



# Tester la Relativité Générale avec les ondes gravitationnelles détectées pendant la prise de données LIGO-Virgo O3a

Daté du 29 octobre 2020. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3aTGR>.

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

\*\*

\*

Avant la détection d'ondes gravitationnelles produites lors de [fusions de trous noirs](#), la [théorie de la Relativité Générale](#) d'Einstein n'avait pas encore été poussée dans ses derniers retranchements. En effet, de tels tests ne peuvent pas être réalisés en laboratoire, ni même dans le système solaire. Les fusions de trous noirs produisent des champs gravitationnels parmi les plus forts et les plus dynamiques autorisés par la relativité générale. L'observation de telles fusions valide ainsi directement deux prédictions de la théorie.

1. Les ondes gravitationnelles peuvent être détectées directement.
2. Des fusions de trous noirs se produisent dans l'Univers

Mais s'agit-il vraiment des ondes gravitationnelles et des trous noirs prédits par la théorie d'Einstein ou bien d'autres choses, ressemblantes mais néanmoins différentes ? Et donc, que pouvons-nous apprendre des ondes gravitationnelles qui portent la marque de la source les ayant produites ?

LIGO et Virgo ont utilisé toutes les détections passées décrites dans le [catalogue GWTC-1](#) pour tester la relativité générale. Et, plus récemment, les événements individuels [GW190425](#), [GW190412](#), [GW190814](#) et [GW190521](#). Jusqu'à maintenant, la théorie d'Einstein a passé tous ces tests avec succès ! Mais nous avons maintenant beaucoup plus de fusions de trous noirs à disposition pour ces études, grâce au catalogue GWTC-2. En plus d'étendre les analyses déjà menées dans le passé aux nouveaux événements, leur nombre permet de réaliser de nouveaux tests. Afin de chercher des incompatibilités avec la relativité générale, nous envisageons des différences par rapport à cette théorie, comme des termes supplémentaires dans les équations ou des paramètres pouvant prendre d'autres valeurs que celles prédites par la relativité générale. Nous regardons ensuite si ces hypothèses conduisent à un meilleur modèle pour expliquer les données. Pour ces diagnostics, nous utilisons des méthodes de [traitement du signal](#) associées à une [analyse statistique](#). Cette démarche fournit une description statistique des données que nous pouvons comparer aux prédictions de la relativité générale. D'éventuelles différences peuvent avoir trois origines.

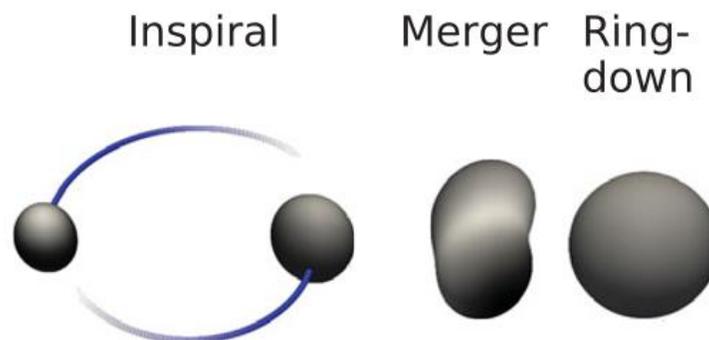
1. Le fait que les données contiennent du **bruit** aléatoire. Dans nos détecteurs, nous mesurons toujours la somme de deux composantes : un éventuel signal d'onde gravitationnelle auquel s'ajoute du bruit de mesure.

2. Dans la plupart des cas, nous faisons des approximations afin de déterminer le résultat auquel s'attendre dans le cadre la relativité générale. Et ces approximations peuvent ne pas être assez précises – voire même être invalides – pour certains événements.
3. La relativité générale est peut-être imparfaite ; dans ce cas elle pourrait nécessiter des corrections lorsqu'on étudie des événements aussi extrêmes que des fusions de trous noirs.

En pratique, ces remarques signifient qu'il est difficile d'attribuer à la relativité générale une différence entre observations et prédictions puisque le bruit et d'éventuelles approximations peuvent brouiller les pistes. Mais, à l'inverse, il est possible de vérifier que les prédictions et les observations sont compatibles entre elles. Et c'est ce que nous avons fait !

