

GW170814 : OBSERVATION PAR TROIS DÉTECTEURS DES ONDES GRAVITATIONNELLES PRODUITES PAR LA COALESCENCE D'UN SYSTÈME BINAIRE DE TROUS NOIRS

L'événement GW170814 est la quatrième détection confirmée d'ondes gravitationnelles rendue publique par les Collaborations Virgo et LIGO. Ce signal a été émis lors de la fusion de deux trous noirs de masses stellaires et il est le premier à avoir été observé par le détecteur "Advanced Virgo". Cette détection illustre le potentiel d'un réseau global de trois détecteurs (les deux détecteurs jumeaux "Advanced LIGO" et Advanced Virgo) pour localiser la source des ondes gravitationnelles dans le ciel et pour tester la théorie de la relativité générale. GW170814 est donc un tournant pour un domaine scientifique en plein essor, l'astronomie en ondes gravitationnelles.

INTRODUCTION

Le 1er août 2017, le détecteur [Advanced Virgo](#) a rejoint la deuxième campagne de prise de données des détecteurs [Advanced LIGO](#) (appelée "O2") qui a duré du 30 novembre 2016 au 25 août 2017. Le 14 août à 12h30'43" heure de Paris, un signal transitoire d'ondes gravitationnelles, connu maintenant sous le nom de **GW170814** a été détecté par un programme informatique qui analyse automatiquement les données des trois instruments dès qu'elles sont disponibles. Ce signal correspond aux derniers instants de la fusion de deux [trous noirs](#) de masses stellaires. Des analyses plus détaillées exploitant l'ensemble des informations fournies par les trois détecteurs ont démontré que le détecteur Advanced Virgo avait bien vu ce signal. Cela fait de GW170814 la première onde gravitationnelle détectée par trois instruments.



Vue aérienne du détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo, situé à Cascina, près de Pise, en Italie. Virgo est un interféromètre laser géant de type Michelson dont les bras font 3 km de long. (Crédit de l'image : Nicola Baldocchi / Virgo Collaboration).

DÉTECTEURS ET QUALITÉ DES DONNÉES

Les détecteurs LIGO et Virgo sont des [interféromètres de Michelson](#) géants dont les bras mesurent respectivement 4 et 3 kilomètres. Les détecteurs LIGO ont été construits aux Etats-Unis : à Hanford dans l'Etat de Washington et à Livingston en Louisiane ; le détecteur Virgo est quant à lui situé en Italie, à Cascina près de Pise. Ces trois instruments ont été conçus dans les années 1990, construits autour de l'an 2000 et ont fonctionné pendant la décennie suivante dans leur configuration initiale – avec le détecteur [GEO600](#) construit en Allemagne. Les collaborations LIGO et Virgo ont ensuite mené un ambitieux programme pluriannuel d'amélioration des détecteurs afin de faire progresser leur sensibilité d'un facteur 10 (et donc d'augmenter le volume d'Univers observé par un facteur 1000).

Le programme "Advanced LIGO" a débuté en 2010 et s'est conclu en 2015, ce qui a permis le démarrage de la campagne de prise de données "O1" en septembre de la même année. Le [premier signal d'ondes gravitationnelles](#) fut détecté quelques jours plus tard, suivi par deux autres détections confirmées en [décembre 2015](#) et [janvier 2017](#) (cette dernière pendant la prise de données O2).

Le programme "Advanced Virgo" a démarré un an plus tard, fin 2011, et a porté sur l'ensemble de l'appareillage : des miroirs au système qui maintient le détecteur sous vide, en passant par les photodiodes qui captent les différents faisceaux laser. Après une période de démarrage et de rodage d'environ un an, Advanced Virgo a rejoint O2 le 1er août 2017. Bien que les détecteurs LIGO et Virgo utilisent la même méthode (l'interférométrie) pour détecter les ondes gravitationnelles et que leurs conceptions aient de nombreux points communs, ils ont été construits et fonctionnent de manière totalement indépendante.

