

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.

© Collaboration Virgo

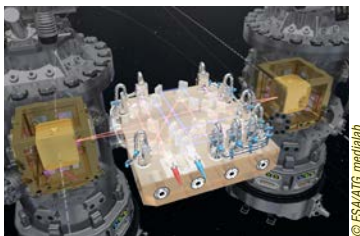


■ BIBLIOGRAPHIE

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.



© ESA/ATG medialab

LISA PATHFINDER est un satellite dont l'objectif est de démontrer le bien-fondé du principe de détection des ondes gravitationnelles du futur interféromètre spatial *eLISA*. Lancé le 3 décembre 2015, le prototype a rejoint sa position prévue à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Les tests ont commencé le 15 février. L'appareil doit montrer qu'il peut maintenir dans son enceinte deux masses en chute libre et les isoler de toute autre force que la gravité. *eLISA* utilisera trois satellites, distants de un million de kilomètres les uns des autres et contenant de telles masses, et mesurera la distance qui les sépare avec des lasers pour détecter les vibrations de l'espace-temps.

PLS

Pourquoi la détection de l'onde gravitationnelle de septembre 2015 est-elle attribuée aux équipes de *LIGO* et de *Virgo*, alors que ce dernier ne fonctionne pas encore ?

B. M. : Les équipes de *LIGO* et de *Virgo* travaillent ensemble depuis 2007. Concrètement, les prises de données de ces expériences étaient simultanées, les données mutualisées et les analyses faites en commun. Cette collaboration se poursuit avec *Advanced LIGO* et *Advanced Virgo*. *Advanced LIGO* a recueilli des données durant quatre mois en 2015, mais ce sont bien les deux équipes qui les ont analysées. La détection de septembre 2015 est donc à mettre au crédit des deux.

Advanced LIGO est actuellement dans une phase d'arrêt technique, jusqu'à l'automne prochain. Du côté d'*Advanced Virgo*, nous prévoyons encore deux mois pour installer les derniers éléments. Puis nous entamerons une phase de réglage. Les deux expériences prendront des données simultanément à l'automne.

PLS

Comment s'est déroulée la découverte du signal du 14 septembre 2015 ?

B. M. : Ce jour-là, une onde gravitationnelle a traversé la Terre et a laissé un signal dans l'interféromètre *LIGO* à Livingston puis quasiment le même, 7 millisecondes plus tard, dans l'interféromètre *LIGO* à Hanford, distant de 3000 kilomètres.

La coïncidence d'un signal, aussi fort et net, sur les deux détecteurs nous a très vite convaincus qu'il s'agissait d'un vrai signal. Mais avant de l'annoncer, nous avons pris le temps – plusieurs mois – de vérifier qu'il n'y avait pas d'erreur et d'analyser les caractéristiques de la source qui a émis ces ondes.

PLS

Comment a-t-on déterminé la nature de cette source ?

