

# À la découverte des propriétés des populations de trous noirs et d'étoiles à neutrons après la prise de données O3 de LIGO et Virgo

Daté du 8 novembre 2021. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3bAstroDist>.  
Plus d'informations en français : <http://public.virgo-gw.eu/ressources-pedagogiques>.

## Introduction

Pris un par un, les signaux d'ondes gravitationnelles produits par des fusions de systèmes binaires d'**astres compacts (trous noirs ou étoiles à neutrons)** donnent uniquement des informations sur leurs sources particulières. Par contre, une étude globale de la population de ces événements est nécessaire pour comprendre comment ces systèmes se sont formés dans l'Univers et ont ensuite évolué. Nous sommes particulièrement intéressés par les distributions de masses et de **spins** des astres compacts car ces propriétés nous permettent d'en apprendre plus sur les processus qui les ont formés.

Les scientifiques se sont concentrés sur deux voies, ou "scénarios", de formation pour ces systèmes binaires dans le cosmos. Dans le scénario **d'évolution de systèmes binaires isolés**, les systèmes binaires d'astres compacts naissent de paires d'étoiles massives qui finissent par exploser en laissant derrière elles un trou noir (BH) ou une étoile à neutrons (NS) résiduel. Dans le **scénario de formation dynamique**, des étoiles à neutrons et des trous noirs indépendants au départ se lient gravitationnellement dans des environnements denses comme des [amas globulaires](#) ou des [amas stellaires](#) denses. Et chacun de ces scénarios laisse son empreinte spécifique sur les propriétés observées des astres compacts que nous détectons via des signaux d'ondes gravitationnelles. Nous nous attendons à ce que les sources détectables par le réseau LIGO-Virgo-KAGRA couvrent globalement la gamme de masses comprises entre une et une centaine de fois la **masse du Soleil** (notée par le symbole  $M_{\odot}$ ). Cependant, différents processus astrophysiques pourraient créer des "trous", c'est-à-dire un ou plusieurs intervalles où l'on ne détecterait ni trou noir ni étoile à neutrons. Par exemple, les observations passées d'astres compacts via des [binaires X](#) ou des [ondes gravitationnelles](#) semblent indiquer la présence d'un **trou à basses masses** (entre 3 et 5  $M_{\odot}$ ), entre les étoiles à neutrons les plus lourdes et les trous noirs les plus légers. Ce résultat pourrait trouver son explication dans les mécanismes physiques par lesquels [les étoiles massives meurent](#). Un **trou à hautes masses** qui concerne les trous noirs de masses comprises entre 50 et 120  $M_{\odot}$  environ est également prédit à cause des [supernovæ à instabilité de paires](#). En effet, dans ce scénario, les couches externes de l'étoile mourante sont éjectées, laissant soit un trou noir plus léger, soit aucun vestige de l'explosion. Ainsi, la confirmation de l'existence de l'un ou l'autre de ces trous en masses nous donnerait des informations sur la fin de vie des étoiles massives.

Un autre indice important de la manière dont un système binaire compact s'est formé est l'orientation de l'axe de rotation propre (ou spin) des astres qui le composent par rapport à l'axe de rotation orbital -- il s'agit de comparer la manière dont les astres tournent sur eux-mêmes avec leur mouvement de rotation l'un autour de l'autre au sein du système binaire. Par exemple, l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à son axe de révolution autour du Soleil est à l'origine des saisons. Les systèmes binaires isolés ont généralement leurs axes de spin alignés avec l'axe de l'orbite alors que ceux qui ont été formés de manière dynamique ont des spins orientés aléatoirement.

Un dernier paramètre clef estimé à l'aide du signal d'onde gravitationnelle est la distance de la Terre à la source fusionnant, qui peut être convertie en **décalage vers le rouge (ou "redshift")** à l'aide de la [loi de Hubble-Lemaître](#). La distribution de ces redshifts nous donne des informations sur le **taux de formation des étoiles** à différents moments de l'évolution de l'Univers et sur la [composition](#) de l'Univers (nature et abondances relatives des éléments chimiques présents). En effet, la composition des étoiles agit sur la rapidité avec laquelle elles évoluent vers des astres compacts qui fusionneront éventuellement ensuite.