La Figure 1 compare les [courbes de sensibilité](#) typiques des trois détecteurs au moment de l'événement GW170814. Ces données ont été "nettoyées" des sources de bruit bien identifiées qui contaminent la sensibilité selon des mécanismes parfaitement connus¹. Des vérifications complètes et très détaillées du fonctionnement des différents détecteurs et des informations fournies par les très nombreuses sondes qui surveillent l'environnement autour des instruments n'ont pas révélé le moindre problème qui puisse mettre en doute la détection.

FIGURES EXTRAITES DE L'ARTICLE

Pour plus d'informations sur la signification de ces figures, voir l'article complet disponible [ici](#).

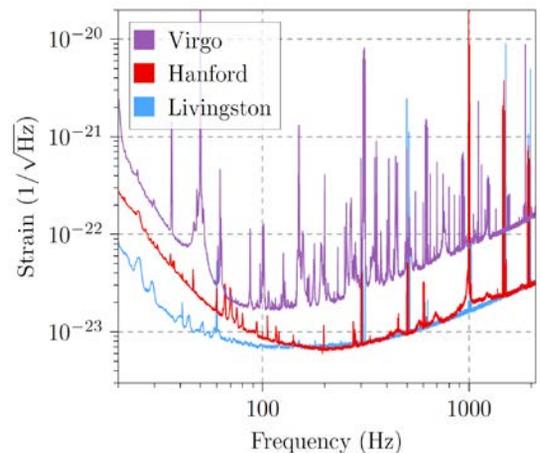


Figure 1: Cette figure (référéncée comme Figure 2 dans notre [publication](#)) compare les sensibilités (appelées "strain" sur l'axe vertical) des trois détecteurs en fonction de la fréquence (exprimée en hertz sur l'axe horizontal). À noter : les deux axes ont une échelle logarithmique. Plus la valeur de la sensibilité sur le graphique est basse et plus on peut détecter un signal d'ondes gravitationnelles faible à cette fréquence. Les courbes bleue, rouge et violette montrent respectivement les courbes de sensibilité des détecteurs LIGO Hanford, LIGO Livingston et Virgo

1. Le même principe est utilisé par les casques audio qui isolent du bruit ambiant : celui-ci est enregistré par des capteurs montés sur le casque, puis annulé par l'envoi du signal "opposé" aux oreilles.

L'OBSERVATION DU SIGNAL GW170814

L'identification d'un nouveau signal transitoire d'ondes gravitationnelles se fait en plusieurs étapes. La première se déroule dès les données enregistrées et est basée sur des algorithmes "temps réel" qui utilisent des techniques de [filtrage adapté](#) pour rechercher des signaux coïncidents (des "candidats onde gravitationnelle" potentiels) dans les trois détecteurs LIGO-Virgo.

Le signal GW170814 a été observé par Advanced LIGO de manière très [significative](#) à peine une trentaine de secondes après l'enregistrement des données ; une alerte LIGO-Virgo a été préparée puis envoyée aux télescopes partenaires. Dans un second temps, la signification statistique de ce candidat a été calculée plus précisément à partir de six jours de données en coïncidence des détecteurs LIGO et en utilisant un [procédure similaire](#) à celle suivie pour les précédentes détections confirmées. Cette analyse plus détaillée permet de calculer le [taux de fausses alarmes](#) pour cet événement, c'est-à-dire à quelle fréquence des fluctuations aléatoires du bruit de mesure des deux instruments pourraient "s'ajouter" pour produire un faux signal au moins aussi fort que celui observé dans les données. Pour GW170814, le taux de fausses alarmes calculé est inférieur à 1 en 27 000 ans, ce qui valide la détection.

