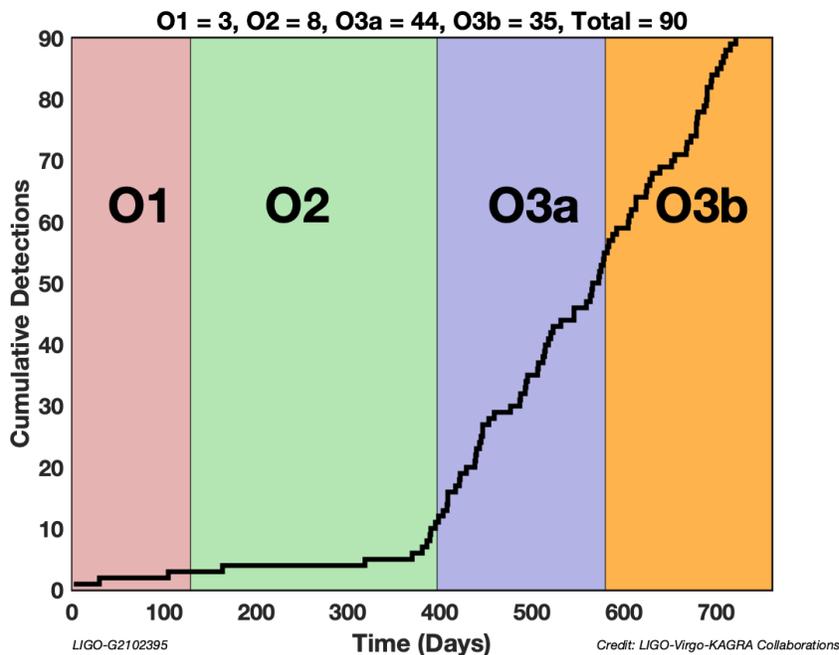


## Est-ce que la théorie de la gravitation d'Einstein est toujours en accord avec les récentes observations d'ondes gravitationnelles par LIGO, Virgo et KAGRA ?

Daté du 20/12/2021. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3bTGR/index.php>.

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

### Introduction



**Figure 1** : Durée (en jours) des trois premières périodes d'observation des détecteurs Advanced LIGO et Advanced Virgo (O1: 09/2015 → 01/2016; O2: 11/2016 → 08/2017; O3: 04/2019 → 03/2020) et nombre cumulé d'évènements candidats d'ondes gravitationnelles publiés dans la mise à jour GWTC-3 du catalogue LIGO-Virgo. Comme mentionné dans le texte, seule une partie de ces systèmes binaires ont été utilisés pour tester la relativité générale.

Les ondes gravitationnelles sont produites par des masses qui accélèrent avec une accélération variable. Ces ondes transmettent des informations sur leurs sources et peuvent être visualisées comme des ondulations de la courbure de l'espace-temps. La théorie de la relativité générale d'Einstein prédit l'existence et les propriétés des ondes gravitationnelles. Dans cette théorie, ces ondes se déplacent à la vitesse de la lumière, et cette vitesse de propagation est indépendante de la fréquence de l'onde. La théorie prédit également que les ondes gravitationnelles ont deux modes de **polarisation** indépendants, appelés "plus" et "croix". En outre, la théorie de la relativité générale prédit la dynamique de l'espace-temps (c'est-à-dire la manière dont il "vibre"), laquelle

conduit à la génération d'ondes gravitationnelles, par exemple dans le cas de collisions de **trous noirs** et/ou d'**étoiles à neutrons**. Les détections d'ondes gravitationnelles provenant de la fusion de systèmes binaires constitués de trous noirs et d'étoiles à neutrons par le réseau de détecteurs Advanced LIGO/Virgo offrent donc une occasion unique de vérifier les prédictions de la relativité générale et de rechercher une éventuelle nouvelle physique qui compléterait cette théorie.

Avec le catalogue le plus récent d'ondes gravitationnelles transitoires GWTC-3, les détecteurs LIGO/Virgo ont détecté environ 90 fusions de systèmes binaires compacts de tous les types: deux trous noirs, deux étoiles à neutrons et, plus récemment, une étoile à neutrons et un trou noir. Parmi ces 90 événements, 35 fusions de systèmes binaires sont nouvelles : elles ont été enregistrées lors de la seconde moitié de la **troisième période d'observation LIGO-Virgo**, appelée O3b. Dans cet article, nous combinons les observations les plus récentes avec les détections plus anciennes, afin de rechercher d'éventuelles déviations par rapport aux prédictions de la relativité générale.

