

Un guide sur le bruit de mesure des détecteurs LIGO-Virgo et sur l'analyse des signaux transitoires d'ondes gravitationnelles

INTRODUCTION

Les ondes gravitationnelles sont des oscillations extrêmement ténues de la texture de [l'espace-temps](#) qui étirent et compriment de manière infinitésimale l'espace qu'elles traversent. Les deux détecteurs Advanced LIGO aux États-Unis et le détecteur Advanced Virgo en Italie mesurent cette [déformation](#), ou allongement relatif, en étudiant les [interférences](#) générées par la superposition des deux faisceaux laser qui se propagent sur plusieurs kilomètres dans les bras perpendiculaires de l'interféromètre avant d'interagir. L'amplitude des signaux gravitationnels est tellement faible que même les plus intenses ne produisent sur Terre qu'une différence de longueur entre les deux bras [1 000 fois plus petite que la taille d'un proton](#). Extraire de tels « sons », faibles et fugaces, des sifflements et des crépitements du bruit de mesure des détecteurs est un vrai défi !

Avec l'intérêt croissant de la communauté scientifique pour l'astronomie en ondes gravitationnelles, la Collaboration Scientifique LIGO et la Collaboration Virgo se sont organisées pour faciliter les contributions extérieures à l'analyse des données LIGO-Virgo ainsi que l'interprétation des résultats obtenus. La publication d'un [guide sur le bruit de mesure des détecteurs LIGO-Virgo et l'analyse des signaux transitoires d'ondes gravitationnelles](#) représente une étape majeure de ce processus. Il s'agit d'une introduction didactique sur les données des détecteurs d'ondes gravitationnelles, les différentes propriétés du bruit de mesure et les méthodes variées d'analyse, utilisées pour détecter puis caractériser les signaux d'ondes gravitationnelles. Les exemples présentés dans

ce guide utilisent des données, des tutoriels et des logiciels disponibles sur le site du Gravitational Wave Open Science Center : [gw-openscience.org](#). LIGO et Virgo organisent également des [ateliers sur leurs données une fois qu'elles ont été rendues publiques](#) : ils proposent aux participants une introduction pratique sur l'utilisation des logiciels qui permettent d'accéder à ces données et de les analyser.

SIGNAL ET BRUIT

Les techniques d'analyse des données LIGO-Virgo trouvent leurs fondements dans les travaux réalisés il y a plus de deux siècles par les mathématiciens français [Pierre-Simon Laplace](#) et allemand [Carl Friedrich Gauss](#). Laplace a établi les bases de la [théorie des probabilités](#), utilisée pour estimer les propriétés des sources d'ondes gravitationnelles, telles que leurs masses et leurs spins et de les localiser dans l'Univers. Indépendamment, Gauss a développé une méthode pour ajuster les paramètres d'un modèle aux observations, laquelle fournit alors la solution « la plus probable ». Ce concept de « [vraisemblance](#) » est utilisé aujourd'hui dans les analyses LIGO-Virgo, et exprime l'idée que les propriétés du [résidu](#) – la différence entre le modèle et les données – doivent suivre celles du bruit seul. Gauss a également montré que, dans certaines conditions, la distribution du bruit de mesure suit une loi en forme de « cloche », appelée loi Gaussienne ou [loi normale](#). Laplace a étendu les travaux de Gauss et a montré que le bruit de mesure suit une loi Gaussienne chaque fois qu'il résulte d'un très grand nombre de perturbations aléatoires.

Les données LIGO-Virgo peuvent être difficiles à analyser car les propriétés du bruit de mesure varient avec le temps et la [fréquence](#) ; de plus, la distribution statistique de ce bruit s'écarte de la loi Gaussienne à cause des bruits transitoires – également appelés « sursauts » ou « glitch » en anglais. Le présent guide d'analyse des données décrit les différentes techniques mises au point par les scientifiques de LIGO-Virgo pour suivre et atténuer les effets des fluctuations du bruit de mesure, ainsi que pour quantifier la signification statistique de chaque détection et pour estimer les propriétés des systèmes astrophysiques à l'origine de ces signaux gravitationnels.