Virgo a également observé ces ondes gravitationnelles, comme le démontrent deux analyses indépendantes. La première, également basée sur le filtrage adapté, compare deux modèles : l'un suppose que la fusion de deux trous noirs est visible dans les données des trois détecteurs (Virgo inclus donc) tandis que l'autre se limite à un signal dans les deux instruments LIGO – et uniquement du bruit de mesure pour Virgo. Le calcul démontre que le premier modèle est plus de 1 600 fois plus probable que l'autre. La seconde méthode recherche des signaux transitoires d'ondes gravitationnelles dont la forme précise n'est pas connue mais dont la fréquence augmente avec le temps – donc comme le [signal de type "chirp"](#) ("[gazouillis](#)" en français) produit par la fusion de deux objets compacts, mais sans demander que l'évolution temporelle du signal soit la même. L'analyse combine les données des instruments pour reconstruire la forme du signal détecté. Pour les quatre découvertes annoncées à ce jour, les formes d'onde calculées par cette approche "indépendante des modèles" ressemblent comme des soeurs à celles prédites pour les fusions de trous noirs.

Cette procédure a été appliquée en parallèle, d'une part sur les données des deux détecteurs LIGO uniquement, d'autre part sur celles du réseau global de trois détecteurs. Comme expliqué précédemment, la force du signal d'ondes gravitationnelles reconstruit peut être convertie en taux de fausses alarmes, exprimant la fréquence à laquelle des fluctuations indépendantes de bruit pourraient produire un signal au moins aussi fort. Avec seulement deux détecteurs, le taux de fausses alarmes calculé est approximativement de une en 300 ans. Avec le réseau complet, ce taux diminue considérablement : il est inférieur à une en 5 700 ans. Et donc l'hypothèse "observation du signal GW170814 par les trois détecteurs" est une fois encore favorisée. La Figure 2 montre trois manières différentes de présenter les données enregistrées par le réseau au moment de la détection de GW170814.

LOCALISATION DE LA SOURCE DE GW170814 DANS LE CIEL

La position de la source dans le ciel peut être estimée en utilisant les différences de temps d'arrivée du signal d'ondes gravitationnelles dans les différents détecteurs. Ces écarts sont dus à la valeur finie de la [vitesse de la lumière](#) qui introduit un délai qui peut par exemple atteindre 10 ms entre les deux détecteurs LIGO qui sont distant de 3 000 km. En supposant ces temps d'arrivée parfaitement connus, chaque différence de temps est associée à un cercle sur le ciel qui relie toutes les directions produisant le même décalage. Pour le réseau de trois détecteurs LIGO-Virgo, on peut construire trois différences de temps qui dessinent trois grands cercles dans le ciel, lesquels se coupent en deux points².

En réalité, les temps d'arrivée ont des incertitudes, ce qui veut dire que les cercles sont des bandes plus ou moins larges selon les erreurs sur les temps mesurés. La région du ciel qui contient probablement la source correspond à l'intersection des différentes bandes. Pour améliorer la localisation, on utilise les différences d'amplitude et de forme entre les signaux détectés dans les différents instruments. Pour le comprendre, le mieux est de se représenter un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles comme un micro plutôt que comme un télescope ; en effet, il peut observer des signaux venant de à peu près toutes les directions – modulo quelques limitations. Par exemple, une onde gravitationnelle arrivant à la verticale par rapport au plan contenant les bras du détecteur sera vue de manière optimale. Alors que la même onde, cette fois-ci en provenance de la bissectrice entre les deux bras sera complètement invisible. De manière générale, plus la source est haute sur l'horizon et meilleure sera la réponse du détecteur au signal. Et chaque instrument a quatre directions aveugles, toutes situées dans le plan des bras. Si une onde gravitationnelle n'est pas détectée par un instrument qui, en principe, est assez sensible pour la voir, cela signifie que le signal vient de l'une de ces directions aveugles.