Nos [résultats précédents](#) ont montré que plusieurs événements du catalogue GWTC-1 ne passent certains tests que de justesse. Mais nous avons maintenant plus d'événements à disposition parmi lesquels choisir. Le fait de détecter ou non une fusion de trous noirs dépend de la correspondance entre les fréquences du signal et la gamme de fréquence dans laquelle un détecteur est sensible. Des trous noirs plus lourds fusionnent à des fréquences orbitales plus basses et produisent donc des ondes gravitationnelles de basses fréquences. Celles-ci sont encore plus basses lorsque le signal est détecté sur Terre à cause du décalage vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers. Par conséquent, en fonction de son contenu en fréquence, un événement donné pourra ne pas être utilisable pour tous les tests.

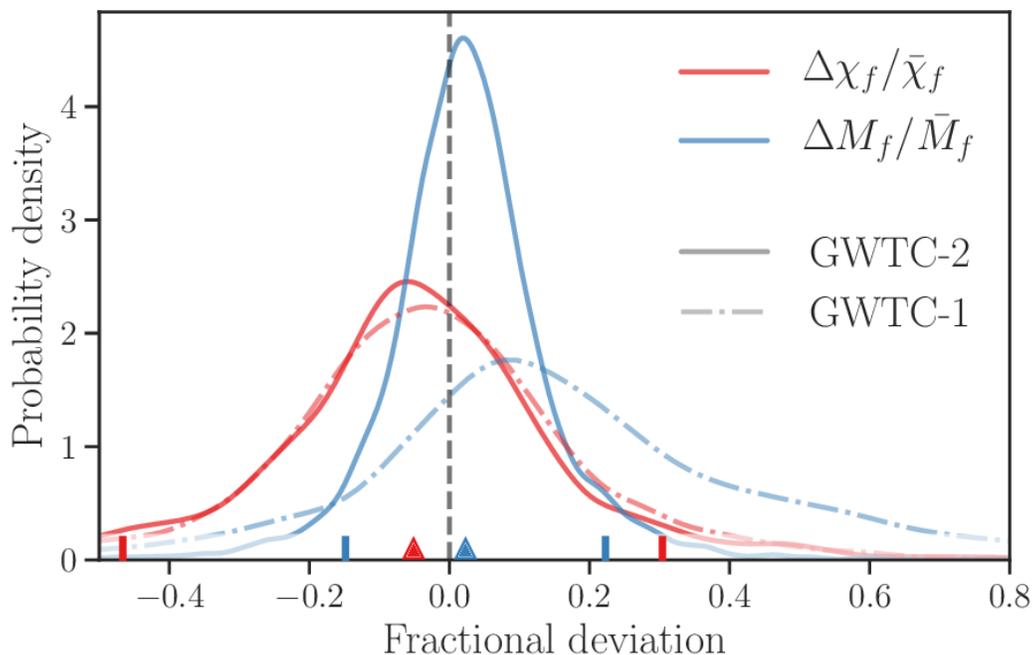
## Comparer des portions du signal d'onde gravitationnelle avec les prédictions de la relativité générale



*Figure 1 : Représentation des trois étapes de la collision de deux trous noirs: approche, fusion et relaxation. Adapté de la figure 2 de [l'article original sur GW150914](#).*

La relativité générale pose les lois qui régissent les trous noirs. Elle prédit notamment que toutes les propriétés d'un **trou noir** peuvent s'exprimer en fonction de deux paramètres : sa masse et son moment angulaire propre (ou **spin**). Dans le cas d'un système de deux trous noirs en orbite l'un autour de l'autre, on a donc déjà deux masses et deux spins – un pour chaque astre. De plus, il faut prendre en compte les deux directions des axes de spin (l'axe autour duquel un trou noir donné tourne) et la distance entre les deux astres. Fixer ces éléments détermine complètement l'évolution du système – voir Figure 1.

La configuration initiale évolue en perdant de l'énergie, émise en continu sous forme d'ondes gravitationnelles. En conséquence, l'orbite se réduit et la fréquence de révolution augmente. C'est ce qu'on appelle la phase d'approche, ou phase spiralante (« inspiral » en anglais). Ensuite, les deux trous noirs fusionnent pour n'en former qu'un seul avec sa propre masse et son propre spin. Mais ce trou noir naît déformé et excité (c'est-à-dire avec un trop plein d'énergie). La relativité générale prédit que le trou noir final va alors revenir à l'équilibre en émettant des ondes gravitationnelles, un état à nouveau caractérisé uniquement par sa masse et son spin. Nous pouvons mettre ce scénario à l'épreuve car les trous noirs initiaux portent en eux les caractéristiques du trou noir qu'ils engendreront en fusionnant. De plus, les détails de la **phase de relaxation** (« ringdown » en anglais) sont également déterminés par la relativité générale.