Le réseau LIGO-Virgo est constitué de plusieurs détecteurs séparés par des milliers de kilomètres, ce qui est très utile pour l'analyse des données. Les différences de temps d'arrivée du signal dans les instruments permettent d'estimer la direction d'arrivée des signaux dans le ciel. L'analyse en réseau est également cruciale pour séparer les signaux du bruit de mesure : en effet, les signaux gravitationnels génèrent une réponse [corrélée](#) alors que le bruit est normalement spécifique à chaque instrument. On peut ainsi distinguer des signaux au milieu des fluctuations du bruit.

Les premières détections d'ondes gravitationnelles ont fait l'objet de critiques portant sur la présence de bruits corrélés entre les détecteurs. Néanmoins, si les signaux sont correctement soustraits des données, il n'y a aucune preuve de corrélation statistiquement significative dans les résidus. En effet, ceux-ci s'avèrent parfaitement cohérents avec le bruit gaussien.

L'ANALYSE SCIENTIFIQUE

Le guide de l'analyse des données couvre les principales étapes suivies par LIGO-Virgo.

- Pour chaque détecteur, les données brutes enregistrées en sortie et qui sont sensibles à la variation de longueur des bras de l'interféromètre sont d'abord calibrées, puis convertie en une mesure de la déformation de l'espace due au

passage d'une possible onde gravitationnelle.

- La qualité des données est ensuite vérifiée afin de rejeter tous les échantillons de mauvaise qualité ou corrompus.
- Les données sont ensuite transmises aux algorithmes de recherche qui identifient les signaux candidats et les classent en fonction de leur signification statistique.
- Les candidats les plus prometteurs font alors l'objet d'une étude plus poussée afin de calculer les [distributions de probabilité](#) des paramètres de la source du signal.
- Enfin, après des contrôles supplémentaires, les événements qui ont passé toutes ces étapes sont ajoutés au catalogue des sources d'ondes gravitationnelles.

Le guide décrit également les principaux aspects techniques du traitement des données utilisé dans les analyses, tels que le [fenêtrage](#) des données ; la conversion des séries temporelles dans le domaine fréquentiel ; l'estimation de la [densité spectrale](#) du bruit de mesure et le calcul de la compatibilité entre les données et le modèle d'ondes gravitationnelles testé.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Nos sites internet : www.ligo.org et www.virgo-gw.eu
- le site du Gravitational Wave Open Science Center (GWOSC) : gw-open-science.org.
- la version électronique du guide sur l'analyse des données, disponible sur l'archive gratuite en ligne arXiv.org
- Les tutoriels du GWOSC : <https://www.gwopenscience.org/tutorials/>.

