

Propriétés de la population des systèmes doubles de trous noirs dans l'Univers, obtenues à partir des résultats des prises de données O1 et O2

Si chaque nouvelle détection d'une onde gravitationnelle produit une vague d'euphorie (plus ou moins forte selon le type de découverte) qui se propage au sein des collaborations LIGO et Virgo, de nombreux résultats scientifiques associés ne peuvent être obtenus qu'en combinant les informations fournies par l'ensemble des signaux détectés. Considérée seule, une paire de trous noirs dont les masses sont de l'ordre de quelques dizaines de masses solaires pourrait être un cas particulier, non représentatif de la population de binaires de trous noirs (BTNs) dans l'Univers. Mais en observer sept ou huit fait émerger une tendance. [GW150914](#) a été la première détection de tels « trous noirs stellaires massifs » et ce fut une surprise pour beaucoup car les trous noirs observés jusqu'alors dans notre voisinage galactique étaient beaucoup plus petits et légers. Néanmoins, des astrophysiciens ont rapidement proposé des scénarios expliquant l'existence de trous noirs massifs ; ils supposent que ces astres se sont formés dans un environnement assez différent du système solaire. Le seul moyen de tester ces théories est d'observer la population la plus large et la plus variée possible de fusions de systèmes binaires de trous noirs.

Au cours des dernières années, le réseau global de détecteurs de deuxième génération (dits « avancés ») d'ondes gravitationnelles formé des interféromètres [LIGO](#) et [Virgo](#) a produit son premier catalogue de signaux d'ondes gravitationnelles. Ce [nouveau catalogue](#) (designé par l'acronyme « GWTC-1 », les initiales de son titre anglais « Gravitational-wave Transient Catalog 1 ») inclut tous les signaux détectés lors des deux premières périodes de prises de données. En particulier, il présente les observations de quatre fusions de systèmes binaires de trous noirs publiées pour la première fois, dont celle du système le plus massif jamais détecté. Au total, LIGO et Virgo ont découvert dix fusions de paires de trous noirs stellaires !

Cette moisson toujours plus fournie est un grand pas sur le chemin menant à la découverte des propriétés de la population « invisible » de trous noirs qui emplit notre Univers. Les résultats obtenus mettent en évidence une possible absence de trous noirs dont la masse dépasse cinquante fois celle du Soleil, des contraintes préliminaires sur les spins¹ de ces trous noirs et l'indication, encore à confirmer, que le taux de fusion de trous noirs était plus élevé plus tôt dans l'histoire de l'Univers.

Le catalogue de détections d'ondes gravitationnelles GWTC-1

Au cours des deux premières périodes de prises de données des détecteurs d'ondes gravitationnelles (OG) de deuxième génération [Advanced LIGO](#) et [Advanced Virgo](#), plus d'un an de données de bonne qualité a été enregistré. La première période, ou « run », de prises de données LIGO (appelée O1) s'est déroulée de septembre 2015 à janvier 2016 tandis que le deuxième run (O2) a commencé en novembre 2016 pour se terminer en août 2017. Virgo a rejoint LIGO pour la fin du run O2, les trois

¹ Mouvement de rotation propre de l'astre sur lui-même.

instruments formant ainsi le premier réseau mondial de détecteurs d'ondes gravitationnelles de deuxième génération.

[Dix fusions de systèmes binaires de trous noirs \(BTN\), ainsi qu'une fusion de deux étoiles à neutrons](#), ont été détectées pendant ces deux runs et forment la matière du [premier catalogue de signaux d'OGs](#) édité conjointement par les collaborations LIGO et Virgo. Les systèmes binaires de trous noirs stellaires sont l'une des étapes finales possibles de l'évolution d'étoiles massives : ils portent donc des informations sur les systèmes d'étoiles qui leur ont donné naissance et sur les environnements qui ont permis leur formation. Comme on peut le voir sur la figure 1, les trous noirs détectés par LIGO et Virgo sont manifestement différents de ceux qui ont été observés indirectement via des observations basées sur le spectre électromagnétique.