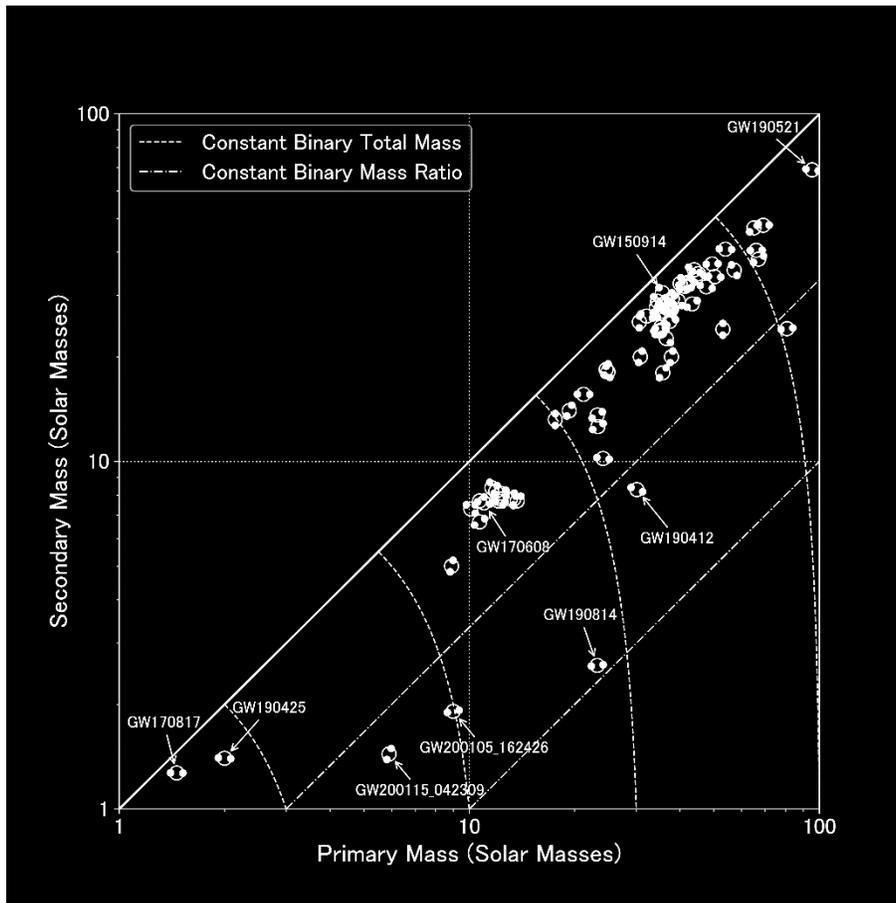
En conclusion, mesurer les distributions des masses, des spins et des redshifts des astres compacts détectés, ainsi que d'éventuelles [corrélations](#) entre ces différents paramètres, est un objectif majeur pour l'astronomie en ondes gravitationnelles.

## Modèles et méthodes

L'étude présentée ici est basée sur un lot de 74 fusions de systèmes binaires compacts détectés par le réseau LIGO-Virgo jusqu'à la fin de la prise de données O3. Il comprend 70 fusions de systèmes binaires de trous noirs (BBH), deux fusions de systèmes binaires d'étoiles à neutrons (BNS) et deux fusions de systèmes binaires étoile à neutrons - trou noir (NSBH). Ces événements sont ceux dont la détection est nette, afin de ne pas contaminer les résultats de l'analyse avec des signaux dus à des fluctuations du bruit de mesure et qui ne seraient donc pas d'origine astrophysique. Pour mesurer les propriétés globales des populations d'astres compacts, nous commençons par estimer les paramètres (masses, spins et redshifts) de chaque système binaire ; ensuite, nous combinons ces résultats en prenant en compte leurs incertitudes. Finalement, nous comparons les distributions expérimentales avec différents modèles pour voir ceux qui décrivent le mieux les données. Certains de ces modèles sont gouvernés par des paramètres qui tirent directement leur origine de processus astrophysiques. Par exemple la masse minimale des trous noirs dont la valeur nous renseignera sur la présence ou l'absence du trou à basses masses. D'autres modèles sont plus flexibles et capables de mieux s'adapter à des variations inattendues dans les données, mais leurs paramètres n'ont pas forcément une interprétation physique simple et directe.

