

Les complots finissent-ils toujours par être révélés ?

par Nicolas Gauvrit, sur le blog Raison et psychologie

Récemment, un physicien de l'université d'Oxford, David Grimes, a publié un article censé démontrer qu'il est très improbable qu'un vaste complot impliquant un grand nombre de personnes puisse rester secret longtemps (http://bit.ly/pls462_scilogs). C'est un argument intuitif contre les théories du complot. Difficile de croire, par exemple, que des milliers de personnes auraient participé à un complot visant à intoxiquer la population mondiale avec des vaccins sans qu'aucune ne vende la mèche durant des décennies.

Pourtant, cet argument n'était pas prouvé : peut-être est-il vraiment possible de dissimuler indéfiniment des complots ? C'est pourquoi nombre de ceux qui s'inquiètent de la popularité des théories du complot ont accueilli avec enthousiasme l'annonce de cette démonstration, un « coup fatal » pour les « complotistes ». De nombreux sites ont relayé l'information. Hélas, cet article ne démontre rien du tout ! Voyons pourquoi.

Précisons d'abord que le fait que la preuve soit fausse ne signifie pas que la conclusion l'est : il reste vraisemblable qu'un complot à grande échelle soit, forcément, rapidement dévoilé.

David Grimes propose trois modèles pour calculer le risque de fuite dans un complot. Le premier suppose que le nombre de personnes impliquées est constant au cours du temps. Dans les deux autres, le nombre de personnes impliquées diminue avec le temps, ce qui semble réaliste (si on exclut les Illuminati et autres supposées organisations secrètes séculaires). Mais David Grimes commet ensuite une grossière erreur. Pour déterminer la probabilité de fuite au bout de, par exemple, 50 ans, il calcule le nombre de personnes encore impliquées après 50 ans, par exemple 5, puis fait comme s'il n'y avait que ces 5 personnes depuis le début ! Une bourde qui fait très mauvais effet...



Résultat ? Le seul modèle viable est le moins réaliste, mais aussi le plus défavorable aux « complotistes ». Pire, il converge par construction (loi de Poisson) vers une probabilité de fuite de 100 %. En d'autres termes, il est inscrit dans les hypothèses du modèle qu'un complot ne pourra jamais rester indéfiniment caché. Mais ce n'est pas tout.

Ce modèle nécessite d'estimer la probabilité p qu'un membre d'une conspiration révèle le complot pendant une unité de temps donnée (un an). Pour ce faire, David Grimes a utilisé des complots connus, qui ont été révélés. Mais il n'en a trouvé que... trois : le scandale d'espionnage de la NSA, l'affaire de Tuskegee (des patients atteints de syphilis n'ont volontairement pas été soignés), et le cas des faux témoignages des experts scientifiques du FBI. C'est très peu.

Néanmoins, on pourrait quand même déduire une approximation très grossière de la probabilité de fuite à partir de ces maigres données. Sauf que l'auteur utilise une méthode discutable : il suppose qu'un complot ne peut être révélé que lorsque la probabilité qu'il le soit dépasse 50 %. Cela le conduit à une inégalité aux conséquences

étranges : il suffit qu'une fois dans l'histoire un complot ait été dévoilé après moins de 7 mois pour que $p = 100\%$. Ainsi, si une fuite apparaissait au bout de 7 mois, toute personne ayant participé à un complot le révélerait à coup sûr chaque année... Peu crédible.

Ce que montre cette affaire, c'est que même sceptiques ou rationalistes, nous avons tous tendance à accepter avec plaisir et sans méfiance un résultat qui abonde dans notre sens. Les absurdités que nous condamnons chez les complotistes se retrouvent hélas parfois de notre côté. Cette erreur rappelle aussi que la publication dans une revue à comité de lecture n'est pas la fin de l'histoire ni la preuve ultime. Restons prudents ! ■



Nicolas GAUVRIT est maître de conférences en mathématiques à l'université d'Artois et psychologue du développement. Il est l'auteur du blog Raison et psychologie (www.scilogs.fr/raisonetpsychologie/).



Retrouvez tous nos blogueurs sur www.SciLogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.