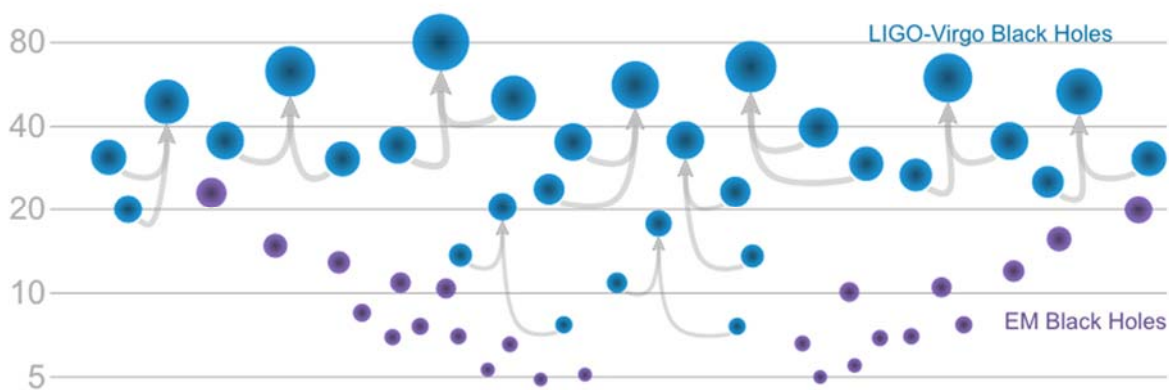


Figure 1 (Crédits : LIGO-Virgo / Frank Elavsky / Northwestern) : Masses des trous noirs connus, qu'ils aient été détectés par les collaborations LIGO et Virgo (disques bleus ; dans ce cas, la masse du trou noir issu de la fusion est également indiquée) ou indirectement par des observations électromagnétiques de binaires X (disques violets).

Quel est le lien entre les propriétés mesurées des BTN détectées à l'aide d'OGs et celles de la population astrophysique de BTN dans son ensemble ? De nombreux effets subtils doivent être pris en compte pour évaluer de manière juste ce qu'elles nous disent de cette population globale. A cause du bruit de mesure toujours présent dans les détecteurs, il est impossible de déterminer exactement les paramètres (masses, spins, etc.) d'un système double de trous noirs en train de fusionner : on peut seulement identifier les configurations les plus probables parmi l'ensemble des masses et des spins que peuvent avoir les deux astres formant l'un des systèmes doubles de trous noirs observés – ces « régions de l'espace des paramètres » sont l'équivalent des [incertitudes](#) (ou « [barres d'erreur](#) ») pour la mesure d'une quantité individuelle. De plus, plus les BTN sont massives et plus elles émettent des OGs intenses : elles peuvent donc être observées à des distances plus grandes que les systèmes plus légers – un effet que l'on appelle parfois le « biais de [Malmquist](#) ». Ainsi, on a tendance à observer plus de BTN massives car on y accède dans un volume d'Univers plus grand. Ce « [biais de sélection](#) » pourrait expliquer en partie pourquoi les BTN détectées ont des composants dont les masses sont plutôt de l'ordre de trente à quarante fois la masse du Soleil plutôt de 10-15 masses solaires.

Il est possible de quantifier ces effets de sélection des sources et de prendre en compte les incertitudes de mesure pour estimer la probabilité de détecter tel ou tel type de BTN. A partir de ces calculs, on peut remonter à la population sous-jacente des BTN dans leur ensemble. Comme le nombre d'observations est réduit (une dizaine au total), il faut utiliser des hypothèses raisonnables (basées sur ce que nous savons par ailleurs) pour combler les lacunes du modèle. En statistique, cette démarche s'appelle [l'inférence bayésienne](#).

Distribution en masse des systèmes binaires de trous noirs

Les observations d'OGs provenant de trous noirs ont déjà eu un impact sur l'astrophysique stellaire. La plupart des trous noirs détectés par LIGO et Virgo sont plus lourds que la population de trous noirs stellaires connue auparavant – grâce aux observations électromagnétiques de [binaires X](#). Cela nous dit quelque chose sur l'origine de ces trous noirs : [où et comment ils ont pu se former](#). Le fait d'avoir désormais plus d'événements à analyser permet d'aller un cran plus loin : maintenant que nous savons que les trous noirs massifs existent, pouvons-nous estimer la variation du taux de fusions des BTN en fonction de la masse de leurs composants ?

