



# L'étrange histoire de GW190814 : la fusion d'un trou noir de masse stellaire avec un énigmatique astre compact

Daté du 23 juin 2020. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-GW190814>.

Plus d'informations en français : <http://public.virgo-gw.eu/ressources-pedagogiques>.

\*\*

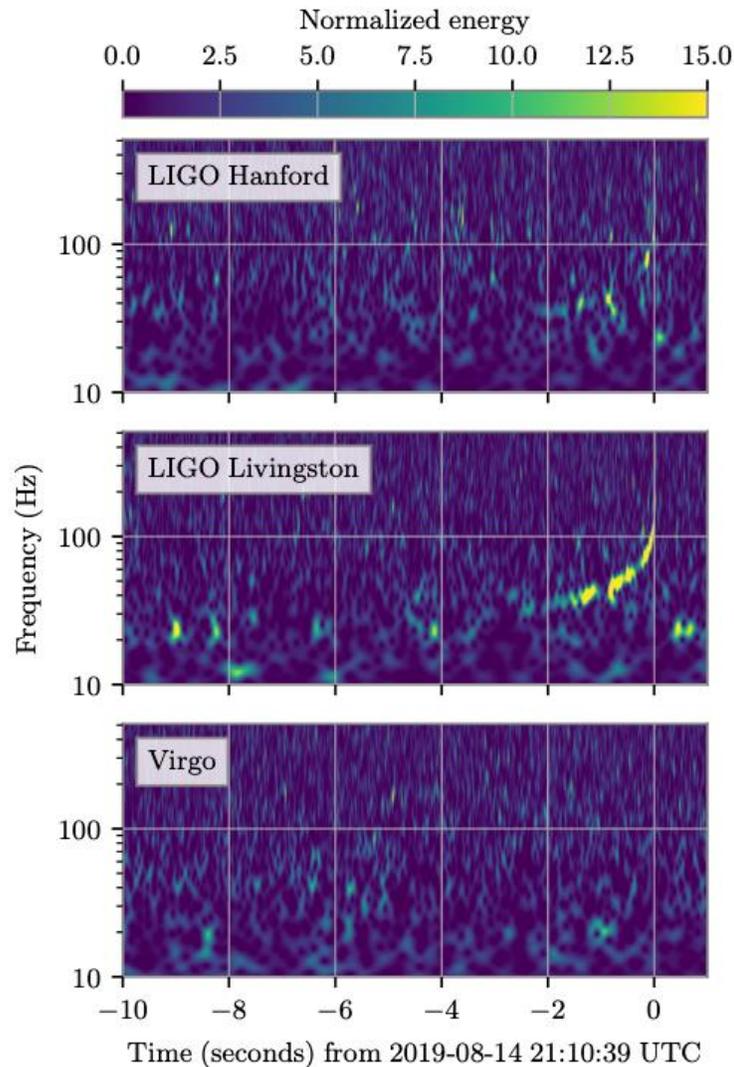
\*

Le 14 août 2019, exactement deux ans après le signal [GW170814](#) – la première observation d'une onde gravitationnelle par le réseau de trois détecteurs LIGO-Virgo –, les [deux instruments Advanced LIGO](#) (construits aux États-Unis, l'un à [Hanford](#) dans l'État de Washington, l'autre à [Livingston](#) en Louisiane) et le [détecteur Advanced Virgo](#), situé en Italie, à Cascina près de Pise, ont enregistré un autre signal produit par une source peut-être encore plus fascinante. Les instruments étaient au milieu de leur troisième période de prise de données commune – le « [run O3](#) » – quand ils ont détecté le signal extrêmement fort GW190814, produit par les derniers instants de la phase spiraleuse puis la fusion de deux [astres compacts](#) – un [trou noir](#) et un autre corps céleste, de nature inconnue.

Deux caractéristiques exceptionnelles rendent la source du signal GW190814 unique. Tout d'abord, l'astre compact le plus lourd est environ neuf fois plus massif que son compagnon, ce qui fait de ce système binaire le plus asymétrique jamais observé en ondes gravitationnelles. De plus, la masse mesurée de l'autre astre nous apprend qu'il s'agit soit du trou noir le plus léger, soit de l'[étoile à neutrons](#) la plus massive découverte dans un tel système binaire – mais nous ne pouvons pas être sûrs de sa nature ! Mis ensemble, ces deux éléments défient notre compréhension de la gamme de masses que les astres compacts peuvent avoir et de la manière dont ils s'assemblent en systèmes binaires qui finissent par fusionner.