Les trous noirs et étoiles à neutrons que nous détectons grâce aux ondes gravitationnelles ne sont pas représentatifs de la population globale de ces astres compacts dans l'Univers. En l'effet, l'amplitude des signaux observés sur Terre augmente avec la masse totale du système binaire et décroît avec la distance (ou redshift) de la source. Donc on observe plus de fusions massives et

elles sont détectées jusqu'à des distances plus grandes. Ce "[biais de Malmquist](#)" est pris en compte en simulant des signaux générés pour une population de sources dont les paramètres sont aléatoires et en mesurant la facilité (ou difficulté) avec laquelle ils sont détectés. L'efficacité de détection ainsi déterminée permet de corriger ce biais observationnel.



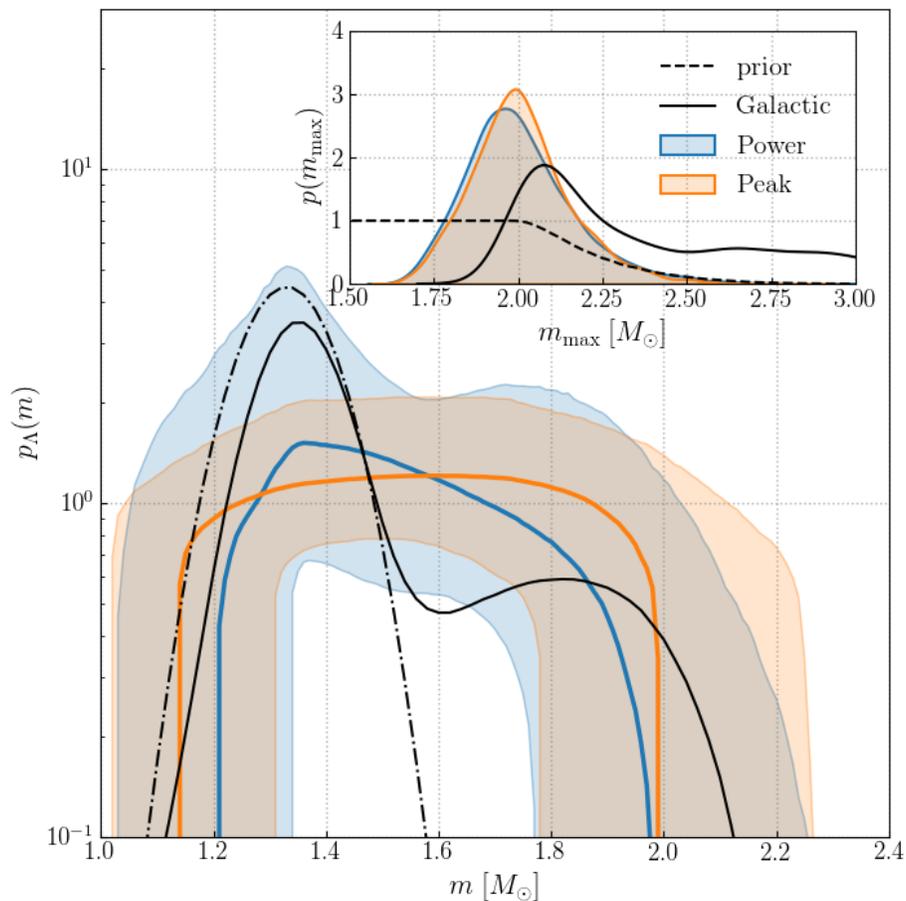
**Figure 1** : Diagramme représentant l'ensemble des systèmes binaires inclus dans l'étude de leurs populations résumée ici. La masse primaire (masse de l'astre le plus lourd du système) est représentée sur l'axe horizontal et la masse secondaire (masse de l'astre le plus léger) sur l'axe vertical. Comme la masse primaire est par définition toujours plus grande que la masse secondaire, tous les systèmes binaires sont en dessous de la diagonale, représentée par une droite en trait plein. Les événements les plus marquants du catalogue GWTC-3 sont indiqués par leur nom sur le graphique tandis que les lignes pointillées représentent des iso-contours, c'est-à-dire qu'elles relient tous les systèmes binaires dont un paramètre est constant : la masse totale pour les pointillés courts et le rapport de masse pour les pointillés longs. (Crédits : LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGFAE / Thomas Dent).