La détection des **ONDES** **GRAVITATIO** une nouvelle fenêtre

Prédites par Einstein en 1916, les ondes gravitationnelles n'avaient jamais été détectées directement. C'est enfin chose faite : en enregistrant les ondes émises par la fusion de deux trous noirs, l'expérience *Advanced LIGO* inaugure une nouvelle ère pour l'astronomie.

Sean Bailly

L'ESSENTIEL

- Le 14 septembre 2015, les deux interféromètres de *LIGO*, aux États-Unis, ont détecté pour la première fois une onde gravitationnelle, c'est-à-dire une vibration de l'espace-temps.
- Sa source, distante de un milliard d'années-lumière, est un système de deux trous noirs qui ont fusionné.
- Cette détection confirme une fois de plus la théorie d'Einstein, met au jour un système de trous noirs et ouvre un nouveau champ de l'astronomie observationnelle.

© Monumma Design Ltd

NNELLES

sur l'Univers

Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine, très lointaine, deux trous noirs ont entamé une danse cosmique d'abord lente et à distance, puis de plus en plus rapide et rapprochée. Ils ont spiralé l'un autour de l'autre pendant une période qui pourrait avoir duré jusqu'à des milliards d'années. Puis la chorégraphie s'est achevée brutalement avec la collision des deux corps, qui ont fusionné en un trou noir plus massif.

Au cours de ce ballet, et surtout pendant l'ultime fraction de seconde, le tissu de l'espace-temps a fortement vibré, et ces vibrations se sont propagées à la vitesse de la lumière à travers le cosmos. Environ 1,3 milliard d'années plus tard, le 11 février 2016, les équipes des collaborations *LIGO* et *Virgo* ont annoncé avoir détecté ces « ondes gravitationnelles » dont l'existence a été prédite en 1916 par Albert Einstein. « Gravitationnelles », parce que la théorie de la relativité générale, dont on vient de fêter les cent ans, décrit la gravitation comme une manifestation de la déformation de l'espace-temps.

Une prédiction centenaire

L'événement est historique. Un siècle a été nécessaire pour relever les défis aussi bien théoriques qu'expérimentaux que posaient les ondes gravitationnelles. Dès 1905, en étudiant un modèle incomplet de gravitation incluant l'invariance de la vitesse de la lumière, Henri Poincaré évoquait déjà la notion d'« onde gravifique ». Mais c'est bien dans le cadre de la relativité générale qu'Einstein a émis l'hypothèse la plus convaincante des ondes gravitationnelles. Les physiciens ont mis plusieurs décennies à développer les outils mathématiques pour étudier ces ondes et comprendre qu'il était en principe possible de les détecter.

En 1974, les Américains Joseph Taylor et Russell Hulse ont donné la première preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles. Ils ont découvert le système binaire PSR B1913+16, qui contient un pulsar (une étoile à neutrons qui émet des ondes électromagnétiques de façon régulière, un signal utile pour effectuer des mesures précises), puis ils ont montré que la période de révolution du système diminuait lentement (les deux corps se rapprochaient l'un de l'autre) car ce dernier perdait

■ L'AUTEUR



Sean BAILY est docteur en cosmologie et journaliste à *Pour la Science*.

de l'énergie en accord avec les calculs de relativité générale où l'énergie est dissipée sous la forme d'ondes gravitationnelles. Les deux chercheurs ont reçu le prix Nobel de physique en 1993 pour ces travaux.