La distribution de masse « classique » suit une [loi de puissance](#). La probabilité $p(m)$ qu'un trou noir ait une masse m décroît comme la masse élevée à une certaine puissance : $p(m) \propto m^{-\alpha}$, où α est la pente de la loi de puissance – plus sa valeur est grande et plus la probabilité décroît rapidement lorsque la masse du trou noir augmente. A l'aide de l'inférence bayésienne et d'un catalogue de masses mesurées, on peut estimer la valeur du paramètre du modèle : α . Par exemple, la distribution de masse des étoiles massives est décrite par une loi de puissance de paramètre $\alpha=2,3$.

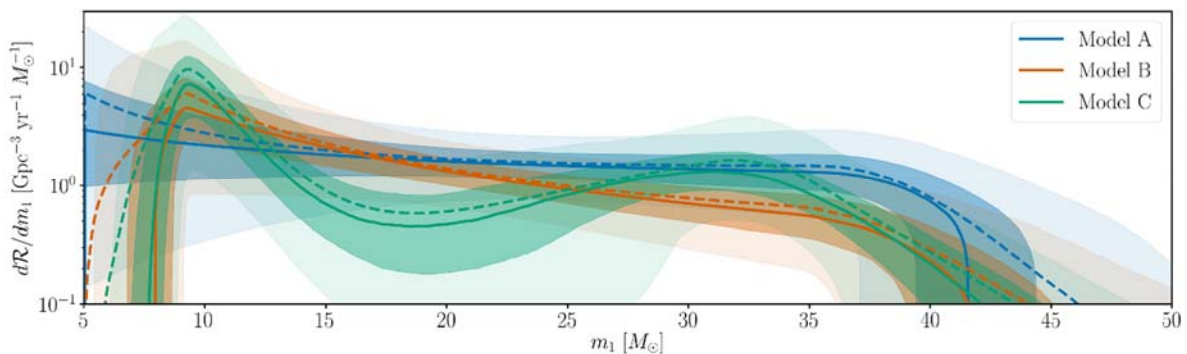


Figure 2 (adaptée de la figure 1 de la [publication scientifique](#)) : Variation, par unités de volume et de temps, du nombre de trous noirs qui fusionnent au sein d'un système binaire en fonction de leur masse. Les résultats obtenus pour trois modèles différents sont présentés : le modèle A est le plus simple, le modèle C le plus complexe. Dans chaque cas, la ligne continue, la zone ombrée foncée et la zone ombrée claire représentent respectivement la courbe médiane, l'intervalle de crédibilité à 50% de confiance et celui à 90% de confiance. Enfin, la ligne pointillée montre la distribution de la population a posteriori, c'est-à-dire la distribution de probabilité de la masse d'un trou noir typique de cette population.

Pour la présente analyse, de nombreux modèles de distribution de masse ont été étudiés : ils sont plus compliqués que la simple loi de puissance décrite ci-dessus et incorporent des prédictions astrophysiques plus sophistiquées. Par exemple, les masses minimale et maximale ne sont pas fixées a priori : elles sont [ajustées sur les données](#). Le modèle C par exemple (voir figure 2 ci-dessus) est plus complexe : il mélange une loi de puissance et une [distribution gaussienne](#). Cette seconde composante du modèle permet de tenir compte d'une éventuelle accumulation de trous noirs à haute masse. La figure 2 montre l'évolution du taux de fusion de BTN en fonction de la masse des trous noirs pour trois modèles différents.

En particulier, les trois modèles concluent qu'il n'y a pratiquement pas de fusion de système double de trous noirs de masse supérieure à 45 masses solaires chacun. En effet, les fusions de trous noirs massifs sont détectables jusqu'à des distances cosmologiques très importantes – ainsi, LIGO et Virgo sondent une population de trous noirs plus massifs que ceux qui avaient été observés indirectement jusqu'alors, via des émissions de rayons X. Donc, si des systèmes doubles de trous noirs pesant chacun entre 45 et une centaine de masses solaires existaient, LIGO et Virgo auraient dû en détecter certains et mesurer les masses des deux astres avec une précision suffisante pour comprendre qu'ils étaient très massifs. Or, les signaux des dix fusions de trous noirs publiées dans le catalogue sont tous compatibles avec des masses individuelles inférieures à 45 fois celle du Soleil. On peut donc conclure avec confiance qu'il y a très peu (voire pas du tout) de BTN dont les composants sont plus lourds. Ce résultat est en accord avec les modélisations des supernovæ qui prédisent un creux dans le spectre de masse des trous noirs entre ~ 50 et ~ 130 masses solaires, dû au phénomène de « supernovæ par production de paires » (voir glossaire). Les trois modèles sont en accord entre eux, même si celui qui autorise une composante gaussienne à haute masse est légèrement favorisé par les données – une indication assez ténue que la distribution de masse des BTN pourrait être différente d'une simple loi de puissance.