## Population globale des astres compacts

L'analyse globale de l'ensemble des fusions de systèmes binaires d'astres compacts permet de calculer le taux auquel ces fusions se produisent, par unité de volume d'Univers et par unité de

temps. Le résultat, avec ses incertitudes, est un intervalle compris entre 71 et 2200 fusions par **gigaparsec** cube (abrégé en “Gpc<sup>3</sup>”) et par an. Si l’on met une séparation en masse entre les étoiles à neutrons (légères) et les trous noirs (lourds) à  $2,5 M_{\odot}$ , on obtient les intervalles suivants pour chaque sous-population : 13-1900 / Gpc<sup>3</sup> / an pour les BNS, 7-320 / Gpc<sup>3</sup> / an pour les NSBH et 16-130 / Gpc<sup>3</sup> / an pour les BBH. Bien que nous détectons bien plus de BBH que de sources des deux autres types, ces fusions sont en fait plus rares dans l’Univers ! En effet, le taux de fusion de systèmes binaires mesuré décroît avec la masse du système : les fusions se raréfient à mesure que la masse augmente. Cependant, une simple [loi de puissance](#) ne suffit pas pour décrire la relation entre le taux de fusion et la **masse primaire** du système sur toute la gamme de masses, des étoiles à neutrons les plus légères aux trous noirs les plus lourds. Les données semblent indiquer une baisse importante du taux de fusion au-delà de la région des étoiles à neutrons mais on ne peut pas dire pour le moment s’il y a un véritable trou dans la distribution en dessous de la région des trous noirs. Il faudra plus d’observations de fusions pour pouvoir conclure sur l’existence ou pas de ce trou à basses masses.

## Distribution de masse des étoiles à neutrons



**Figure 2** (Fig. 7 de notre article scientifique) : La distribution de masses des étoiles à neutrons observées dans les systèmes binaires compacts détectés au moyen des ondes gravitationnelles qu’ils ont émises lors de leur fusion. L’axe vertical fournit une mesure de la probabilité d’observer

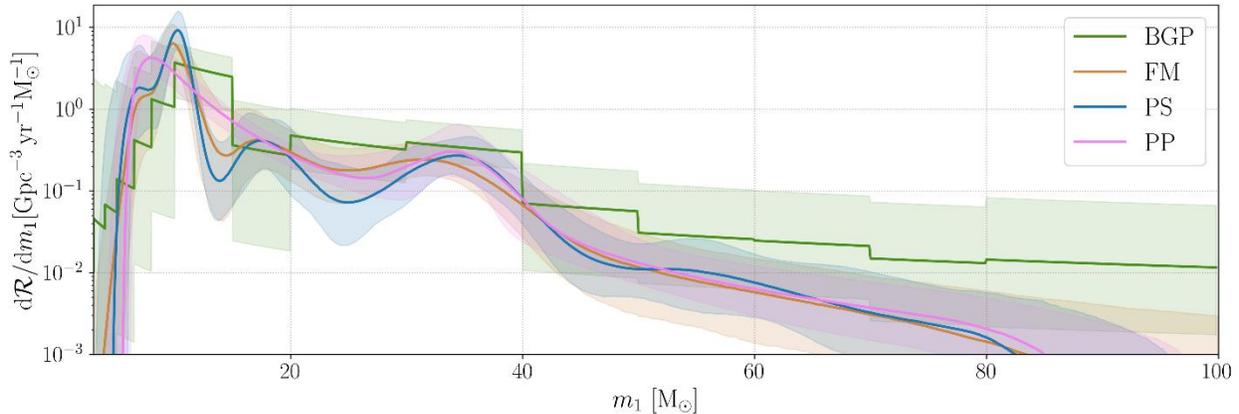
*une étoile à neutrons dont la masse est reportée sur l'axe horizontal, gradué en multiples de la masse du Soleil  $M_{\odot}$ . Les courbes en trait plein bleu ou orange montrent les distributions obtenues à partir de deux modèles différents ; les incertitudes de ces distributions à 90% de confiance sont représentées par les régions de couleurs claires. La ligne noire pointillée où alternent tirets et points montre la distribution correspondante basée sur l'étude des systèmes doubles d'étoiles à neutrons galactiques connus tandis que la courbe noire en trait plein donne la distribution obtenue en prenant en compte toutes les étoiles à neutrons observées dans la galaxie. L'encart en haut à droite donne la distribution de probabilité de la masse maximale d'une étoile à neutrons en utilisant le même code couleur que le graphique principal. La ligne noire pointillée montre la distribution utilisée comme point de départ de l'analyse, laquelle est basée sur les connaissances antérieures au catalogue GWTC-3 -- et indépendantes de ce dernier.*