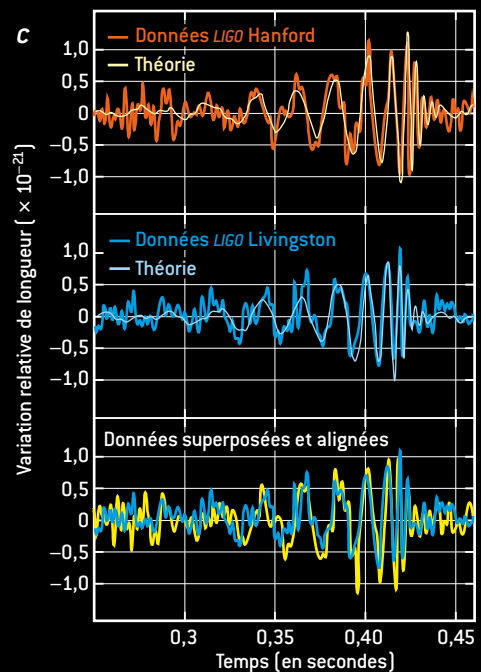
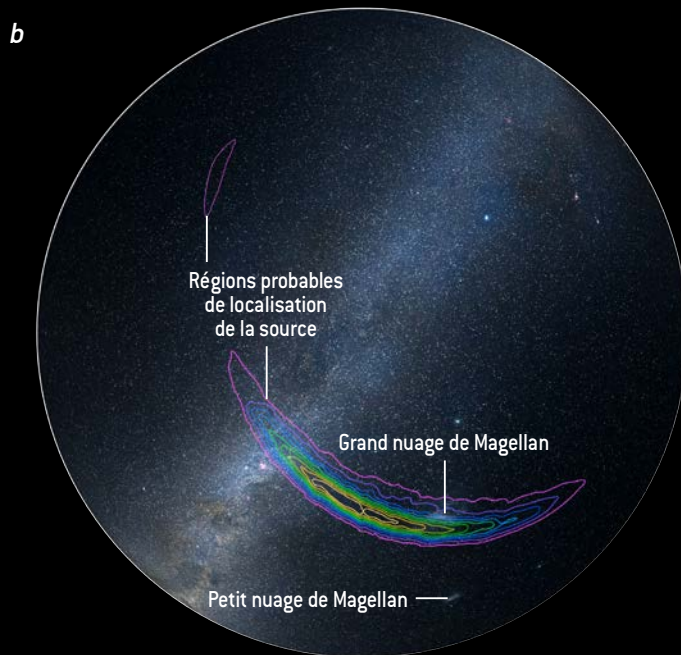
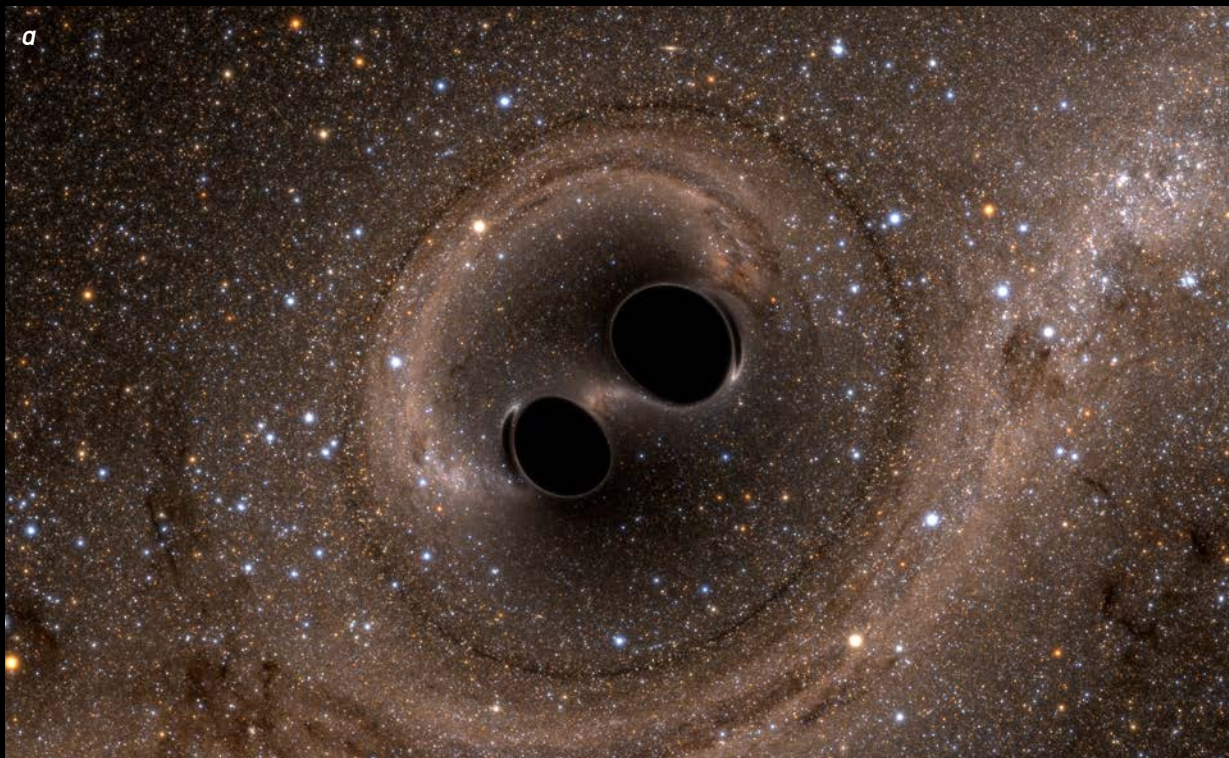
Il restait à détecter directement les ondes gravitationnelles. La piste la plus prometteuse était d'utiliser un interféromètre géant, concept imaginé dans les années 1960 et qui a connu une amélioration décisive dans les années 1970 sous l'impulsion de Rainer Weiss, du MIT (Institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis. Une première génération de ces dispositifs a été mise en service dans les années 2000 avec *TAMA300* au Japon, *GEO600* en Allemagne, *LIGO* aux États-Unis (situé sur deux sites séparés de plusieurs milliers de kilomètres, l'un à Livingston, en Louisiane, et l'autre à Hanford, dans l'État de Washington, voir les figures page 32) et *Virgo*, une expérience franco-italienne installée près de Pise.