## Le signal d'ondes gravitationnelles

La recherche de signaux d'ondes gravitationnelles utilise des [techniques de filtrage adapté](#) qui comparent les données enregistrées par les détecteurs avec des signaux prédits à partir de la [Relativité Générale](#) d'Einstein. Une telle analyse nous apprend qu'il y a une probabilité de fausse alarme inférieure à 1 / 10 000 ans que le signal GW190814 soit en fait dû à des fluctuations aléatoires du bruit de mesure. GW190814 est le troisième événement le plus fort observé à ce jour (après [GW170817](#) et [GW150914](#)). Il est assez puissant pour être visible à l'œil nu dans les spectrogrammes présentés sur la Figure 1 et qui montrent comment la fréquence instantanée du signal évolue au cours du temps.

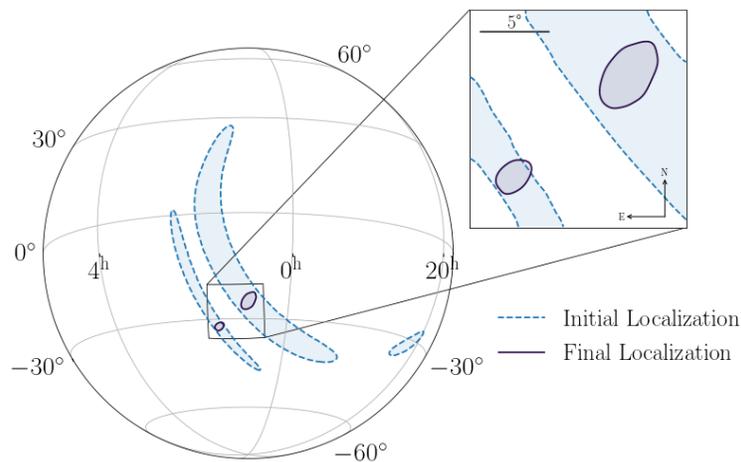


**Figure 1 :** Représentations temps-fréquences des données contenant le signal GW190814, observé par LIGO-Hanford (en haut), LIGO-Livingston (au milieu) et Virgo (en bas). L'échelle des temps en abscisses commence environ 10 secondes avant la fusion. Sur ces cartes, l'énergie de chaque cellule du plan temps-fréquence est représentée par une palette de couleurs : plus la couleur est « chaude » et plus l'énergie est élevée. Un signal caractéristique de type chirp est clairement visible sur la carte du milieu : le signal était le plus fort dans les données du détecteur LIGO-Livingston.

Au cours du run O3, les Collaborations LIGO et Virgo ont publié en temps réel des [alertes publiques](#) portant sur des détections potentielles d'ondes gravitationnelles. Ces alarmes en libre accès contiennent des informations préliminaires sur la source possible du signal, basées sur une [classification](#). Une vingtaine de minutes après sa détection, l'alerte GW190814 a été [rendue publique](#) avec un classement « [Mass Gap](#) » (en français « intervalle de masses sans source connue »), ce qui veut dire qu'au moins l'un des deux astres compacts du système binaire a une masse comprise entre trois et cinq fois celle du Soleil, notée  $M_{\odot}$ . La définition de la catégorie

« Mass Gap » vient de l'absence d'observations de trous noirs de masses inférieures à  $5 M_{\odot}$ . Cette partie de la distribution en masses des trous noirs a pour petit nom « [lower mass gap](#) » (en français « intervalle de masses légères sans source connue », lien vers une ressource en anglais) dans le jargon scientifique.

Ensuite, une analyse plus poussée du signal a permis d'obtenir une estimation plus précise des masses du système et la [mise à jour](#) de l'alerte publique envoyée 11 heures plus tard contenait « [NSBH](#) » comme nouvelle classification. Cela signifie que l'un des astres compacts avait une masse inférieure à  $3 M_{\odot}$ , une estimation grossière de la masse maximale attendue pour une étoile à neutrons. La localisation de la source dans le ciel était également très précise : environ 20 degrés carrés (voir Figure 2). À partir de cette information, des recherches de contreparties (similaires à celles entreprises pour [GW170817](#)) ont été menées à travers le [spectre électromagnétique](#) et en [neutrinos](#) mais elles se sont révélées infructueuses. Ce n'est pas vraiment une surprise dans la mesure où la source de GW190814 est bien plus éloignée que celle de GW170817 ; de plus, ses propriétés (voir ci-dessous) rendent peu probable l'hypothèse d'une puissante émission électromagnétique.