Ensuite, nous nous intéressons à la distribution en masse des étoiles à neutrons détectées grâce aux ondes gravitationnelles. Les mesures précédentes de cette distribution étaient basées sur les observations de pulsars ([Wikipédia](#) ; une autre [référence](#), en anglais) dans la Galaxie, des étoiles à neutrons qui émettent des ondes électromagnétiques (ondes radio ou rayons X) reçues à intervalles réguliers, à la faveur de leur rotation rapide sur elles-mêmes et de leur fort champ magnétique. Alors que les mesures basées sur les pulsars privilégient une distribution de masse avec deux pics distincts, nous avons trouvé que nos observations d'étoiles à neutrons favorisent une distribution de masses étendue, se prolongeant jusqu'aux hautes masses. Cela pourrait signifier que la population d'étoiles à neutrons extragalactiques observée par LIGO-Virgo-KAGRA est différente de la population galactique à laquelle les pulsars donnent accès. Notre analyse permet également d'estimer la masse maximale d'une étoile à neutrons : avec les incertitudes, nous obtenons un intervalle compris entre 1,8 et 2,3  $M_{\odot}$ , un résultat en accord avec les observations basées sur les pulsars.

## Propriétés des trous noirs

Par rapport à nos précédentes analyses, les résultats basés sur le catalogue GWTC-3 donnent plus de poids aux systèmes binaires dont les astres ont des masses différentes et la fraction de systèmes légers a augmenté. Nos nouveaux modèles, mieux adaptés aux données, identifient deux nouvelles "bosses" dans la distribution des masses primaires -- vers 10 et 18  $M_{\odot}$  -- en plus du pic déjà observé autour de 35  $M_{\odot}$  environ. Alors que les modèles d'évolution de systèmes binaires isolés peuvent expliquer l'accumulation de sources dans l'intervalle compris entre 8 et 10  $M_{\odot}$ , l'origine des autres pics n'est pas encore comprise. Tout comme l'existence du trou à basses masses dans la distribution globale présentée précédemment est encore incertaine, nous ne pouvons pas conclure sur l'existence ou l'absence d'un trou à hautes masses pour les systèmes binaires de trous noirs. L'absence d'une coupure nette vers 50  $M_{\odot}$  que les modèles de supernova à instabilité de paires prédisent suggère qu'une partie de la population de trous noirs n'est pas issue de systèmes binaires isolés. Les scénarios de formation dynamique peuvent mener à des fusions successives où le trou noir issu d'une fusion précédente rencontre un autre astre compact avec lequel il fusionnera ensuite. Cela pourrait se traduire par une distribution de masses élargie qui couvrirait au moins en partie les trous à basses et hautes masses. Une autre possibilité serait que le trou à hautes masses soit rempli par des systèmes binaires situés dans un environnement gazeux car les trous noirs qui

s’y trouveraient pourraient grossir par **accrétion** (le trou noir “aspire” par attraction gravitationnelle le gaz qui l’entoure).