Ces expériences n'ont pas observé d'ondes, mais elles ont ouvert la voie à des améliorations techniques qui ont permis d'augmenter la sensibilité des détecteurs *Advanced LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*), opérationnel depuis septembre 2015, et *Advanced Virgo*, qui prendra des données à partir de 2016.

Le signal tant attendu a été détecté le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure de Paris) par les deux détecteurs jumeaux de l'expérience *Advanced LIGO*. Ce signal entre dans l'histoire sous le nom GW150914, forgé avec la date et l'abréviation de *Gravitational Wave*. L'analyse des données étant assurée conjointement par les équipes de *LIGO* et de *Virgo*, la découverte est attribuée aux deux collaborations.

Le signal GW150914 est en réalité une double découverte : c'est la première détection directe d'ondes gravitationnelles, mais aussi la confirmation de l'existence de systèmes binaires de trous noirs (voir la figure à page ci-contre). Ces objets d'une densité extrême courbent l'espace-temps environnant de sorte que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière. Ainsi, les systèmes binaires de trous noirs isolés n'émettent aucun rayonnement et ne peuvent donc être détectés que par l'émission d'ondes gravitationnelles.

Des ondes émises
il y a 1,3 milliard
d'années
ont été enregistrées par
les interféromètres de *LIGO*
le 14 septembre 2015



LA FUSION DE DEUX TROUS NOIRS d'environ 30 masses solaires chacun a produit les ondes gravitationnelles détectées par *LIGO*. La simulation numérique [a] du système en coalescence montre comment ces objets déforment l'espace-temps dans leur voisinage. Le signal enregistré par les deux détecteurs de *LIGO* a permis d'estimer que le système était situé à près d'un milliard d'années-lumière. Sachant que l'onde se propage à la vitesse de la lumière et que le signal est arrivé à Livingston 7 millisecondes avant d'atteindre Hanford [c], les physiciens ont délimité une zone

où se trouverait la source du signal : approximativement dans la direction du Grand nuage de Magellan, visible dans le ciel de l'hémisphère Sud [b, les courbes délimitent la région d'où viendrait l'onde gravitationnelle]. La similarité des signaux de Livingston et de Hanford [c, en bas] a été une preuve que les deux détecteurs avaient enregistré le même phénomène. Par ailleurs, le signal théorique d'ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs [c] reproduit de façon satisfaisante les variations de fréquence et d'amplitude du signal mesuré.