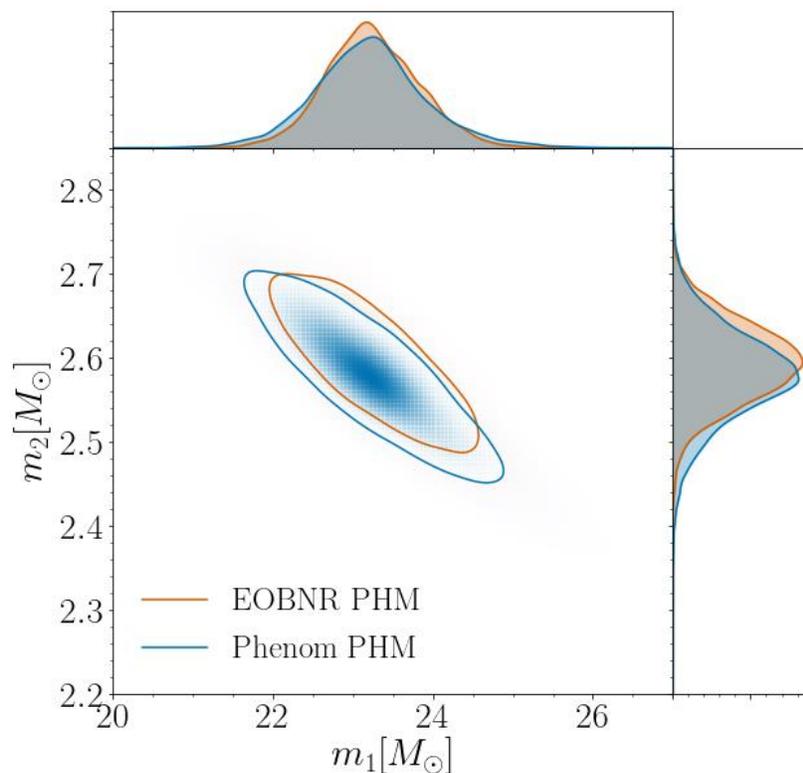


**Figure 2 :** Localisation dans le ciel de la source du signal GW190814. Les « bananes » bleues ont été calculées lors de l'analyse initiale des données en temps réel tandis que les zones violettes délimitent la localisation finale.

## Propriétés de la source

L'astre compact le plus lourd du système binaire GW190814 a une masse d'environ  $23 M_{\odot}$ , en accord avec la population de trous noirs stellaires observés par LIGO et Virgo jusqu'à maintenant (voir la Figure 3). La masse de l'astre le plus léger est comprise entre  $2,5$  et  $3 M_{\odot}$ , ce qui la place « au-dessus » de l'étoile à neutrons sans doute la plus massive connue – [MSP J0740+6620](#) – et « en-dessous » des masses typiques de trous noirs détectés indirectement au moyen d'observations électromagnétiques. Cependant, elle est comparable à celle de l'astre compact (probablement un trou noir) produit par la fusion des deux étoiles à neutrons observée dans le cas de l'événement [GW170817](#).