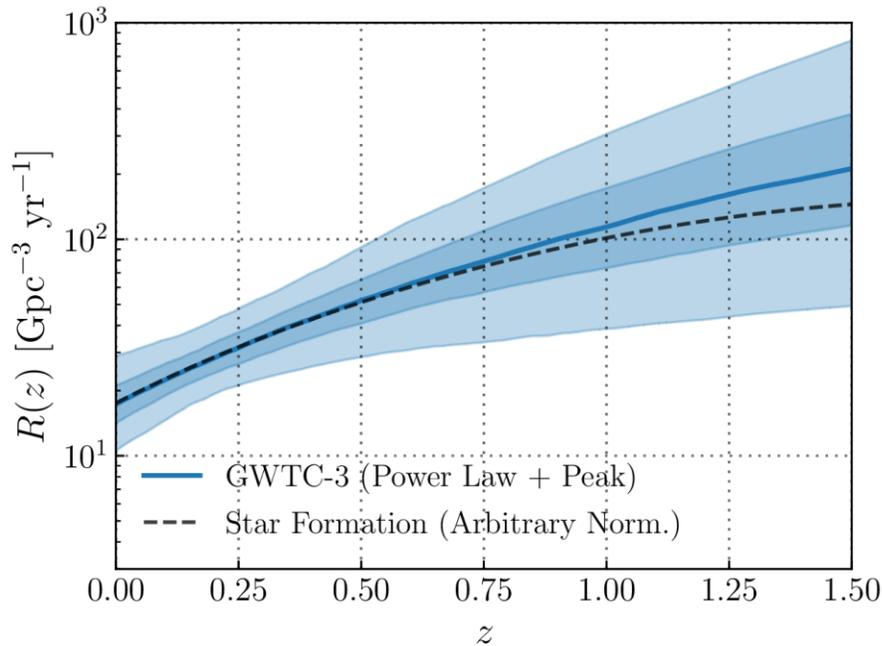


**Figure 3** (Fig. 11 de notre article scientifique) : La distribution de la masse primaire des systèmes binaires de trous noirs pour quatre modèles, chacun correspondant à une couleur différente. Les trois modèles les plus flexibles (“BGP”, “FM”, “PS” mais pas le modèle “PP”, en rose) mettent en évidence une sous-structure avec des pics prononcés vers 10 et 35 masses solaires et peut-être un autre pic vers 18 masses solaires. Sur ce graphique, l’axe vertical représente le taux auquel des systèmes dont la masse primaire est donnée par l’axe horizontal fusionnent dans l’Univers. Les régions colorées montrent l’incertitude associée à chaque distribution. Plus la courbe est haute et plus la masse primaire correspondante est répandue dans la population des systèmes binaires compacts.

Nous observons que les trous noirs qui font partie de systèmes binaires ont des spins faibles et que leur axe de rotation propre n’est pas complètement aligné avec l’axe du mouvement orbital du système. Plus précisément, les nouvelles observations vont dans le sens d’une distribution plus aléatoire de l’angle entre l’axe de rotation propre et l’axe du mouvement orbital. De plus, la présence de trous noirs avec un spin négatif -- c’est à dire des astres qui tournent sur eux-mêmes dans le sens opposé à leur mouvement de rotation orbital -- se confirme. C’est une configuration très improbable dans le cas où un système binaire évolue de manière isolée, ce qui suggère qu’au moins une partie des systèmes binaires de trous noirs se forment de manière dynamique. Nous trouvons également que les systèmes légers ont plus souvent des spins faibles alors que des valeurs du spin plus élevées se rencontrent dans les systèmes binaires plus lourds. Et un nombre plus important de systèmes binaires asymétriques en masse ont des spins élevés et alignés avec l’axe de rotation orbital. Aucune de ces deux corrélations n’est attendue au niveau théorique. Une explication possible est qu’on mélange en fait deux populations de trous noirs distinctes qui ont des relations entre masse et spin différentes ; dans tous les cas, il faudra plus d’observations de fusions de systèmes binaires pour comprendre complètement ces effets.

Un autre nouveau résultat obtenu en incluant les dernières données du catalogue GWTC-3 est que le taux de fusion augmente avec le redshift. Grâce aux observations de galaxies, nous savons déjà que le taux de formation des étoiles évolue avec le redshift. Cela signifie que le nombre d’étoiles disponibles pour donner des astres compacts qui pourraient ensuite fusionner varie en fonction du

[temps cosmique](#). Il est donc naturel d’imaginer que le taux de fusions varie selon la même loi. Alors que nos analyses précédentes étaient en accord avec l’hypothèse d’un taux de fusion “plat” en fonction du redshift (c’est-à-dire indépendant de ce paramètre), nous pouvons maintenant exclure cette possibilité avec une probabilité de 99,4%. De futures mesures plus précises de l’évolution du taux de fusions en fonction du redshift nous aideront à mieux comprendre la composition de l’Univers et les processus par lesquels des nuages de gaz finissent par donner des étoiles.



**Figure 4** (Fig. 13 de notre article scientifique) : Taux médian de fusion par unité de volume et de temps en fonction du redshift. La courbe bleue représente le taux mesuré et les régions colorées donnent les incertitudes associées : à 50% de confiance pour la zone foncée et à 90% de confiance pour la zone claire. L’évolution du taux de formation d’étoiles en fonction du redshift est représentée par la courbe en pointillé, obtenue en multipliant ce taux de formation par une constante arbitraire pour que les deux courbes (bleue et noire en pointillé) soient visuellement comparables.