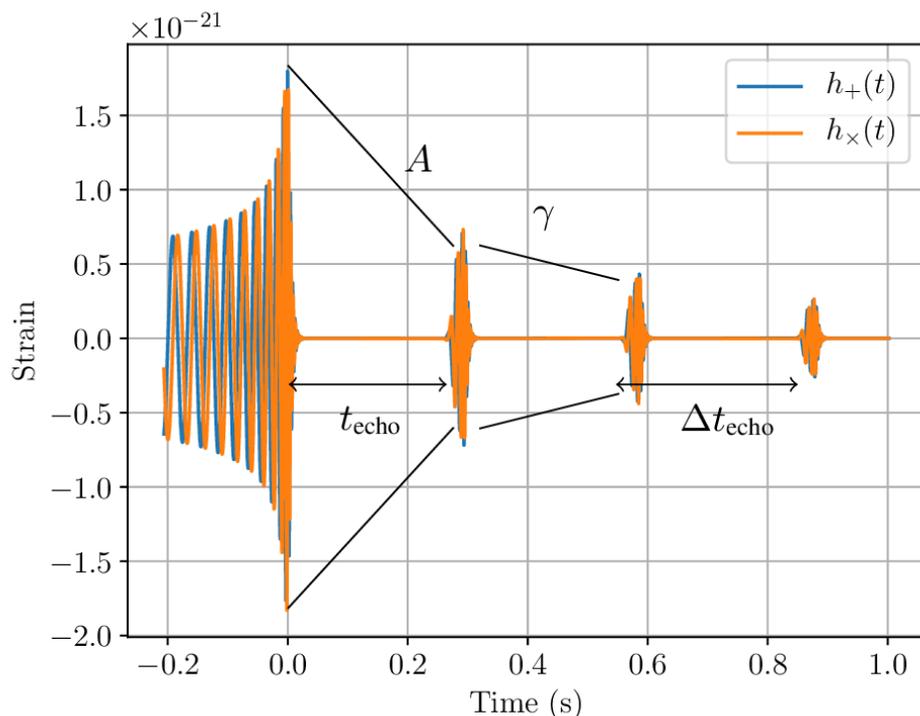
**Figure 2** : Comparaison entre les masses ( $M_f$ , courbes bleues) et les spins ( $\chi_f$ , courbes rouges) des trous noirs finals obtenus en analysant soit la phase spiralante, soit la phase de relaxation de la fusion de trous noirs. L'axe des abscisses donne la « différence fractionnaire » entre les deux estimations, c'est-à-dire la différence entre les deux valeurs calculées divisée par la moyenne des deux valeurs. Ainsi, la ligne verticale pointillée noire à 0.0 correspond à la prédiction de la relativité générale : aucune différence entre les résultats des deux calculs. Les courbes montrent les densités de probabilités (sur l'axe des ordonnées) de cette « différence fractionnaire », c'est-à-dire la manière dont cette quantité se distribue parmi les fusions de trous noirs testés. Les courbes pleines donnent les résultats pour le catalogue GWTC-2 tandis que celles en pointillés rappellent ceux du catalogue GWTC-1. On peut remarquer que les estimations des masses sont maintenant bien mieux en accord avec la théorie (la courbe est nettement plus « piquée » autour de 0) alors que la situation n'a pas beaucoup évolué pour les spins.

Ce graphique est la Figure 4 de la [publication scientifique associée](#).

Les phases spiralante et de relaxation peuvent être analysées séparément et nous pouvons vérifier ensuite si elles sont compatibles entre elles. Dans le cadre de la relativité générale, la connaissance détaillée de la phase spiralante permet en effet a priori d'en déduire les caractéristiques de la phase de relaxation. Et donc, ces phases sont-elles compatibles pour les événements du catalogue GWTC-2 ? Bien que le bruit et les approximations théoriques limitent la précision de cette comparaison, nous avons bel et bien observé une correspondance. Les résultats sont présentés sur la Figure 2.