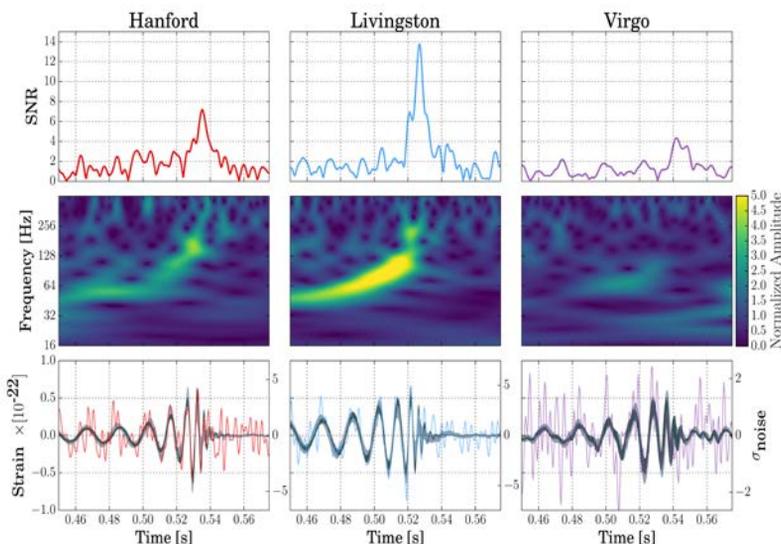


Figure 2 (en fait la Figure 1 de notre [publication](#)) :

Première ligne : Evolution des rapports signal-sur-bruit de la méthode du filtrage adapté en fonction du temps. Les pics ne sont pas synchronisés entre les différents détecteurs car les ondes gravitationnelles se propagent à une vitesse finie (celle de la lumière) ; un même signal atteint donc les détecteurs à des instants différents. GW170814 est arrivé d'abord à LIGO-Livingston, puis 8 ms plus tard à LIGO-Hanford et après 6 ms supplémentaires à Virgo.

Ligne du milieu : Représentation temps-fréquence des données. Pour chacune de ces cartes bidimensionnelles, plus un pixel est brillant et plus le signal mesuré à ce temps précis et à cette fréquence particulière est fort par rapport au niveau de bruit attendu.

Ligne du bas : Comparaison des données temporelles avec les meilleures formes d'onde sélectionnées respectivement par la méthode du filtrage adapté (traits noirs gras) et par la méthode indépendante des modèles de forme d'onde (bandes grises).

2. Avec un réseau de quatre détecteurs ou plus, ces cercles ne se croisent plus qu'en un point. C'est l'une des raisons pour lesquelles ajouter un quatrième instrument (KAGRA au Japon) d'ici la fin de la décennie et le projet d'un cinquième détecteur (LIGO-Inde) quelques années plus tard amélioreront encore la capacité du réseau à localiser une source d'ondes gravitationnelles dans le ciel.

La Figure 3 compare les différentes localisations de la source de GW170814 obtenues par les méthodes d'analyse de données successives : en bleu, une première localisation rapide basée uniquement sur les deux détecteurs LIGO ; en orange, l'apport de Virgo ; enfin, en vert, le résultat fourni par la méthode d'estimation des paramètres la plus complète (voir ci-dessous). Le réseau peut également contraindre la distance de la source, comme le montre le graphique de droite sur la Figure 3. La source est donc recherchée en trois dimensions. Dans les cas les plus favorables, le volume d'Univers le plus probable sélectionné au final pourrait ne contenir qu'un petit nombre de galaxies, ce qui simplifierait la recherche d'une contrepartie visible par les télescopes partenaires. 25 observatoires ont effectué un suivi de GW170814 mais aucune contrepartie n'a été identifiée. A priori, on ne s'attend pas à ce qu'une fusion de deux trous noirs produise autre chose que des ondes gravitationnelles.