## Conclusions

Notre nouveau catalogue plus fourni de fusions de systèmes binaires d’astres compacts nous permet de sonder plus en profondeur les propriétés des trous noirs et des étoiles à neutrons détectés au moyen des ondes gravitationnelles. Nous commençons à comprendre la formation puis l’évolution des astres compacts détectables par LIGO, Virgo et KAGRA. L’ajout des détections permises par les futures prises de données devrait confirmer l’existence des trous dans la distribution globale en masses -- ou les exclure définitivement -- et améliorer notre compréhension des particularités que nous observons dans les distributions actuelles mais dont nous ne comprenons pas bien l’origine. Cela servira ensuite à placer de nouvelles contraintes sur des

phénomènes astrophysiques variés : comment les étoiles meurent, comment les astres compacts se rencontrent et se mettent à interagir gravitationnellement et de quoi l'Univers est fait.

## Glossaire

- **Accrétion** : Le processus par lequel du gaz ou toute autre forme de matière est attiré par la force de gravitation vers le cœur d'un corps céleste massif, comme un astre compact.
- **Astre compact** : Des astres très denses (naines blanches, étoiles à neutrons ou trous noirs) qui sont le dernier stade d'évolution d'étoiles massives.
- **Décalage vers le rouge** : voir redshift.
- **Étoile à neutrons** : Un astre très dense, composé principalement de neutrons et formé lors de la mort d'une étoile massive qui explose en supernova.
- **Évolution d'un système binaire isolé** : L'évolution d'un système binaire, formé au départ de deux étoiles qui ensuite meurent pour donner deux astres compacts, lesquels finissent par fusionner.
- **Formation dynamique** : La formation d'un système binaire suite à la rencontre fortuite de deux astres compacts dans un environnement dense.
- **Gigaparsec (Gpc)** : Une unité de longueur, égale à un milliard de parsecs, avec 1 parsec = environ 3,25 années-lumière, ou environ 30 000 milliards de kilomètres.
- **Masse primaire** : La masse de l'astre le plus lourd d'un système binaire. La masse de l'astre le plus léger est appelée masse secondaire.
- **Masse solaire ( $M_{\odot}$ )** : La masse du Soleil (environ  $2 \times 10^{30}$  kilogrammes). C'est une unité utilisée couramment en astronomie pour mesurer des masses.
- **Redshift** : une quantité utilisée comme échelle de distance cosmologique, basée sur le fait que [l'expansion de l'Univers](#) a pour conséquence l'augmentation de la longueur d'onde des ondes électromagnétiques. Pour la lumière visible, cela se traduit par un décalage ("shift") des couleurs vers le rouge ("red"), d'où le nom donné à ce paramètre : "redshift". Le redshift peut être utilisé comme une échelle de distance car, selon la [loi de Hubble-Lemaître](#), plus l'astre qui émet la lumière est distant et plus le décalage vers le rouge sera important.
- **Spin** : Le moment angulaire d'un astre compact (c'est-à-dire une mesure de son mouvement de rotation propre sur lui-même). Dans le cas d'une étoile à neutrons, c'est bien de la matière qui tourne ; pour un trou noir, c'est une propriété de l'espace-temps courbé qui entoure cette singularité.
- **Taux de formation des étoiles** : le taux auquel les étoiles se forment dans les nuages de gaz en fonction du temps cosmique.
- **Trou à basses masses** : L'absence d'observation d'astres compacts entre 3 et 5 masses solaires environ, c'est-à-dire entre les étoiles à neutrons les plus lourdes et les trous noirs les plus légers.
- **Trou à hautes masses** : L'absence de trous noirs de masses comprises entre 50 et 120 masses solaires environ, prédite par le phénomène de supernovæ à instabilité de paires -- voir également [ici](#) (lien en anglais).
- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps où la gravité est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.

## Pour en savoir plus

- Visitez nos sites internet
  - [LIGO](#)
  - [Virgo](#)
  - [KAGRA](#)



- Liens vers les communiqués de presse
  - [Virgo Website GWTC-3 news](#)
  - <https://www.ligo.org/news/index.php#GWTC3>
- Lisez gratuitement l'article scientifique complet [ici](#)
- Les données de O3b rendues publiques sont disponibles via le portail internet [www.gw-openscience.org/GWTC-3](http://www.gw-openscience.org/GWTC-3).