DES LASERS POUR DÉTECTER LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Dans les années 2000, une première génération d'interféromètres géants a vu le jour (*LIGO* sur deux sites aux États-Unis, *Virgo* en Italie, *GEO600* en Allemagne et *TAMA300* au Japon). Ces instruments utilisent les propriétés ondulatoires de la lumière pour détecter les vibrations de l'espace-temps. S'ils n'ont pas enregistré d'ondes gravitationnelles, ils ont servi à améliorer les techniques aujourd'hui utilisées par *Advanced LIGO* (dont le détecteur de Livingston est schématiquement représenté ci-contre), *Advanced Virgo* et d'autres projets à venir.

L'ESPACE OSCILLE

Les ondes gravitationnelles (*en vert*) déforment l'espace sur leur passage. Elles le contractent et l'étirent alternativement. Pour détecter leur passage, une solution est de mesurer les variations de la distance qui sépare deux objets, des masses-test.

QUELLE EST LA FORME DE L'ONDE GRAVITATIONNELLE ?

Les ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs ou d'étoiles à neutrons et d'une supernova ont des formes différentes. Leurs caractéristiques dépendent des propriétés de la source, telle la masse des objets qui la composent.

Le signal obtenu en septembre 2015 par *Advanced LIGO* correspond à la coalescence de deux trous noirs. Il se compose de trois parties liées au processus de coalescence. Dans un premier temps, les corps décrivent une spirale l'un autour de l'autre en se rapprochant. La fréquence et l'amplitude du signal augmentent progressivement et l'onde devient détectable juste avant la fusion (le *chirp* en anglais). Lors de la fusion, le signal est bref, irrégulier et d'amplitude importante. Puis l'horizon du trou noir né de la fusion vibre avant de se stabiliser. Cette désexcitation s'accompagne d'un signal dont l'amplitude et la fréquence diminuent régulièrement, le *ringdown* en anglais.

« Chirp »
(phase finale
de rotation
en spirale)

Fusion
(coalescence)

« Ringdown »
(désexcitation
du trou noir)

Miroir de fond
du bras sud
(masse-test)

LIGO
HANFORD

LIGO LIVINGSTON

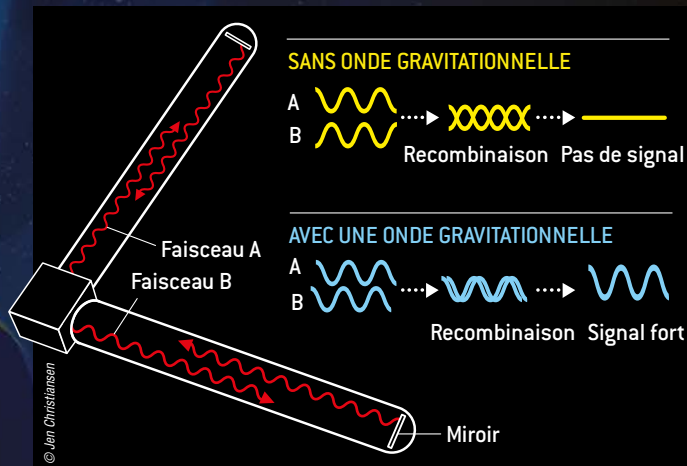
MESURER UNE VARIATION INFIME

Le passage d'une onde gravitationnelle à travers un interféromètre de *LIGO* – ici celui de Livingston – fait osciller la longueur des bras (en étirant l'un et contractant l'autre, puis en inversant les effets). Les miroirs aux extrémités des bras servent de masses-test. Grâce à un laser, on mesure la variation de distance entre ces masses-test. La longueur des bras (4 kilomètres) et la centaine d'allers et retours du laser dans les bras amplifient les variations de distance. Néanmoins, celles-ci restent de l'ordre de cent millièmes de la taille d'un atome.