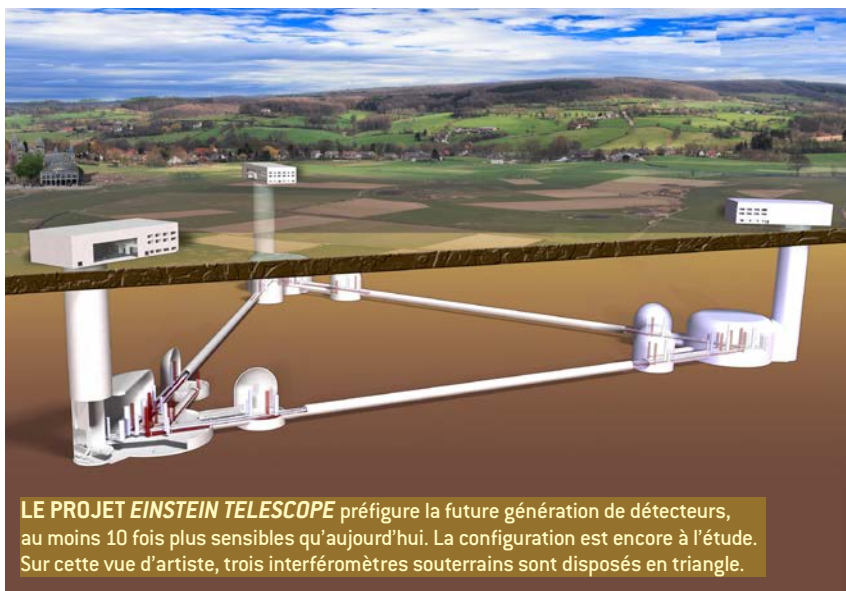
B. M. : Les objets en mouvement (plus exactement, s'ils sont accélérés), s'ils ne sont pas trop symétriques, émettent des ondes gravitationnelles. Les plus intéressants pour nous sont les systèmes binaires d'objets compacts (trous noirs, étoiles à neutrons), les supernovæ, etc. La forme du signal permet d'identifier le type d'objet. Dans le cas du signal du 14 septembre 2015, il s'agit d'un système binaire de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires qui ont fusionné pour donner un trou noir de 62 masses solaires. Les ondes que nous avons observées ont été émises pendant la dernière seconde de la coalescence des deux astres.

L'énergie libérée par ce système et l'intensité du signal mesuré nous ont permis d'estimer la distance à laquelle il se situe : environ un milliard d'années-lumière. Nous avons aussi délimité une zone où il se trouverait dans le ciel de l'hémisphère Sud. Les estimations de la position et de la distance sont entachées d'incertitudes assez importantes, car nous n'avions que les deux détecteurs d'*Advanced LIGO*. Si *Advanced Virgo* avait été opérationnel, donc avec trois détecteurs, ces mesures auraient été plus précises, d'un facteur 10 à 100. Cela montre tout l'intérêt qu'il y a à travailler ensemble.

PLS

D'autres interféromètres sont-ils à l'étude ?

B. M. : *Advanced LIGO* et *Advanced Virgo* seront rejoints d'ici à la fin de la décennie par l'interféromètre japonais *KAGRA*, qui sera installé sous terre pour limiter le bruit sismique. Par ailleurs, un accord de principe pour le financement d'un interféromètre *LIGO* en Inde vient d'être signé. Les Américains avaient d'abord prévu de construire deux interféromètres superposés à Hanford. Ils ont fabriqué les éléments nécessaires, mais comme il était finalement plus intéressant d'installer l'interféromètre supplémentaire à



© ASPERA/Marco Kraan/Nikhef

LE PROJET EINSTEIN TELESCOPE préfigure la future génération de détecteurs, au moins 10 fois plus sensibles qu'aujourd'hui. La configuration est encore à l'étude. Sur cette vue d'artiste, trois interféromètres souterrains sont disposés en triangle.

grande distance, ils ont cherché un autre site pour ce troisième détecteur. L'Inde semble prête à l'accueillir. À plus longue échéance, nous réfléchissons à une nouvelle génération d'interféromètres, tel le *Einstein Telescope*. Le concept n'est toujours pas arrêté, mais avec les techniques actuelles, nous pourrions gagner encore un ordre de grandeur sur la sensibilité et donc multiplier par 1000 le nombre de sources astrophysiques potentiellement détectables.

PLS

On dit que les ondes gravitationnelles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Que vont-elles révéler ?

B. M. : L'étude des ondes gravitationnelles apportera son lot de découvertes astrophysiques. D'une part, la découverte de septembre 2015 confirme l'existence de binaires de trous noirs, des systèmes que l'on n'avait jamais observés. *A priori*, ces objets n'émettent que des ondes gravitationnelles et seuls les interféromètres sont capables de les « voir ». Mais si au moins l'un des trous noirs est remplacé par une étoile à neutrons, elle sera disloquée et la coalescence s'accompagnera de fortes émissions de photons ou de neutrinos. C'est pourquoi, lorsque les interféromètres détectent un signal, l'alerte est transmise à de nombreux télescopes ainsi qu'aux expériences de neutrinos *IceCube* et *Antares*.

