre le réseau LIGO-Virgo avant la fin d'O3 : cette extension du réseau améliorera encore sa capacité à localiser des sources d'OG dans le ciel.

La publication du catalogue GWTC-1 est un événement marquant pour l'astronomie en ondes gravitationnelles et un important jalon vers un futur qui s'annonce très brillant pour la discipline.

Glossaire

- **Amplitude** : L'amplitude d'une onde gravitationnelle (un nombre sans dimension) donne la variation relative de longueur entre deux points de l'espace-temps déformé par le passage de l'OG.
- **Bruit** : Les fluctuations du signal mesuré en sortie des détecteurs. Ces variations aléatoires ont des origines variées : composants de l'instrument, impact de l'environnement de l'observatoire, etc. La sensibilité d'un détecteur d'ondes gravitationnelles est limitée par son bruit de mesure.
- **Déformation de marée** : Déformation d'un corps due à l'attraction gravitationnelle exercée sur lui par un autre objet. Par exemple, sur Terre, les déformations de marée dues au Soleil et à la Lune sont à l'origine des « marées » des océans : leur surface se déforme ce qui se traduit par des variations journalières du niveau des mers.
- **Étoile à neutrons** : Un astre extrêmement dense, issu de l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie.
- **Forme d'onde** : L'évolution en fonction du temps de l'amplitude de l'onde gravitationnelle.
- **Période de prise de données** : Une période pendant laquelle les détecteurs d'ondes gravitationnelles prennent des données avec l'efficacité la plus élevée possible, idéalement 24h/24 et 7j/7.
- **Polarisation des ondes gravitationnelles** : Le profil géométrique des déformations de l'espace-temps produites par le passage d'une onde gravitationnelle.

- **Sensibilité** : Une mesure de la capacité d'un détecteur à détecter un signal donné. Un instrument dont le niveau de bruit diminue pourra observer des signaux plus faibles : on dit que sa sensibilité s'améliore.
- **Spin** : Une mesure de la rapidité avec laquelle un astre est en rotation sur lui-même.
- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps déformée par un astre très compact et dont la gravité est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Visitez nos sites internet : <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- Lisez [ici](#) l'article scientifique complet, gratuitement et en ligne.
- Lisez [ici](#), gratuitement et en ligne, l'article scientifique publié en complément du catalogue et qui décrit les propriétés de la population de BTN mesurées à partir des données O1 et O2.
- Explorez les données du catalogue [ici](#), sur le site internet « [Gravitational Wave Open Science Center](#) ».