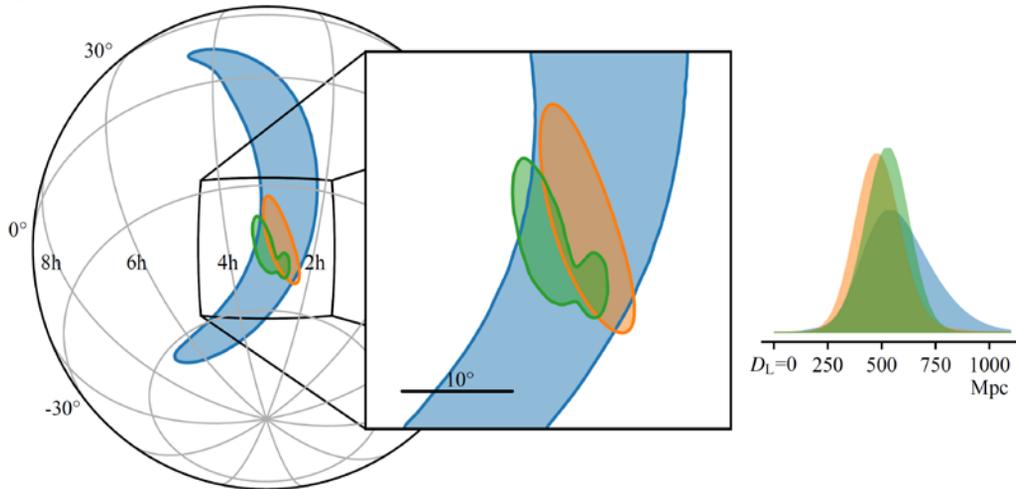


Figure 3: Localisation de la source de l'événement GW170814 dans le ciel. La partie gauche de l'image compare les régions du ciel sélectionnées par les différentes analyses comme contenant probablement la source. Elles sont appelées "régions de crédibilité" à 90% de confiance car elles sont définies de manière à ce que la probabilité qu'elles contiennent bien la source soit égale à 90%. La "banane" bleue correspond à la localisation rapide initiale, basée seulement sur les données de LIGO. L'ajout de Virgo donne la région orange, plus de dix fois plus petite – 100 degrés carrés contre 1160. La région verte est le résultat de l'analyse la plus complète utilisée pour estimer les paramètres du système de trous noirs: elle mesure à peine 60 degrés carrés. La même méthode basée uniquement sur les données des détecteurs LIGO donne une région dont la taille atteint les 700 degrés carrés.

La partie droite de l'image compare les distributions de probabilité obtenues par les trois analyses pour la distance de luminosité de la source. L'ajout de Virgo resserre cette courbe en coupant la queue de la distribution correspondant aux plus grandes distances. La distance la plus probable vaut environ 540 Mpc, soit près d'1,8 milliard d'années-lumière

MESURE DES PARAMÈTRES DE GW170814

Les paramètres de l'événement GW170814 ont été estimés à l'aide des mêmes techniques que celles employées pour les autres détections confirmées. Le signal observé est comparé à deux familles de modèles de formes d'ondes, développées de manière indépendantes et dont les caractéristiques dépendent des paramètres mesurés. Plus la forme d'onde générée ressemble au signal mesuré et plus ses paramètres sont proches de ceux du vrai signal.

Tous les détails sur les paramètres mesurés pour l'événement GW170814 sont disponibles dans notre publication ou sur le document "Tout savoir sur GW170814". Par exemple, la Figure 4 ci-jointe montre les résultats obtenus pour les masses des deux trous noirs primaires.

TESTER LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE AVEC GW170814

Des tests de la relativité générale similaires à ceux menés pour les précédentes détections confirmées ont été réalisés pour GW170814. Les résultats sont similaires, c'est-à-dire en accord avec les prédictions de la théorie d'Einstein. Des analyses plus poussées feront l'objet de publications futures.

Disposer d'un réseau qui inclut des détecteurs qui ont des orientations différentes (les deux instruments LIGO sont presque parallèles mais Virgo ne l'est pas) permet également d'étudier la polarisation des ondes gravitationnelles, c'est-à-dire la manière dont celles-ci déforment l'espace-temps lorsqu'elles se propagent à travers lui.