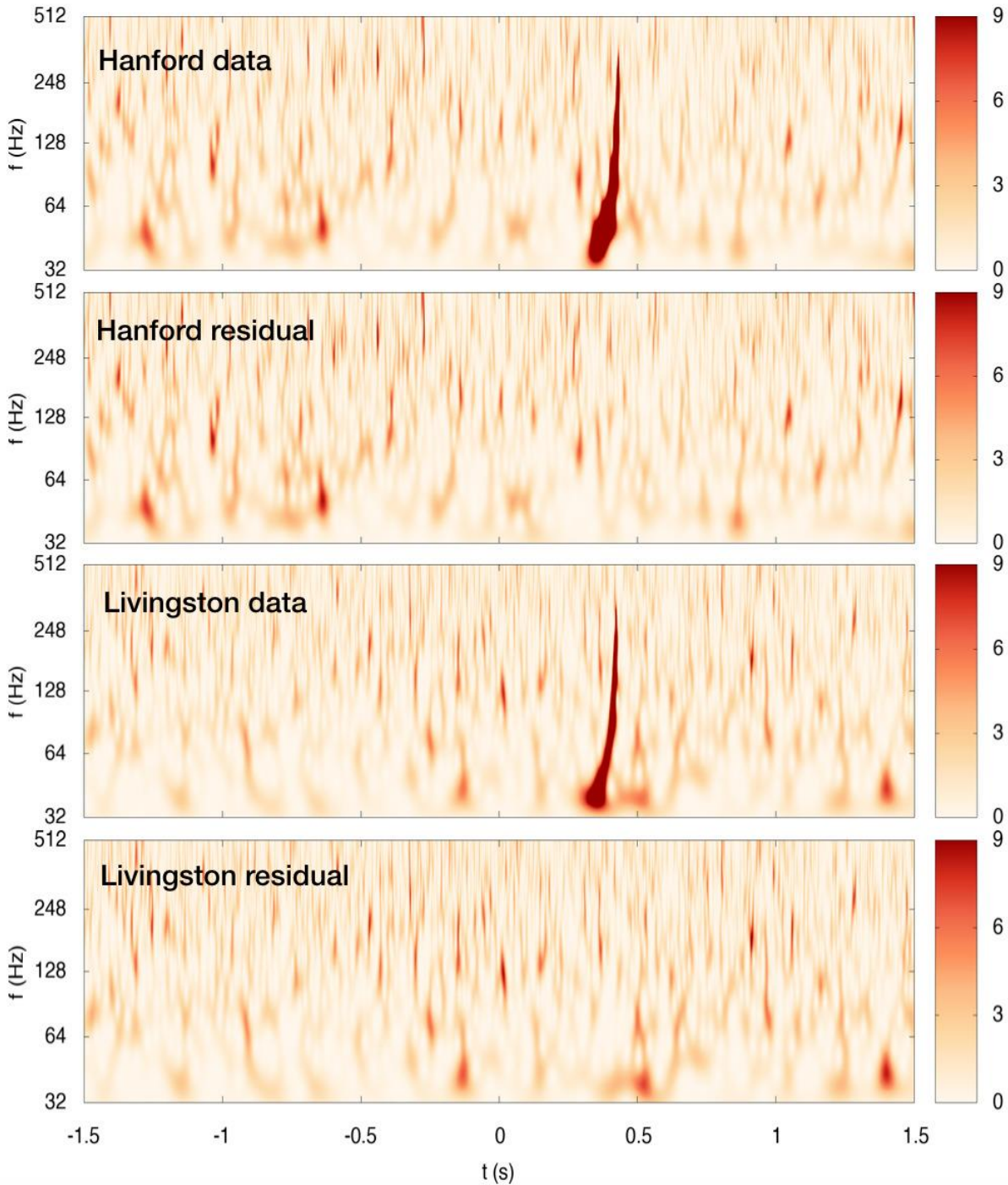
Sur cette page, vous trouverez des liens vers les cours en ligne LIGO-Virgo sur les données ouvertes, ainsi que les programmes et les « notebooks Jupyter » associés à notre guide sur l'analyse des données.

GLOSSAIRE

- **Déformation (strain en anglais)** : infime variation relative de la distance entre deux points de mesure, due à la déformation de l'espace-temps provoquée par le passage d'une onde gravitationnelle.
- **Interféromètre** : Instrument, utilisé dans de nombreux domaines des sciences et de l'ingénierie, qui fonctionne avec deux ou plusieurs rayons lumineux ayant parcouru des chemins optiques différents et qui, en se recombinaut, produisent des interférences. Celles-ci sont analysées afin d'extraire les informations sur l'objet ou le phénomène étudié. Voir aussi [ici](#).
- **Résidu** : en statistique, ce qui reste une fois le modèle soustrait aux données.
- **Spin** : mouvement de rotation propre de l'astre ou du système d'astres étudié.
- **Sursaut ou transitoire (glitch en anglais)** : bruit dans les données qui peut parfois être confondu avec un vrai signal d'ondes gravitationnelles ou le masquer. Pour mieux comprendre, on peut faire l'analogie avec les parasites d'un haut-parleur stéréo qui brouillent la musique diffusée.



Carl Friedrich Gauss (à gauche) et Pierre-Simon Laplace (à droite) ont développé, il y a plus de deux siècles, les théories mathématiques sur lesquelles sont basées les analyses des données LIGO-Virgo actuelles.