Toute expérience basée sur des mesures est confrontée à la présence de bruit dans ses données et les détecteurs d'ondes gravitationnelles ne font pas exception. Lorsque nous recherchons des écarts par rapport à la théorie de la relativité générale, certains types de bruit présents dans les détecteurs pourraient les imiter, ce qui crée le risque que nous concluions à tort à une déviation là où il n'y en a en fait pas. Par conséquent, nous limitons notre analyse aux seules détections les plus nettes, c'est-à-dire celles dont les signaux sont suffisamment forts. Le critère choisi est qu'il faut attendre en moyenne au moins 1000 ans avant que des fluctuations du bruit ne copient l'onde gravitationnelle observée. Cela nous donne 15 événements à analyser parmi les 35 du lot O3b et nous effectuons avec ces données neuf tests différents qui recherchent des déviations par rapport à la relativité générale. Le résumé des résultats de ces analyses est présenté ci-dessous.

## Tests de cohérence

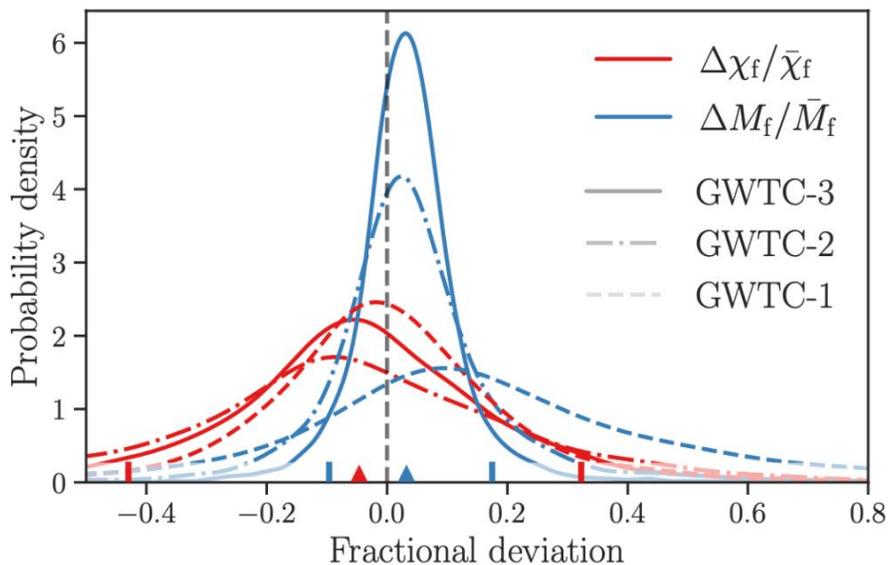
### Cohérence générale du signal avec les données : le test des résidus

Nous utilisons les **formes d'onde** prédites par la relativité générale pour détecter et interpréter les événements d'ondes gravitationnelles issus de la fusion de systèmes binaires d'astres compacts. Le test le plus simple consiste à soustraire des données observées la forme d'onde gravitationnelle qui correspond le mieux au signal observé dans le cadre de la théorie. Le résidu laissé par cette procédure (c'est-à-dire la différence entre les données et le signal) doit s'expliquer par des fluctuations de bruit si la relativité générale est correcte. Pour tous les événements étudiés, nous avons constaté que le résidu est en accord avec nos connaissances des bruits des détecteurs, ce qui prouve la cohérence globale des données avec les prédictions de la relativité générale.

### Cohérence interne de la forme d'onde : le test de cohérence spirale-fusion-relaxation

Les ondes gravitationnelles provenant de la fusion d'étoiles à neutrons et de trous noirs présentent trois phases d'évolution : la lente phase "spirale" qui voit les deux astres se rapprocher tout en orbitant l'un autour de l'autre puis la fusion des deux corps en un seul ; et finalement la relaxation

(c'est-à-dire le retour à l'équilibre) de l'astre compact résultant de la fusion. Un important test de cohérence consiste à vérifier si la forme d'onde de la phase spiralante est en accord avec celle de la phase post-spiralante (fusion + relaxation). En effet, la masse et le spin (c'est-à-dire son mouvement de rotation sur lui-même) du trou noir final peuvent être déduits des deux parties précédentes de l'évolution en utilisant des équations empiriques inspirées par les simulations de relativité générale numérique de ces systèmes binaires. Notre analyse a montré que les formes d'onde spiralantes et post-spiralantes sont en bon accord pour tous les événements analysés (voir figure 2).