Distributions en spin

Les observations en OG de fusions de systèmes doubles d'astres compacts donnent également des informations sur la manière dont leurs composants tournent sur eux-mêmes : à la fois sur la vitesse de la rotation (« l'intensité du spin ») et sur l'inclinaison de l'axe de rotation par rapport au plan de l'orbite du système binaire (« l'inclinaison du spin »). Ces deux quantités peuvent apporter des informations uniques sur *comment* et *quand* les trous noirs qui ont fusionné s'étaient formés. Par exemple, les mesures de l'intensité du spin nous renseignent sur la manière dont les différentes couches à l'intérieur de l'étoile massive progénitrice ont interagi. L'inclinaison des spins peut aider à déterminer l'intensité des explosions de supernova qui ont formé les trous noirs et à savoir si le système binaire était un couple d'étoiles isolées ou s'il s'est formé dans un milieu interstellaire dense, comme un [amas globulaire](#), lors d'interactions dynamiques entre étoiles.

Les données du catalogue privilégient une faible intensité de spin, particulièrement dans le cas où les deux trous noirs sont en rotation dans le même sens que le système binaire. La figure 3 montre la distribution estimée des intensités de spin en utilisant un modèle où elle suit une [loi de probabilités bêta](#). La distribution des inclinaisons de spins

est globalement moins contrainte (en particulier parce qu'il est plus difficile d'identifier l'axe d'une rotation lorsque l'intensité du mouvement est faible) et donc aucune conclusion ne peut être tirée pour le moment. Les données ne privilégient ni l'hypothèse « spins alignés », ni celle de spins orientés de manière isotrope, ni une situation intermédiaire entre ces deux extrêmes.