La complémentarité des observations permettra de mieux connaître les phénomènes qui se déroulent dans l'Univers. Par exemple, lorsqu'une étoile massive explose, elle forme une supernova, source intense de lumière et de neutrinos. Son cœur s'effondre et laisse un objet très compact, tel qu'une étoile à neutrons ou un trou noir. Mais l'évolution du cœur de l'étoile durant l'explosion, opaque à la lumière, est mal connue. Les ondes gravitationnelles émises pendant l'effondrement pourraient fournir de précieuses informations.

Nous allons aussi pouvoir étudier les étoiles à neutrons. Celles-ci ont un champ gravitationnel si intense qu'elles sont parfaitement sphériques, mais elles pourraient malgré tout présenter des « montagnes » de quelques millimètres. Cette asymétrie serait source d'ondes gravitationnelles.

Pour en revenir aux binaires de trous noirs, ces systèmes sont invisibles avec les télescopes, et les ondes gravitationnelles sont



UNE ÉTOILE À NEUTRONS

est si dense que sa gravité lui impose une forme sphérique quasi parfaite. Si une « montagne » haute de quelques millimètres était présente à sa surface, cet astre en rotation rapide émettrait des ondes gravitationnelles détectables.

donc le seul moyen d'estimer leur nombre dans l'Univers. Par ailleurs, nous serons aussi en mesure d'analyser la composition des étoiles et de l'environnement qui ont engendré ces trous noirs. Par exemple, dans le système détecté en septembre, les trous noirs sont plutôt massifs ; les étoiles qui les ont produits ont donc perdu une quantité limitée de matière, le reste ayant formé les trous noirs. D'après les modèles théoriques, ce scénario n'est possible que si la métallicité des étoiles (la concentration en éléments lourds) était très faible.

Grâce à *Advanced LIGO* et *Advanced Virgo*, nous verrons l'Univers comme nous ne l'avons jamais vu et récolterons des données qui aideront à affiner les modèles théoriques.

PLS

D'autres objets sont des sources intéressantes d'ondes gravitationnelles. Pourra-t-on, par exemple, étudier les trous noirs supermassifs ?

B. M. : Les trous noirs supermassifs, tels ceux tapis au centre des galaxies, peuvent former des systèmes binaires, mais ils ne tournent pas au rythme d'une centaine de tours par seconde comme les binaires de trous noirs stellaires en coalescence. La fréquence des ondes gravitationnelles émises est donc beaucoup plus faible. Or les

interféromètres au sol se heurtent au bruit ambiant, trop important dans cette gamme de fréquences. Il faut donc s'éloigner de la Terre et s'installer dans l'espace. C'est l'idée du projet *eLISA* : trois satellites formeront un triangle équilatéral d'un million de kilomètres de côté. Le principe est le même que les interféromètres au sol – mesurer les distances entre les satellites –, mais les problématiques et les techniques à mettre en œuvre sont très différentes.

Un démonstrateur du principe d'*eLISA*, *LISA Pathfinder*, a été envoyé il y a quelques mois dans l'espace. Si tout va bien, le décollage d'*eLISA* est prévu pour 2034.

eLISA suivra aussi les systèmes binaires d'étoiles à neutrons ou de trous noirs qui sont encore loin de la coalescence et dont les orbites décrivent un tour par heure, par exemple. Le signal serait assez faible, mais il pourra être suivi sur une longue durée.

Pour être complet, les interféromètres ne sont pas le seul moyen d'étudier les ondes gravitationnelles. Des projets utilisent les pulsars, des étoiles à neutrons qui émettent un signal périodique extrêmement régulier. On peut donc établir un réseau de pulsars qui, lors du passage d'une onde gravitationnelle, avance ou retarde leurs signaux périodiques. Ces projets sont également à suivre de près. ■

Propos recueillis par Sean BAILLY