**Figure 2** : Distributions de l'écart relatif (par exemple 0.2  $\Leftrightarrow$  différence de 20%) entre les mesures d'un même paramètre (masse en bleu et spin en rouge) faites séparément en utilisant soit la partie spiralante soit la partie post-spiralante des signaux d'onde gravitationnelle détectés. Les résultats obtenus avec le catalogue GWTC-3 sont comparés avec les analyses qui ont porté sur les catalogues précédents (GWTC-1 et GWTC-2). La ligne pointillée verticale montre la valeur attendue dans le cadre de la relativité générale (0.0  $\Leftrightarrow$  aucune différence entre les deux mesures). Les résultats sont en excellent accord avec la théorie de la relativité générale puisque les différentes courbes (étalées car elles incluent le bruit de mesure et d'autres incertitudes) ne montrent aucun décalage net par rapport à 0.0.

### Tests paramétriques de relativité générale

La physique hautement non linéaire et complexe qui entre en jeu dans la dynamique de la fusion d'un système binaire entraîne divers effets dont les traces se retrouvent dans la forme du signal d'onde gravitationnelle. Une théorie modifiée de la gravitation peut conduire à une prédiction différente pour un ou plusieurs de ces effets. Certains modèles dits "paramétriques" et qui diffèrent de la relativité générale par l'ajout de paramètres libres supplémentaires, se prêtent bien à de tels tests. Nous avons cherché des indices de physique alternative à la relativité générale dans les phases spiralantes et de fusion/relaxation, au cours de l'évolution d'un système binaire compact qui fusionne.

## Test avec la phase spiralante

La phase spiralante des systèmes binaires est décrite par une approximation de mouvement lent et de champ gravitationnel faible, appelée approximation “post-newtonienne” de la relativité générale. Différents coefficients post-newtoniens décrivent un ou plusieurs effets physiques causés par la dynamique du système et tester leur cohérence avec les prédictions de la relativité générale constitue un test très utile de la théorie. Notre analyse, combinée aux résultats des catalogues précédents, fournit souvent les meilleures limites pour les variations encore permises de ces coefficients autour de la valeur prédite par la relativité générale : là encore, nous n’avons trouvé aucune incohérence statistiquement significative (c’est-à-dire qui aurait beaucoup de chance d’être réelle) par rapport à la théorie d’Einstein.

La phase spiralante des systèmes binaires permet également de tester si le signal observé est compatible avec la coalescence de deux trous noirs en rotation (dit “**trous noirs de Kerr**”), telle que décrite par la théorie de la relativité générale. Si l’un des astres compacts tourne sur lui-même, cette rotation peut entraîner une déformation de son horizon – tout comme la rotation de la Terre entraîne un aplatissement aux pôles et un renflement à l’équateur. Ce phénomène influe sur l’évolution du système binaire : l’effet peut être mesuré et il dépend du type de l’astre compact en rotation – trou noir ou autre **astre compact exotique**, encore inconnu. Nous avons testé cette hypothèse et nous n’avons trouvé aucun indice de l’existence de tels astres compacts exotiques.

## Test avec les phases de fusion et relaxation

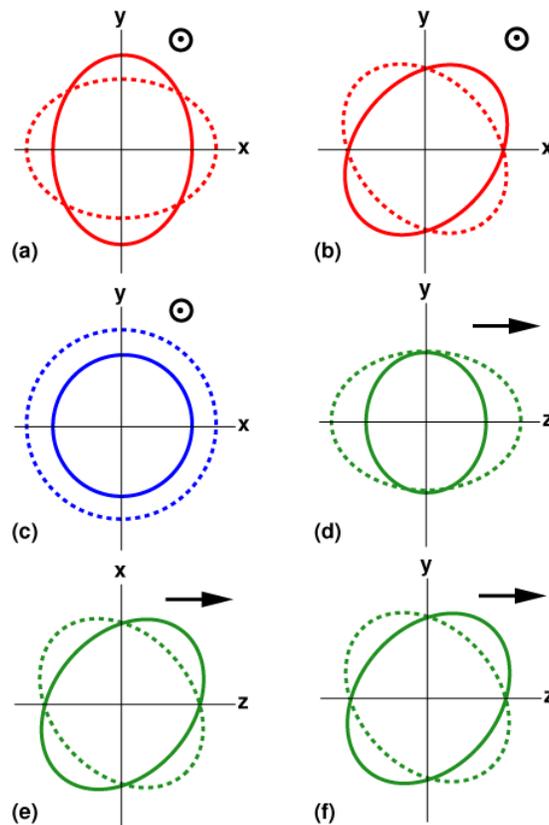
De la même manière, nous pouvons vérifier si les ondes gravitationnelles émises pendant la fusion et la relaxation suivent les prédictions de la relativité générale. La durée des phases de fusion et de relaxation est beaucoup plus courte que celle de la phase spiralante, sauf dans le cas des trous noirs très massifs, ce qui entraîne une moindre accumulation du rapport signal/bruit (la quantité générique qui permet de séparer les vrais signaux de fluctuations du bruit: plus ce rapport est élevé et plus la probabilité d’avoir affaire à une vraie onde gravitationnelle est importante) pendant cette partie de l’évolution du système binaire. Restreindre l’étude aux événements dont le rapport signal/bruit accumulé pendant la fusion et la relaxation est important permet d’établir des limites significatives. Ce test est effectué avec trois méthodes qui sont complémentaires les unes des autres en termes de détails de la forme d’onde, de méthodologie et de paramétrage. Nous avons trouvé une fois de plus que ce test valide la cohérence avec la relativité générale, dans les limites des incertitudes statistiques.