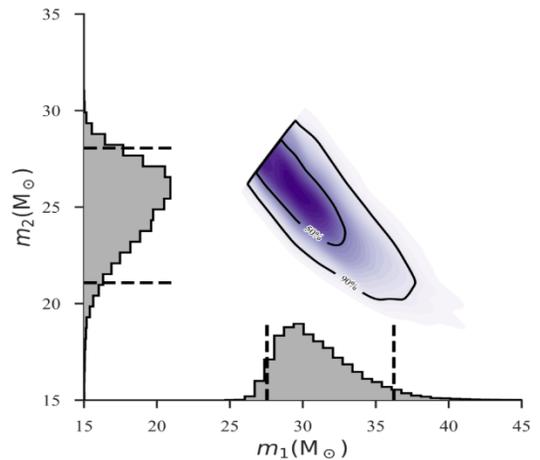


Figure 4 (la partie supérieure de la Figure 4 de notre publication) : Les masses (exprimées en unités de masse solaire) des deux trous noirs initiaux de l'événement GW170814. Ces masses sont mesurées simultanément et les contraintes communes qui en résultent sont représentées dans le plan m_2 en fonction de m_1 (où, par convention, $m_2 \leq m_1$). Plus la couleur est sombre et plus la probabilité que les vraies masses des trous noirs soient égales à celle de la paire (m_1, m_2) considérée est élevée. Les contours noirs montrent les limites des régions de crédibilité correspondant à des probabilités de 50% et 90% respectivement. De plus, les distributions de probabilité pour la masse de chaque trou noir pris individuellement sont représentées en gris sur les deux axes. Les valeurs les plus probables pour les masses des deux trous noirs sont autour de 30 et 25 masses solaires.

La relativité générale prédit que les ondes gravitationnelles sont [transverses](#). Ce qui signifie qu'elles étirent et compressent l'espace-temps dans les plans perpendiculaires à leur direction de propagation. Les déformations permises sont de seulement deux types, appelées polarisations "+" ("plus") et "x" ("croix"). Leur effet sur un anneau de particules test est représenté sur les schémas rouges (a) et (b) de la Figure 5.

Mathématiquement, une [théorie "métrique" de la gravitation](#) générique peut contenir jusqu'à six polarisations différentes – dont les deux permises par la relativité générale. Chaque polarisation supplémentaire déformerait l'espace-temps d'une manière différente, ce qui modifierait la manière dont un détecteur interférométrique répondrait à un tel signal. Ce comportement pourrait être observé en comparant les signaux détectés dans deux instruments non-parallèles car les différences observées ne pourraient pas être expliquées par la relativité générale. Les schémas (c) à (f) sur la Figure 5 montrent l'effet de ces polarisations supplémentaires. Alors que le schéma (c), en bleu, correspond à nouveau à une onde transverse qui se propage perpendiculairement aux plans qu'elle déforme, les schémas verts (d) à (f) représentent des ondes gravitationnelles qui se propagent dans le *même* plan que les déformations d'espace-temps qu'elles produisent – comme indiqué par la flèche présente sur ces schémas.

Une première étude de la polarisation des ondes gravitationnelles a été menée avec les données GW170814. L'estimation complète des paramètres de l'événement selon la méthode décrite ci-dessus a été reproduite, cette fois en considérant uniquement des polarisations interdites par la relativité générale. Le résultat est que ces polarisations alternatives "collent" beaucoup moins bien aux données enregistrées par les trois détecteurs : une indication supplémentaire du fait que l'événement GW170814 est en accord avec la théorie d'Einstein.

CONCLUSIONS

L'événement GW170814 est la quatrième détection d'une fusion de trous noirs confirmée par la Collaboration Scientifique LIGO et la Collaboration Virgo. Les trous noirs identifiés ont des masses similaires à celles de la première (GW150914) et de la troisième (GW170104) détection. Leurs caractéristiques sont en accord avec les études des populations de trous noirs et les estimations du taux de telles fusions, obtenues à partir des précédentes détections.