On peut faire l'analogie entre un trou noir déformé et une cloche qui vibre. Si vous frappez une cloche, elle produit une combinaison de sons purs – les fréquences de résonance de la cloche. Mais en un temps court qui dépend de la cloche, le son s'éteint – il s'atténue. De manière semblable, la relativité générale prédit les fréquences et les temps d'atténuation des ondes caractéristiques de la phase de relaxation. On peut donc comparer la phase de relaxation attendue sur la base de la phase spiralante avec celle qui est effectivement observée. Même si la précision de ce test n'est pas très bonne (cela devrait s'améliorer avec de futures détections supplémentaires), ses résultats restent cohérents avec la théorie de la relativité générale.

## Certains trous noirs présumés seraient-ils des imposteurs?



**Figure 3** : Un scénario possible d'échos produit par un imitateur de trou noir. De gauche à droite, on observe le signal suivi d'une série de copies déformées dues à la réflexion des ondes gravitationnelles sur la surface de l'imitateur.

Image de R.K.L. Lo.

Une fusion de trous noirs libère une énergie phénoménale qui, dans beaucoup de cas, éclipe le reste de l'univers. Et si cette radiation venait de quelque chose ressemblant à un trou noir de la



relativité générale sans en être ? Un « **imposteur** » ! Différents types d'imposteurs ont été proposés sur le plan théorique. Ils ont une masse importante concentrée dans un petit volume tout comme un vrai trou noir mais ils ont aussi quelque chose de différent. Les imposteurs ne sont pas entièrement décrits par leur masse et leur spin, comme le prédit la relativité générale pour « ses » trous noirs. Par exemple, la propriété bien connue de sens unique qui caractérise [l'horizon d'un trou noir](#) (on peut y entrer mais pas en ressortir) pourrait être différente chez les imitateurs. Pour certains d'entre-eux l'horizon serait même remplacé par une surface semblable à un miroir. Dans ce scénario, les ondes gravitationnelles qui devraient normalement être absorbées par le trou noir nous seraient renvoyées, créant ainsi des **échos** du signal original (la Figure 3 représente ce phénomène). Nous n'avons observé aucune preuve tangible de l'existence de tels échos.

Mais la relativité générale pourrait être prise en défaut par un autre type d'imitateur pour lequel l'horizon existe mais qui a une forme différente de celle attendue pour un trou noir. Nous savons que les objets en rotation ont tendance à s'aplatir. Cette propriété est vraie pour la Terre et un petit télescope permet déjà de l'observer clairement pour la planète Jupiter. Cet aplatissement peut donc impliquer la gravitation même lorsqu'il n'est pas nécessaire de faire appel à la relativité générale. Lorsque l'objet en rotation est un trou noir, l'aplatissement dépend de manière précise de sa masse et de son spin mais ceci n'est pas nécessairement vrai pour un imposteur qui pourrait avoir une forme différente. De nombreuses fusions de trous noirs ont été étudiées pour rechercher une telle différence : rien de significatif n'a été trouvé.

## **Les ondes gravitationnelles voyagent longtemps après la fusion avant de nous atteindre**

Les couleurs de l'arc-en-ciel se cachent en plein soleil mais apparaissent soudain quand une goutte d'eau disperse la lumière. L'espace-temps peut-il séparer les « couleurs » (c'est-à-dire les fréquences) contenues dans une onde gravitationnelle ? La relativité générale dit que non. Mais d'autres théories autorisent un [graviton](#) massif ce qui permettrait la dispersion des ondes gravitationnelles. Nous observons des ondes gravitationnelles qui ont voyagé des milliards d'années. Si les gravitons ont une masse, ils auront eu de nombreuses opportunités de produire un phénomène de dispersion mesurable au cours de leur long trajet jusqu'à nous. Cela signifie donc que nous pouvons détecter la dispersion des gravitons même pour de très petites masses. Nous pouvons aussi essayer d'amplifier un effet systématique dû à la masse du graviton en combinant l'information contenue dans chaque événement détecté. En utilisant les données les plus récentes du catalogue GWTC-2, nous concluons que la masse du graviton doit être inférieure à  $1,76 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$  – car elle aurait été détectée si elle avait été plus grande. Ce résultat est une amélioration d'un facteur 2,7 par rapport à la limite supérieure précédente. Pour comparaison, le neutrino le plus léger, la particule massive qui a la plus petite masse connue, a une masse d'au moins 0,009 eV/c<sup>2</sup>, soit environ 5 milliards de milliards de fois plus grande que notre nouvelle limite ! Ce nouveau résultat va restreindre la gamme des théories alternatives à la relativité générale et qui prédisent une masse non nulle pour le graviton.

