

« Avec les ondes gravitationnelles, nous verrons l'Univers comme nous ne l'avons jamais vu »

La détection d'ondes gravitationnelles par les deux interféromètres d'Advanced LIGO est un grand succès technique et scientifique : elle permettra d'étudier des objets cosmiques étonnants et inaccessibles aux télescopes.



Benoît MOURS est directeur de recherche du CNRS au LAPP à Annecy, et responsable scientifique français de Virgo.

Entretien avec **Benoît Mours**

En février 2016, les collaborations *LIGO* et *Virgo* ont annoncé la confirmation directe d'une prédiction d'Einstein datant de 1916 : l'existence des ondes gravitationnelles. Leur détection marque aussi le début d'une nouvelle ère pour l'astrophysique. Grâce à elles, les chercheurs pourront étudier des objets cosmiques jusque-là invisibles. Benoît Mours, responsable scientifique français de l'expérience franco-italienne *Virgo*, nous éclaire sur le défi que représente la détection et les nouvelles perspectives qu'elle offre à la science.

POUR LA SCIENCE

La détection d'ondes gravitationnelles, survenue le 14 septembre 2015, était une prouesse technique. Pourquoi ?

BENOÎT MOURS : Capturer le signal extrêmement ténu constitué par les ondes gravitationnelles, ces vibrations de l'espace-temps prédites par la théorie de la relativité générale, était un défi technique. Il a fallu plusieurs décennies de recherche et de développement pour améliorer nos instruments.

Donnons une idée de la faiblesse du signal. Une onde gravitationnelle contracte

et dilate alternativement l'espace, c'est-à-dire les distances, sur son passage. Sur le détecteur *Advanced LIGO*, la variation de distance a été de l'ordre de 10^{-18} mètre, soit 100 milliardièmes de la taille d'un atome. *Advanced LIGO* est assez sensible pour mesurer cette infime variation, mais il faut aussi tenir compte du bruit de fond qui risque de dissimuler un tel signal.

PLS

En quoi consiste ce bruit de fond ?

B. M. : Pour comprendre le bruit de fond, il faut d'abord expliquer comment le détecteur fonctionne. Ce dispositif, un interféromètre, utilise les propriétés ondulatoires de la lumière pour mesurer les variations de longueur : un rayon laser est scindé en deux faisceaux qui effectuent une centaine d'allers-retours dans deux tunnels perpendiculaires et longs de 4 kilomètres (les bras de l'interféromètre). Lorsque les faisceaux se rejoignent à l'intersection des bras, ils interfèrent. Si aucune onde gravitationnelle n'a perturbé le détecteur, les faisceaux, déphasés, s'annulent exactement : le signal est nul. Si une onde passe, la longueur des bras varie, un signal est enregistré. Mais le capteur

enregistre aussi du bruit qui peut, s'il est trop important, noyer le signal.

Le bruit de fond a plusieurs sources. Il peut être lié aux instruments, comme les fluctuations du nombre de photons observés dues à la nature quantique de la lumière, etc. Une autre part du bruit vient de l'environnement : on parle de bruit sismique. Il fait vibrer les différents éléments de l'interféromètre. Si l'on n'y prend pas garde, il est impossible d'espérer enregistrer une variation de l'ordre de cent milliardièmes de la taille d'un atome. C'est un défi extraordinaire.

PLS

D'où vient le bruit sismique ?

B. M. : Ce bruit correspond à des vibrations se propageant à la surface de la Terre. On pense tout de suite aux tremblements de terre, mais ces phénomènes sont ponctuels. Les plus problématiques pour nous – car ils sont permanents – sont d'une autre nature : les vagues des océans qui déferlent sur le rivage, le vent qui souffle sur les arbres et dont les racines transmettent les vibrations dans le sol, les activités humaines, etc.

PLS

Comment s'en défaire ?

B. M. : Les détecteurs sont équipés de nombreux dispositifs qui atténuent le bruit. Ces équipements ont été développés et améliorés au fil des ans, depuis la première génération d'interféromètres qui ont opéré dans les années 2000 (*TAMA300* au Japon, *GEO600* en Allemagne, les deux interféromètres de *LIGO* aux États-Unis, l'un à Hanford dans l'État de Washington et l'autre à Livingston en Louisiane, et le détecteur franco-italien *Virgo*, près de Pise). Mais aucune onde gravitationnelle n'a été détectée, car la sensibilité n'était pas suffisante. Il a donc été décidé d'interrompre les prises de données pendant plusieurs années pour améliorer *LIGO* et *Virgo*.

Advanced LIGO, opérationnel depuis septembre 2015 et *Advanced Virgo*, qui débutera à l'automne 2016, représentent la deuxième génération de détecteurs.

PLS

De quelles modifications les versions avancées de *LIGO* et *Virgo* ont-elles bénéficié ?

B. M. : Sur les deux expériences, l'infrastructure (les tunnels) est inchangée. En revanche, toute la partie optique a été améliorée. Notamment, les miroirs ont été remplacés : ils sont plus lourds et bougent ainsi moins. Leur traitement de surface est de meilleure qualité, ce qui permet de faire plus d'allers-retours dans les bras. Un miroir qui amplifie le signal a été ajouté sur *Advanced LIGO*. Il sera aussi installé sur *Advanced Virgo*, mais pas avant 2018.

La puissance du laser a été augmentée. Par ailleurs, toute une série de modifications ponctuelles ont corrigé des bruits instrumentaux. *Advanced LIGO* a aussi revu son système d'isolation du bruit sismique. Il est maintenant équivalent à celui de *Virgo*, qui était déjà très performant.

PLS

Quel a été le gain de sensibilité ?

B. M. : Les interféromètres au sol sont sensibles à une gamme de fréquences comprises entre 10 et 10 000 hertz. La sensibilité

dépend de la fréquence et est maximale à environ 100 hertz. Le gain en sensibilité est de l'ordre d'un facteur 10 en moyenne. Il est surtout important à basse fréquence, au-dessous de 50 hertz.

Pour décrire plus simplement le gain en sensibilité, nous utilisons la distance moyenne (l'horizon) à laquelle le détecteur peut enregistrer la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons. Plus la sensibilité est élevée, plus on verra des binaires lointaines. Soit dit en passant, l'horizon pour des binaires de trous noirs est plus distant, car ces objets dissipent beaucoup plus d'énergie sous la forme d'ondes gravitationnelles.

Dans sa version initiale, *LIGO* avait un horizon d'environ 60 millions d'années-lumière. À terme, *Advanced LIGO* décuplera cette distance. Aujourd'hui, il n'a gagné qu'un facteur 3, en partie parce que le laser ne fonctionne pas à pleine puissance – augmenter l'énergie pose des difficultés techniques. Des phases de prise de données alterneront ainsi avec des phases d'arrêt de la machine afin de poursuivre les améliorations. On devrait atteindre le facteur 10 en 2019.



ÉCOUTER L'UNIVERS grâce aux ondes gravitationnelles est aujourd'hui possible avec les interféromètres géants, tel le détecteur franco-italien *Virgo* photographié ici, dont chacun des deux bras s'étend sur 3 kilomètres.

■ BIBLIOGRAPHIE

B. P. Abbott et al., *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, *Physical Review Letters*, vol. 116, 061102, 2016.

D. Buskulic et L. Villain, *À l'écoute des ondes gravitationnelles*, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

P. Binétruy, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, Dunod, 2015.