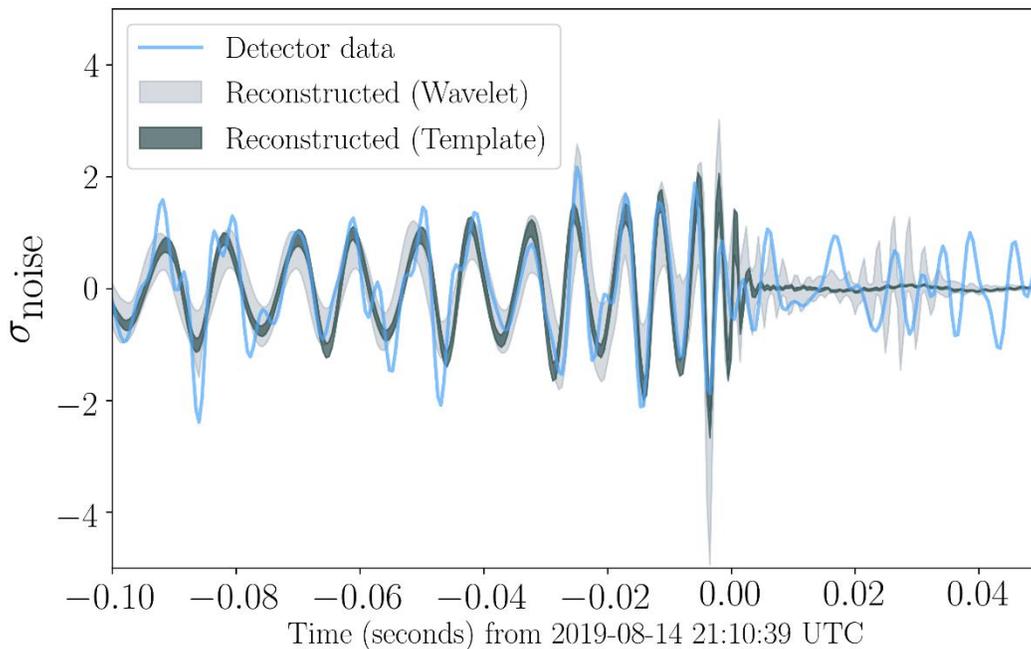
L'asymétrie entre les deux masses est un avantage pour mesurer plus précisément certaines propriétés de la source. En effet, plus la différence de masses est importante, plus l'empreinte des harmoniques supérieures de la fréquence fondamentale du signal d'ondes gravitationnelles est visible. La superposition d'un « son » fondamental et de ses harmoniques plus « aigus » est similaire à la vibration d'une corde de guitare que l'on vient de pincer. Comme dans le cas de [GW190412](#) – une fusion de deux trous noirs de masses inégales – l'ambiguïté intrinsèque entre la distance de la source et l'inclinaison du plan du système par rapport à la ligne de visée est en partie levée grâce aux harmoniques. Ainsi, nous avons été capables de déterminer que les ondes gravitationnelles de GW190814 ont été émises à une distance d'environ 800 millions d'années-lumière.



**Figure 3 :** Estimation des masses des deux astres compacts qui ont fusionné pour produire le signal GW190814. L'axe horizontal correspond à la masse de l'astre le plus lourd et l'axe vertical à la masse du plus léger (qui pourrait être une étoile à neutrons ou un trou noir). Les contours et la région colorée montrent les combinaisons des deux masses qui sont compatibles avec les données enregistrées. Les courbes dans les panneaux supplémentaires situés au-dessus et à droite du graphique principal montrent les distributions des masses prises individuellement. Les deux couleurs (bleu et orange) permettent de comparer les prédictions de deux modèles théoriques légèrement différents dans le cadre de la Relativité Générale.

Des astres compacts comme des étoiles à neutrons et des trous noirs peuvent avoir un mouvement de rotation propre – en anglais « spin ». Bien que le signal d'ondes gravitationnelles émis dépende

moins fortement des spins que des masses – ce qui rend plus difficile la mesure des spins – GW190814 était un long signal, visible environ 10 secondes dans les détecteurs. Cette durée, associée à la force du signal, a permis d’obtenir la mesure la plus précise du spin d’un trou noir basée sur les ondes gravitationnelles : sa valeur est inférieure à 7% du spin maximal permis dans le cadre de la Relativité Générale. L’analyse du signal montre également l’absence de **précession** pour ce système.



**Figure 4 :** Comparaison entre les données du détecteur LIGO Livingston (en bleu) autour de l’événement GW190814 (l’axe des abscisses est gradué en secondes et 0.00 correspond au moment du pic de signal de fusion des deux astres compacts) et deux prédictions de la forme du signal d’ondes gravitationnelles. La bande en gris foncé présente un modèle basé sur la Relativité Générale tandis que celle en gris clair montre le signal reconstruit à partir d’hypothèses minimales sur sa nature. L’échelle de l’axe des ordonnées a été choisie de telle sorte qu’une unité correspond au niveau de fluctuation typique du bruit de mesure dans le détecteur.