## Tests de propagation des ondes gravitationnelles

Alors que les ondes gravitationnelles se propagent sans être dispersées selon la relativité générale, des théories modifiées de la gravitation peuvent entraîner leur **dispersion**. Les composantes de fréquence de l’onde ne voyagent pas toutes à la même vitesse, ce qui entraîne des différences dans leurs temps d’arrivée dans les détecteurs. Par exemple, si les ondes de haute fréquence émises lors de la fusion voyageaient plus vite que les ondes basses fréquences de la phase spiralante, les “ondes

de fusion" arriveraient sur Terre plus tôt que prévu. Nous avons recherché la présence de dispersion des ondes gravitationnelles dans les données et n'en avons trouvé aucune trace. Les théories où le graviton (c'est-à-dire la particule qui serait la médiatrice de la gravitation) est massif constituent une classe de modèles spécifiques et intéressants qui peuvent être testés de cette manière. Il s'agit de théories où l'hypothétique graviton est supposé avoir une masse minuscule (mais inconnue). Cela conduit à un type spécifique de dispersion dont l'absence dans les données fournit une limite supérieure pour la masse du graviton. Sur la base des événements analysés lors des trois séries d'observations, la limite que nous obtenons est que la masse du graviton devrait être inférieure à  $1,3 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$ .

## Tester la polarisation des ondes gravitationnelles



**Figure 3 :** Représentation des six modes de polarisation des ondes gravitationnelles autorisés par une théorie de la gravitation la plus générale possible. Pour les trois premiers schémas, la direction de propagation de l'onde est perpendiculaire à la feuille (transverse), tandis que pour les trois dessins suivants la flèche indique la direction de propagation de l'onde. Les deux premières représentations, en rouge en haut, sont les seuls modes de polarisation autorisés par la relativité générale (source de l'image: Clifford Will, Living Reviews in Relativity).

Dans la théorie de la relativité générale, les ondes gravitationnelles ne peuvent avoir que deux états de polarisation : "plus" et "croix". Cependant, une théorie plus générale de la gravité peut avoir jusqu'à six modes de polarisation différents (voir figure 3). En utilisant trois détecteurs avec des

orientations différentes (les deux interféromètres de LIGO et celui de Virgo), nous pouvons établir une limite partielle sur le contenu de polarisation additionnelle possible dans les signaux observés. La méthode repose sur la construction d'un flux de données des détecteurs sans aucun signal issu de la relativité générale. Tout signal résiduel dans ce flux de données du détecteur indiquerait la présence de modes de polarisation supplémentaires. Notre analyse n'a montré aucune présence de ce type et les données sont conformes aux prédictions de la relativité générale.

## Echos après la fusion

Il existe des alternatives théoriques aux trous noirs, des astres que l'on appelle des "imitateurs de trous noirs", car ils peuvent imiter les propriétés des trous noirs tout en étant de nature différente. L'une des propriétés les plus fondamentales d'un trou noir est la présence autour de lui d'un horizon des événements, c'est-à-dire d'une surface qui délimite le volume dont aucune particule ne peut s'échapper une fois qu'elle y est entrée, c'est-à-dire une surface dont l'absorption serait parfaite. Cependant, pour les imitateurs de trous noirs, l'équivalent de l'horizon des événements peut dans certains cas être une surface aux propriétés différentes, par exemple partiellement ou totalement réfléchissante. Il a été proposé que la forme d'onde post-fusion de tels astres puisse contenir des échos répétés du signal de fusion. Nous avons cherché de tels échos dans les données et n'en avons trouvé aucun, ce qui signifie que les astres formés lors des fusions sont compatibles avec le fait d'être des trous noirs en rotation tels que décrits par la relativité générale.