Ce qui rend cet événement unique est la première détection faite avec trois détecteurs : les deux interféromètres Advanced LIGO et Advanced Virgo. Un réseau de trois détecteurs a un potentiel scientifique énorme, bien illustré par la détection de l'événement GW170814 : une amélioration importante de la localisation de la source, tant au niveau de sa position dans le ciel que de sa distance ; et la possibilité de réaliser des tests supplémentaires de la relativité générale. Avec le début de la troisième campagne de prise de données, "O3", prévue fin 2018, les perspectives de l'astronomie en ondes gravitationnelles sont très prometteuses.

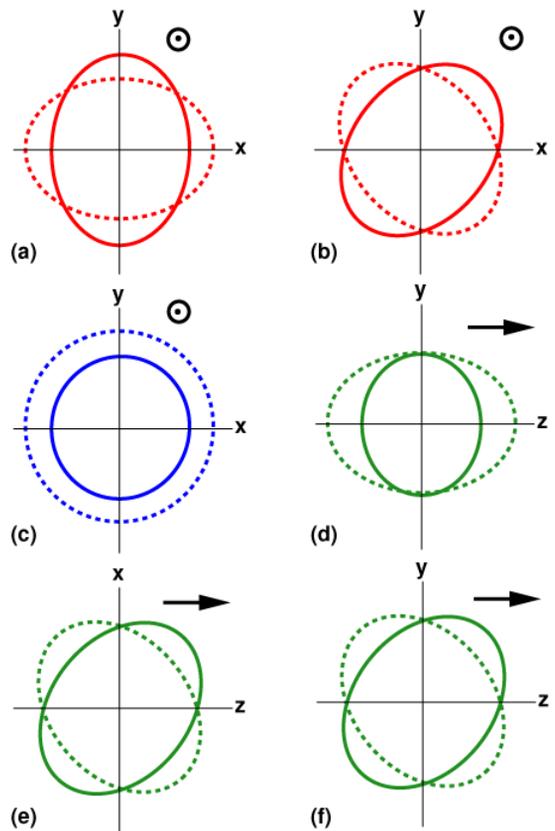


Figure 5 : Représentation des six polarisations permises par les théories "métriques" de la gravitation les plus générales. Les schémas (a) et (b), en rouge, représentent respectivement les polarisations "+" et "x" permises par la relativité générale. Dans ces deux cas, les distorsions de l'espace-temps ont lieu dans les plans perpendiculaires à la direction dans laquelle l'onde gravitationnelle se propage (en l'occurrence de la page vers vous). Un cercle de particules test se transforme en une ellipse : il est étiré dans une direction et simultanément compressé dans la direction perpendiculaire. Les schémas (c) à (f) montrent les polarisations interdites en relativité générale. Le schéma (c), en bleu, montre une troisième polarisation transverse tandis que les schémas verts (d) à (f) représentent des polarisations qui se propagent dans une direction (indiquée par la flèche) contenue dans le même plan que les déformations de l'espace-temps. Crédit pour cette image : Clifford Will, Living Reviews in Relativity.



Visitez nos sites internet :

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



Vous pouvez lire [ici](#) l'article complet, accepté pour publication par la revue **Physical Review Letters**.

GLOSSAIRE

- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps creusée par un objet extrêmement compact et où la gravité qui y règne est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut en sortir.
- **Forme d'onde** : Une courbe décrivant l'évolution en fonction du temps de la déformation d'espace-temps due au passage d'une onde gravitationnelle.
- **Bruit** : Fluctuations aléatoires des données enregistrées par un détecteur d'ondes gravitationnelles causées par un grand nombre d'effets d'origine instrumentale ou environnementale.
- **Campagne de prise de données** : une période d'observation pendant laquelle les détecteurs d'ondes gravitationnelles prennent des données.
- **Sensibilité** : Une manière de décrire la capacité d'un instrument à détecter un signal donné. Les détecteurs dont le niveau de bruit est bas pourront détecter des signaux plus faibles : on dit qu'ils ont une meilleure sensibilité.
- **Amplitude d'une onde gravitationnelle** : La variation relative de distance entre deux points de mesure due à la déformation de l'espace-temps produite par le passage d'une onde gravitationnelle.