## Passer Einstein et Hubble sur le grill

Le signal GW190814 permet une riche moisson de résultats scientifiques. Comme le système est beaucoup plus asymétrique que GW190412, la présence d’harmoniques supérieures – ou multipôles – de l’onde gravitationnelle est mise en évidence bien plus clairement. C’est une confirmation merveilleuse de la Relativité Générale qui prédit le caractère multipolaire des émissions d’ondes gravitationnelles.

De nombreux autres tests de la théorie d’Einstein ont été menés à partir des données de GW190814 ; ils montrent que le signal (voir un zoom autour de la fusion sur la Figure 4) est bien



reproduit en supposant qu'il est dû à une fusion de deux trous noirs. De manière plus quantitative, aucun indice ne permet de suggérer que l'astre compact le plus léger ait été autre chose qu'un trou noir, à savoir une étoile à neutrons ou un astre encore plus [exotique](#).

GW190814 nous permet également de réaliser une nouvelle mesure de la [constante de Hubble  \$H\_0\$](#)  (le taux d'expansion actuel de l'Univers), basée exclusivement sur des signaux d'ondes gravitationnelles. En effet, GW190814 est à ce jour la source la mieux localisée dans le ciel pour laquelle aucune contrepartie (électromagnétique ou sous forme de neutrinos) n'a été découverte. En principe, une mesure de  $H_0$  demande de connaître le **redshift** (en français « décalage vers le rouge ») de la galaxie hôte – et donc d'avoir identifié cette dernière. Mais, en l'absence d'une contrepartie qui permette de sélectionner la bonne galaxie, on peut prendre en compte toutes les galaxies connues qui se trouvent dans la « boîte tridimensionnelle » (position sur la voûte céleste plus distance) connue avec précision qui doit contenir la source de GW190814. Pour mesurer la constante de Hubble, on combine tous ces redshifts – pondérés par la probabilité que chaque galaxie soit l'hôte de la source – avec la mesure de la distance de GW190814. Le calcul conduit à une mesure de  $H_0$  et de l'incertitude associée : de l'ordre de 75 kilomètres par seconde et par **mégaparsec**, un résultat aussi précis que possible pour une source d'ondes gravitationnelles dont la source n'a pas été localisée.