## Conclusion

Nous avons cherché dans les données et de neuf manières différentes des indices d'un éventuel désaccord par rapport à la relativité générale. Nous avons constaté que, dans les limites des incertitudes statistiques dues au bruit et des éventuelles incertitudes systématiques dues à des modèles d'ondes imprécis, les prédictions de la relativité générale sont totalement cohérentes avec les événements détectés. Étant donné l'importance de la détection d'un écart aux prédictions de la théorie de la relativité générale, nous continuerons à améliorer ces tests dans les années à venir. De nouvelles analyses pourraient sonder des facettes entièrement nouvelles de la gravitation qui n'ont pas encore été explorées jusqu'à présent, en utilisant des détecteurs plus sensibles qui seront opérationnels dans les prochaines années.

## Glossaire

- **Astres compacts exotiques** : Ce sont des astres hypothétiques émettant des ondes gravitationnelles similaires à celles émises par les trous noirs et les étoiles à neutrons, alors qu'ils n'en sont pas. Dans le cas des imitateurs de trous noirs, les ondes sont similaires à celles émises par les trous noirs mais les propriétés différentes des imitateurs peuvent créer de nouveaux effets, tels des échos.
- **Dispersion** : La dispersion d'une onde est le phénomène par lequel les différentes composantes de fréquence d'une onde se déplacent à des vitesses différentes dans un milieu

particulier, dit “dispersif”. Pour la lumière “blanche” du Soleil qui contient toutes les “couleurs” (c’est-à-dire des ondes électromagnétiques de différentes longueurs d’onde ou fréquences), le phénomène de dispersion à l’intérieur de gouttelettes d’eau en suspension dans l’air est à l’origine des arcs-en-ciel.

- **Étoile à neutrons** : le vestige de l’explosion en supernova d’une étoile en fin de vie et dont la masse est comprise entre 10 et 25 fois celle de notre Soleil. Les étoiles à neutrons typiques ont une masse d’environ 1 à 2 masses solaires et un rayon de seulement 10 à 15 kilomètres.
- **eV/c<sup>2</sup>**: L’électron-volt (eV) est une unité d’énergie et, en utilisant la fameuse équivalence masse-énergie d’Einstein  $E=mc^2$ , on en conclut que l’eV/c<sup>2</sup> est une unité de masse. 1 eV/c<sup>2</sup> vaut environ  $1,8 \times 10^{-36}$  kilogramme. La masse du graviton est donc inférieure à  $2,3 \times 10^{-59}$  kilogramme.
- **Formes d’ondes gravitationnelles** : Signaux calculés à l’aide de la théorie de la relativité générale, qui sont utilisées à la fois pour la détection des ondes gravitationnelles dans les données LIGO-Virgo et aussi pour l’étude des propriétés des sources astrophysiques d’ondes gravitationnelles.
- **Période d’observation O3** : la troisième période de prise de données de l’ère des détecteurs Advanced LIGO et Virgo a débuté en avril 2019. O3a, la première partie de O3, s’est déroulée du 1er avril 2019 au 1er octobre 2019, tandis que O3b, la deuxième partie de O3, s’est déroulée du 1er novembre 2019 au 27 mars 2020.
- **Polarisation**: la polarisation d’une onde fait référence aux différentes manières dont une onde peut osciller. Dans le cadre de la relativité générale, les ondes gravitationnelles ont seulement deux modes indépendants de polarisation, appelés “plus” et “croix”. Cela signifie qu’une onde gravitationnelle passant au travers d’un anneau de particules test étire et comprime ce dernier selon les axes vertical/horizontal (+) ou les diagonales (x).
- **Trou noir** : région de l’espace-temps où la gravitation est si forte que rien, pas même la lumière, ne peut s’en échapper. La limite de non-retour qui marque la frontière de cette région (propre aux trous noirs) est appelée horizon des événements.
- **Trous noirs de Kerr** : Trous noirs dans le cadre de la relativité générale ; ils sont entièrement décrits par leur masse et leur spin (rotation).

## 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).