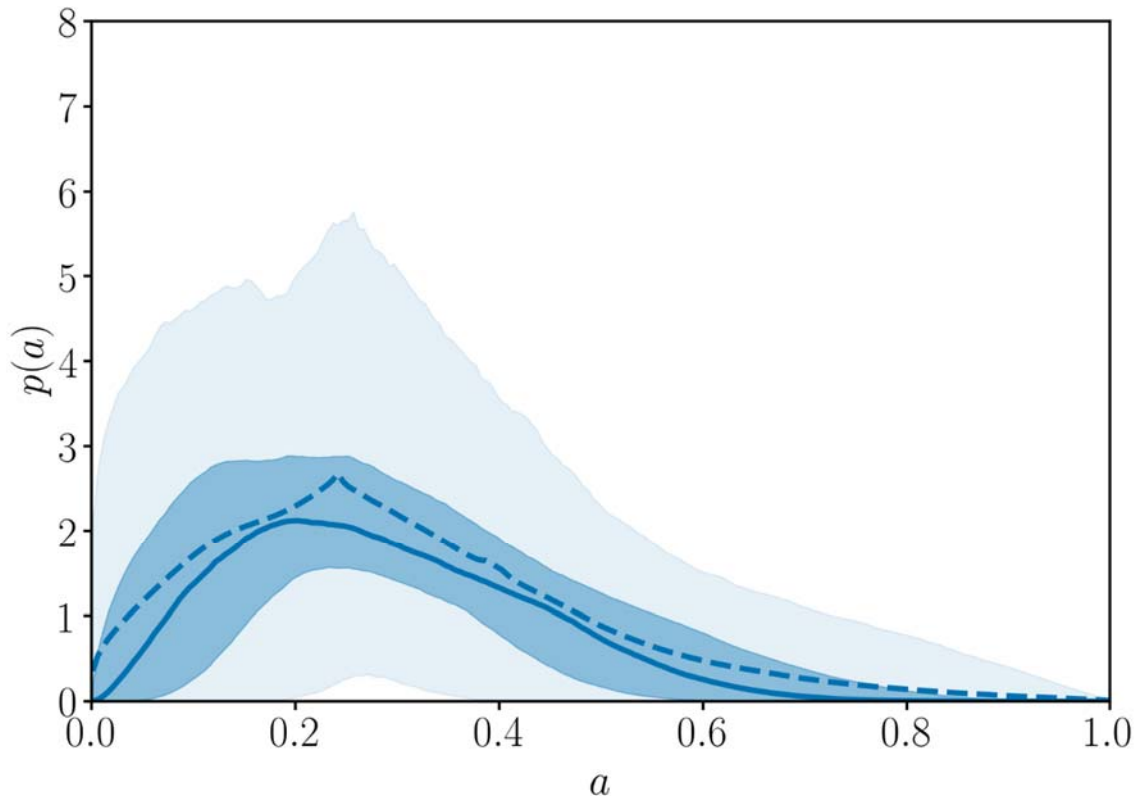


Figure 3 (adaptée de la figure 7 de la [publication scientifique](#)) : Distribution de probabilité calculée pour l'intensité du spin des trois noirs dans le cadre de la modélisation utilisée pour cette analyse. Dans le système d'unités choisi, 1.0 est la valeur maximale du spin d'un trou noir permise par la théorie de la relativité générale. Comme pour la figure précédente, la ligne continue, la zone ombrée foncée, la zone ombrée claire et la ligne pointillée représentent respectivement la probabilité médiane, l'intervalle de crédibilité à 50% de confiance, celui à 90% de confiance et enfin la distribution de probabilité a posteriori

Evolution du taux de fusion en fonction du décalage vers le rouge

Le catalogue de signaux GWTC-1 permet également d'estimer le nombre moyen de fusions de BTN par unité de temps et de volume d'espace en fonction du [décalage vers le rouge](#) : $R(z)$. Une approximation naïve serait de dire que ce taux est constant par [volume comobile](#), c'est-à-dire que chaque galaxie contribue de manière approximativement constante au taux de fusions lors de l'évolution de l'Univers. Cependant, la variation du taux de fusion dépend probablement de facteurs supplémentaires (comme le taux de formation des étoiles en fonction du décalage vers le rouge) qui ne sont pas constants au cours du temps. Pour compliquer encore plus cette étude, la détection d'un signal à un décalage vers le rouge donné dépend des

propriétés intrinsèques du système binaire, en particulier de la masse des deux astres qui le composent.

Les estimations de l'évolution du taux de fusion sont représentées en bleu sur la figure 4. Les lignes rouge et jaune montrent des modèles dans lesquels le taux de fusion est supposé constant lors de l'évolution de l'Univers et où la distribution de masses est fixée, soit en loi de puissance, soit constante en échelle logarithmique. Bien qu'il ne soit pas possible de dégager une tendance claire pour l'évolution du taux de fusion en fonction du décalage vers le rouge, il y a 88% de chance que ce taux augmente avec le décalage vers le rouge. Cela signifie que, dans notre Univers local, il est probable qu'il y ait plus de fusions de systèmes binaires de trous noirs à des décalages vers le rouge plus élevés. C'est en accord avec le taux de formation d'étoiles dans l'Univers qui était également plus élevé dans le passé de l'Univers et dont le pic est atteint pour un décalage vers le rouge proche de deux.