## **L'astre compact le plus léger est-il une étoile à neutrons ou un trou noir ?**

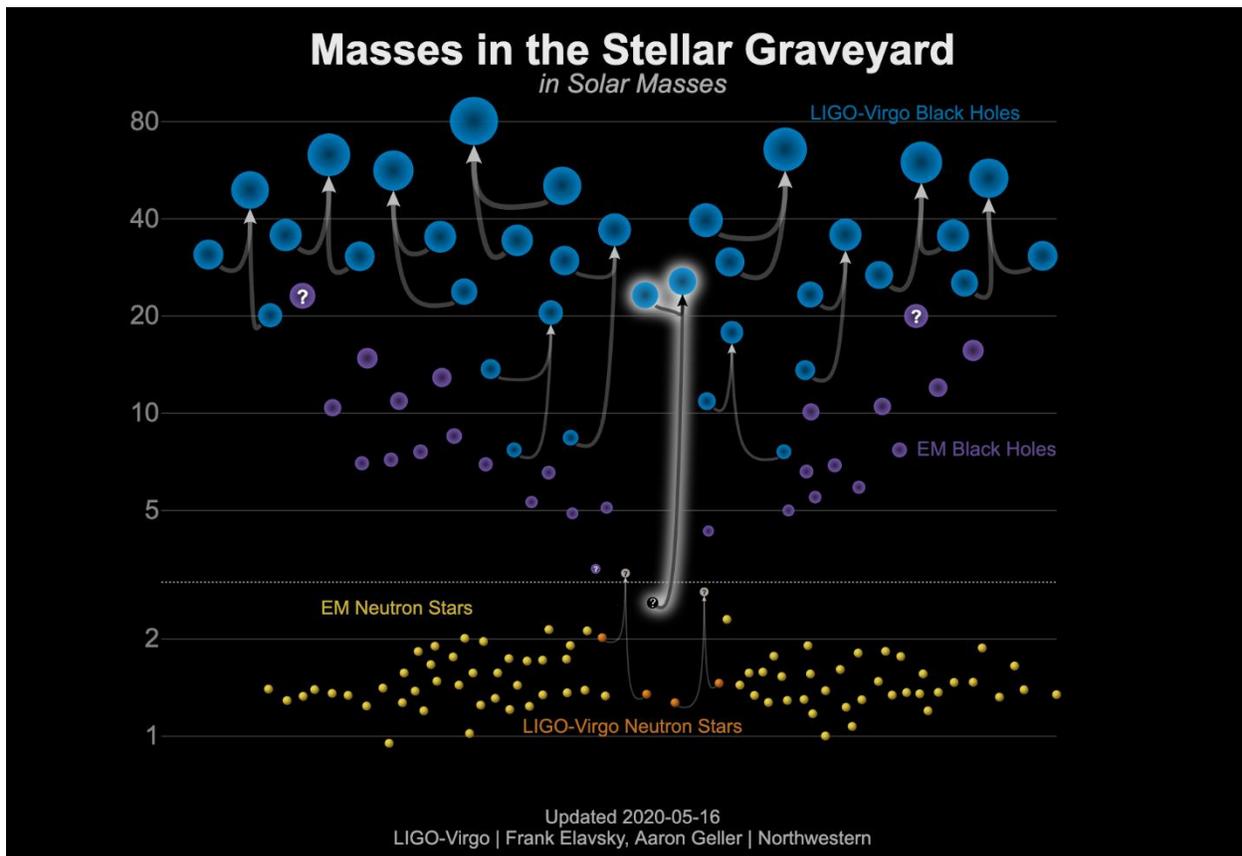
La masse de l'astre compact le plus léger du système GW190814 en fait soit une étoile à neutrons exceptionnellement lourde, soit un trou noir particulièrement léger. Normalement, il devrait être possible de déduire la présence d'une étoile à neutrons des traces laissées par les [forces de marée](#) dans le signal d'ondes gravitationnelles. En effet, lors de la fusion d'un système binaire contenant une étoile à neutrons, l'interaction gravitationnelle exercée par l'astre compagnon produit des effets de marée sur la matière de l'étoile à neutrons, de la même manière que la Lune produit des marées sur Terre. Cependant, ces effets sont trop faibles dans le cas d'un système aussi massif et asymétrique que GW190814 : les données ne permettent pas de départager les deux systèmes possibles : étoile à neutron + trou noir ou deux trous noirs.

D'un autre côté, les modèles théoriques décrivant la matière ultra-dense d'une étoile à neutrons ainsi que la population d'étoiles à neutrons galactiques observées de manière électromagnétique permettent d'estimer la masse maximale qu'une étoile à neutrons peut atteindre. Ces prédictions suggèrent que le composant léger de GW190814 reste trop lourd pour être une étoile à neutrons et serait donc plus vraisemblablement un trou noir. Cependant, on ne peut pas exclure totalement le fait que ce système contienne une étoile à neutrons particulièrement massive, ce qui nous conduirait à revoir radicalement nos estimations de la limite en masse des étoiles à neutrons.

## **Retour aux sources : comment ce système s'est-il formé ?**

Parce que l'astre compact le plus léger a une masse intermédiaire, comprise entre les gammes typiques pour les étoiles à neutrons et pour les trous noirs et qu'elle est environ neuf fois plus

faible que celle de son compagnon lourd, le système GW190814 ne ressemble à aucun de ceux dont les fusions avaient été observées par LIGO et Virgo jusqu'à maintenant (voir Figure 5). Il est également très différent de la plupart des systèmes produits par des simulations de la population de systèmes binaires d'astres compacts qui fusionnent dans l'Univers. On pense que les fusions de ce type sont bien moins fréquentes que celles, plus typiques, impliquant deux trous noirs ou deux étoiles à neutrons. Pour toutes ces raisons, expliquer la formation d'un tel système est un vrai défi.



**Figure 5 :** Distribution des masses d'étoiles à neutrons et de trous noirs mesurées grâce aux détections d'ondes gravitationnelles (repères oranges et bleus) et aux observations électromagnétiques (repères jaunes et violets). L'unité est la masse du Soleil. La nouvelle détection GW190814 est mise en valeur au centre de l'image : il s'agit de la fusion d'un trou noir et d'un astre compact énigmatique dont la masse vaut environ 2,6 fois celle du Soleil, un événement qui a produit un autre trou noir.