\*\*

\*



## Résumé

Alors ? Quelles réponses apporter aux questions que nous avons posées au début de cet article ? Einstein avait-il raison ? La relativité générale est-elle la bonne théorie de la gravitation ? Nous avons comparé les prédictions de cette théorie avec nos dernières observations de fusion de trous noirs, mais aussi avec les anciennes données pour les nouveaux tests ajoutés à notre panoplie. Dans la plupart des cas, nous pouvons combiner les résultats des différents événements pour renforcer nos conclusions. La conclusion est que, en tenant compte du bruit de mesure et des approximations nécessaires, tout ce que nous avons trouvé est compatible avec la relativité générale. Comme le montre nos graphiques, certains tests ne permettent pas encore de conclusion forte. À l'avenir, nous nous attendons à détecter toujours plus de fusion de trous noirs qui nous aideront à apporter de meilleures réponses à ces interrogations fondamentales.

## Glossaire

- **Bruit** : Fluctuation aléatoire dans les données due à divers effets instrumentaux et environnementaux. La sensibilité d'un détecteur est limitée par le bruit.
- **Écho** : Ce phénomène décrit la duplication d'un signal causée par sa réflexion sur la surface d'un imitateur, analogue à un écho sonore ordinaire où le son revient à l'émetteur après s'être réfléchi sur une surface.
- **eV/c<sup>2</sup>** : Une unité de masse. L'électron-volt (eV) est une unité d'énergie utilisée, par exemple, pour mesurer l'énergie nécessaire pour extraire un électron d'un atome. Puisque, selon Einstein,  $E = mc^2$  (où  $E$  est l'énergie de repos d'un corps,  $m$  sa masse et  $c$  la vitesse de la lumière), diviser une énergie en eV par le carré de la vitesse de la lumière (en m/s) donne une masse.
- **Graviton** : La particule hypothétique qui est sensée composer les ondes gravitationnelles tout comme les photons composent la lumière. La relativité générale ne fait pas appel au concept de graviton mais, si ce dernier existe, elle impose que sa masse soit nulle (tout comme celle du photon) puisque la « vitesse de la gravitation » est égale à celle de la lumière.
- **Imitateur** : Un astre compact ressemblant à un trou noir, qui peut être détecté par les ondes gravitationnelles qu'il émet mais qui ne présente pas toutes les caractéristiques prédites par la relativité générale pour un trou noir.
- **Phase de relaxation** : La phase finale de la fusion d'un système binaire de trous noirs où le trou noir asymétrique final émet des ondes gravitationnelles en revenant à l'équilibre.
- **Spin** : Quantité qui mesure la vitesse à laquelle un objet tourne sur lui-même.
- **Trou Noir** : Une région de l'espace-temps contenant une masse très compacte et où la gravitation est tellement forte que rien ne peut en sortir, pas même la lumière.

## Pour en savoir plus

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



- Lisez l'annonce des découvertes du run O3a sur les sites internet de
  - Virgo : <https://www.virgo-gw.eu/GWTC-2> (cliquez sur le drapeau tricolore pour la version française) et
  - LIGO : <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20201028>.
- L'article scientifique complet, *Tests of General Relativity with Binary Black Holes from the second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog*, est accessible gratuitement [ici](#).
- Les données des 39 événements découverts lors du run O3a sont disponibles sur le portail du GWOSC : <https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2>. Le site internet « Gravitational Wave Open Science Center » offre de nombreuses ressources (documentation sur le domaine, exemples de programmes informatiques et tutoriels) pour aider à l'exploration de ces lots de données publiques.
- Les trois autres articles mis en ligne le même jour sur le serveur de prépublications en ligne arXiv sont :
  - [GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run](#)
  - [Population Properties of Compact Objects from the Second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog](#)
  - [Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Detected by Fermi and Swift During the LIGO-Virgo Run O3a](#)