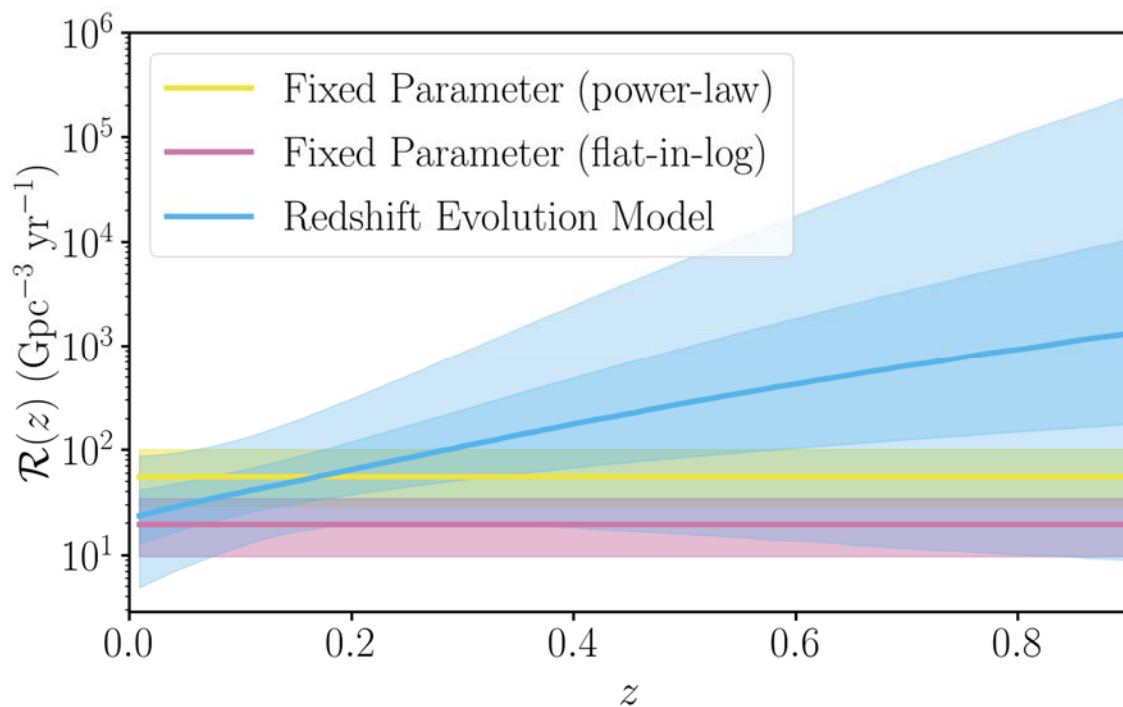


Figure 4 (adaptée de la figure 5 de la [publication scientifique](#)) : Ce graphique montre les contraintes obtenues sur l'évolution de la densité du taux de fusion de BTN en fonction du décalage vers le rouge pour différents modèles. Comme pour les figures précédentes, la ligne continue, la zone ombrée foncée et la zone ombrée claire représentent respectivement la probabilité médiane, l'intervalle de crédibilité à 50% de confiance, et celui à 90% de confiance.

Conclusions et perspectives

Au fur et à mesure que le catalogue de BTN grossira avec les prises de données successives, les incertitudes sur les paramètres des modèles de population diminueront et l'on verra ceux que les données favorisent. Parmi toutes les questions astrophysiques ouvertes, cette analyse pourra améliorer nos connaissances :

- de la formation des trous noirs via les explosions de supernovæ ;

- de la manière dont les interactions dans les systèmes binaires impactent les étoiles massives ;
- de la dynamique intrinsèque des amas interstellaires denses ;
- enfin, de l'histoire de la formation des trous noirs au fur et à mesure de l'évolution de l'Univers.

Glossaire

- **Biais de Malmquist** : Le fait que les astres les plus brillants sont détectés de manière préférentielle.
- **Binaire X** : Un système double qui inclut un astre compact qui accrète de la matière provenant de l'autre étoile. Cette matière s'échauffe à mesure qu'elle est aspirée et émet une grande quantité de rayons X.
- **Décalage vers le rouge** : Le fait que la longueur d'onde de la lumière est plus grande à l'endroit où elle est détectée que là où elle a été émise. Dans le cas d'un rayon lumineux qui voyage sur des distances cosmologiques, le décalage vers le rouge est principalement dû à l'expansion de l'Univers et peut donc être utilisé pour mesurer la distance des objets lointains.
- **Inférence bayésienne** : Une méthode statistique qui réévalue la probabilité d'une hypothèse donnée à mesure que les indices en sa faveur s'accumulent.
- **Période de prise de données** : Une période d'observation pendant laquelle les détecteurs d'ondes gravitationnelles prennent des données qui seront analysées ensuite.
- **Supernova par production de paires** : Un type particulier de supernova qui se produit lorsque la pression de radiation d'une étoile massive – capable de contrebalancer la tendance à l'effondrement de l'étoile sur elle-même due à la gravitation – est affaiblie par la production de paires électron-positron. Cela provoque la destruction totale ou partielle de l'étoile.
- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps si courbée par la présence d'un astre extrêmement compact que la gravité y est suffisamment intense pour que rien, pas même la lumière, ne puisse s'en échapper.
- **Volume comobile** : Un volume d'espace défini de telle manière qu'il enfle au cours du temps de la même manière que les structures s'éloignent dans l'Univers à cause de l'expansion de ce dernier. Un volume comobile donné contient en moyenne un nombre constant de galaxies indépendamment du temps.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Visitez nos sites internet : <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- Lisez [ici](#), gratuitement et en ligne, l'article scientifique complet.
- Lisez [ici](#) l'article scientifique sur le catalogue GWTC-1, gratuitement et en ligne.
- Explorez les données du catalogue [ici](#), sur le site internet « [Gravitational Wave Open Science Center](#) ».