En comparant les propriétés et le taux d'occurrence de GW190814 aux prédictions basées sur des modèles théoriques d'évolution d'étoiles développés par des astronomes, on trouve que les [amas d'étoiles](#) jeunes et denses et les disques entourant les [noyaux actifs de galaxie](#) sont des hôtes plus prometteurs pour ce type d'événements que les [amas globulaires](#), même si tous les modèles de formation d'astres compacts devront être revus. Cette fusion pourrait également être due à l'évolution d'un système binaire isolé mais les prédictions pour ce type de scénario dépendent de manière cruciale des hypothèses faites et des modèles de formation d'astres compacts utilisés. Il est aussi possible que l'astre compact le plus léger du système se soit formé à la suite d'une fusion



antérieure, ce qui ferait de ce corps un vestige de deuxième génération. Un tel objet aurait pu ensuite acquérir un trou noir compagnon par interaction gravitationnelle dans des environnements riches en étoiles comme les amas globulaires. Néanmoins, il est peu probable que ce soit le mécanisme dominant par lequel de tels systèmes binaires peuvent se former.

\*\*

\*

En conclusion, le signal GW190814 ouvre des perspectives fascinantes pour l'étude des masses des astres compacts et des processus qui conduisent à leur fusion. Les futures observations d'ondes gravitationnelles seront cruciales pour mettre en lumière la population de systèmes binaires asymétriques dans leur ensemble, une famille dont GW190814 n'est que le premier représentant.

## Glossaire

- **Amas globulaire** : Une région sphérique très dense en étoiles et en orbite autour d'une galaxie. Un amas globulaire peut contenir jusqu'à un million d'étoiles.
- **Année-lumière** : Unité de longueur définie comme la distance parcourue par la lumière en une année.
- **Astre compact** : Des astres très denses – naines blanches, étoiles à neutrons ou trous noirs – qui marquent d'ordinaire la fin du cycle d'évolution d'une étoile.
- **Étoile à neutrons** : Un astre compact formé de matière très dense, vestige de l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie.
- **Harmoniques supérieurs / Multipôles** : Mathématiquement, un signal d'ondes gravitationnelles peut être décrit comme un développement en [harmoniques sphériques](#). Les harmoniques supérieurs sont les termes de ce développement qui suivent le premier, dit d'ordre dominant.
- **$M_{\odot}$**  : La masse du Soleil (approximativement  $2 \times 10^{30}$  kg), utilisée en astronomie comme unité standard de masse.
- **Mass-gap** : En français, « intervalle de masses sans source connue ». Un vide dans la distribution en masses des astres compacts, suggéré par l'absence d'observations de tels objets de masse comprise entre 2,5 et 5  $M_{\odot}$ .
- **Mégaparsec (Mpc)** : Unité de longueur, équivalente à environ 3,26 millions d'années-lumière.
- **Noyau actif de galaxies** : Des régions très denses et très lumineuses que l'on trouve au centre de nombreuses galaxies. Elles comptent parmi les sources d'énergies les plus puissantes et les plus continues de l'Univers.
- **Précession** : Par conservation du moment angulaire, lorsque des trous noirs ont un mouvement de rotation propre (ou spin) autour d'un axe différent de celui de l'orbite du système binaire, le plan de l'orbite est en rotation (on dit qu'il « précède ») autour de l'axe du moment angulaire total.
- **Redshift** : En français « décalage vers le rouge ». Augmentation de la longueur d'onde (d'une onde sonore, lumineuse ou ... gravitationnelle) due au mouvement de la source de l'onde par rapport à l'observateur. À cause de [l'expansion de l'Univers](#), les structures



comme les galaxies s'éloignent de nous et les ondes qui nous parviennent de ces régions ont une longueur d'onde plus grande. Pour la lumière, cela se traduit par un décalage des couleurs vers le « côté rouge » du spectre électromagnétique.

- **Trou noir** : Un astre compact dont l'attraction gravitationnelle est si forte que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.

#### Pour en savoir plus

- Visitez nos sites internet : [ligo.org](http://ligo.org), [virgo-gw.eu](http://virgo-gw.eu)



- Lisez l'annonce de cette découverte sur les sites internet de
  - Virgo : <http://www.virgo-gw.eu/gw190814> (cliquez sur le drapeau tricolore pour la version française) et
  - LIGO : <https://www.ligo.org/detections/GW190814.php>.
- L'article scientifique complet est accessible gratuitement via le lien suivant : <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab960f>