Cartes temps-fréquence des données des interféromètres LIGO Hanford et Livingston au moment du signal GW150914 (la toute première détection). Sur les première et troisième cartes, on voit clairement les zones sombres en forme de « virgules » qui correspondent au passage de l’onde gravitationnelle. Par contre, une fois soustrait le signal correspondant au meilleur modèle sélectionné par l’analyse (deuxième et quatrième cartes), tout excès a disparu : les résidus sont compatibles avec les fluctuations d’un bruit gaussien seul.

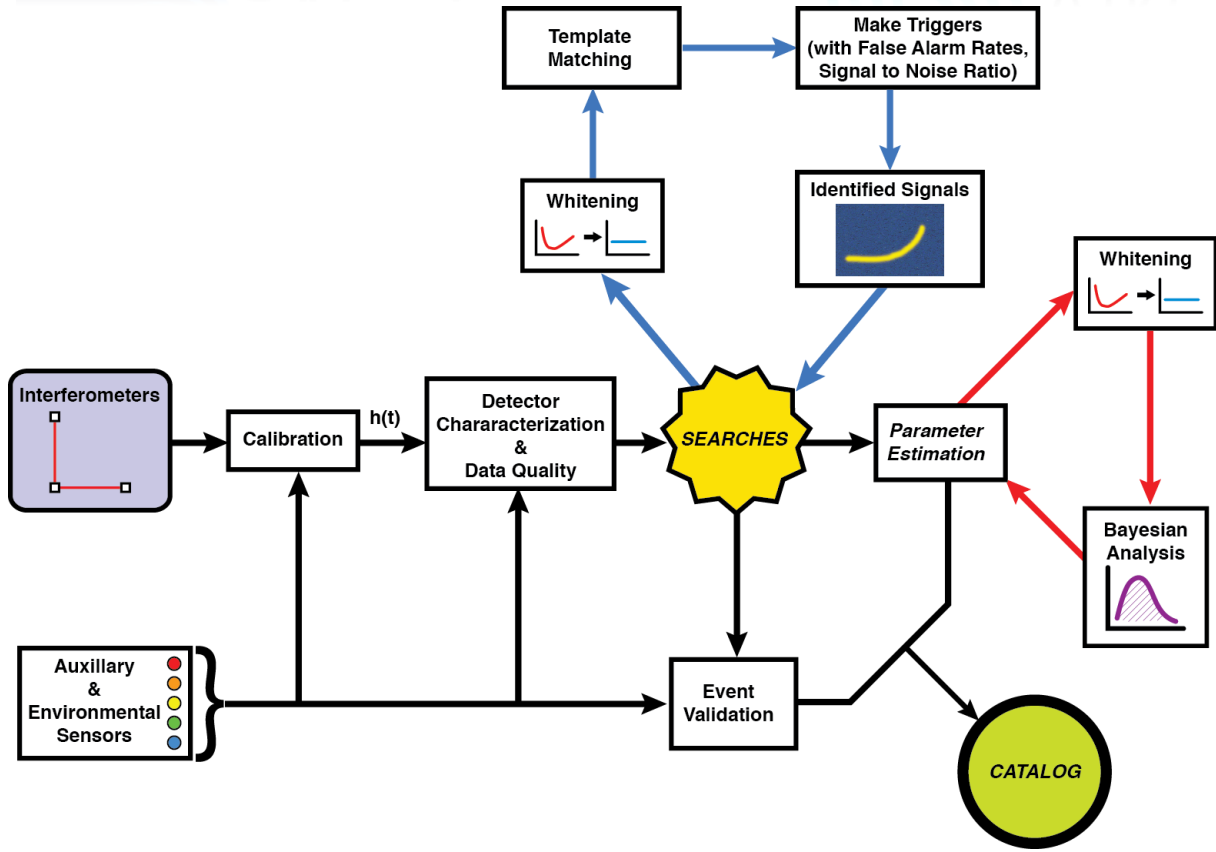


Schéma simplifié montrant les principales étapes de l'analyse des données LIGO-Virgo.