Laser

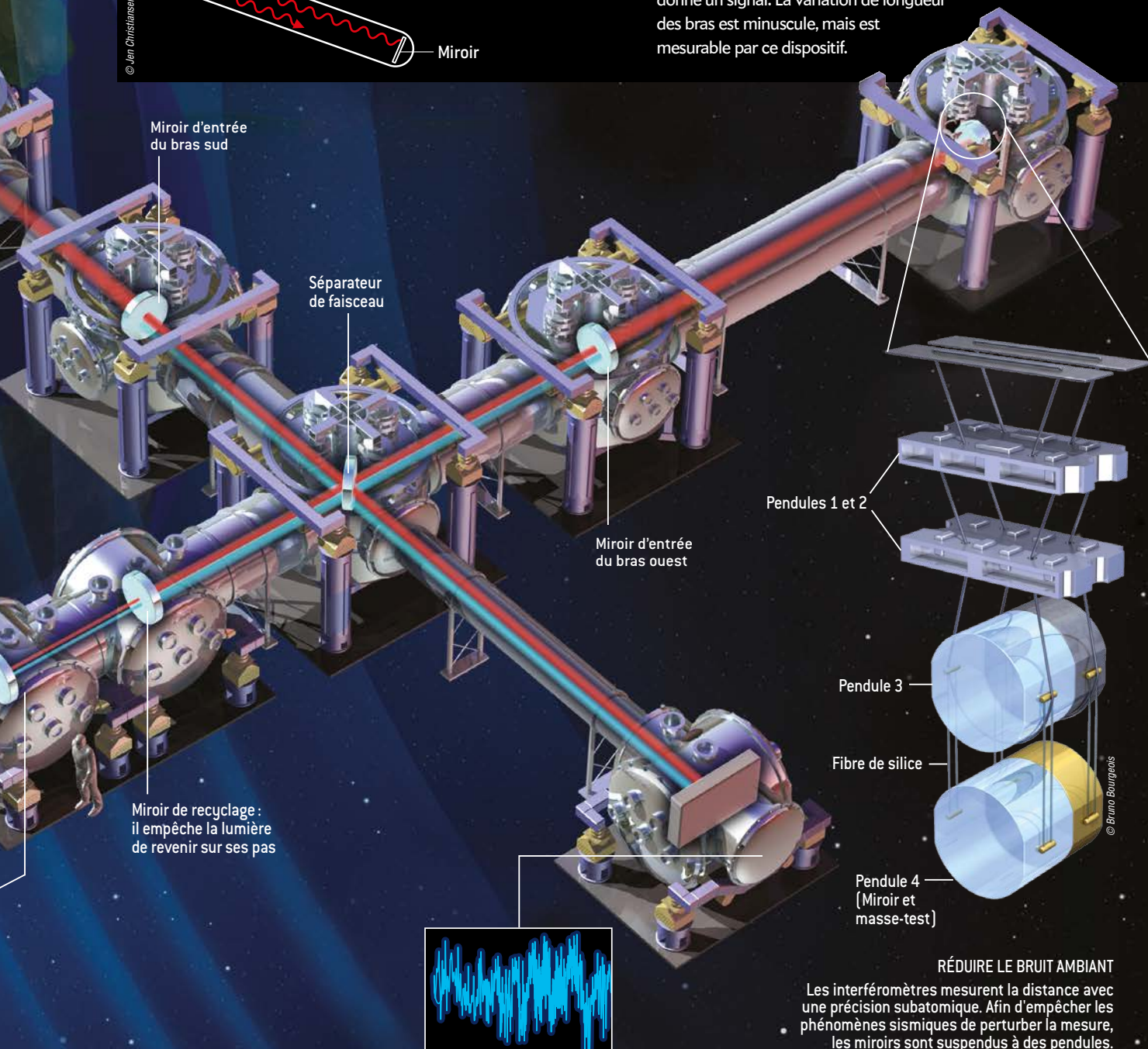
Modulateur
de fréquence :
il crée un faisceau
de référence

Résonateur :
il supprime
les instabilités
du laser



L'INTERFÉROMÉTRIE LASER

Le principe des interféromètres, tels *LIGO* et *Virgo*, est fondé sur la superposition de deux faisceaux laser. Un rayon laser est divisé en deux (A et B, ci-contre), dont l'un est déphasé par rapport à l'autre. Ces deux faisceaux sont envoyés dans des directions perpendiculaires, dans des bras longs de plusieurs kilomètres. Lorsque les faisceaux se recombinent (en jaune), les ondes déphasées se compensent: le faisceau résultant s'éteint et la photodiode n'enregistre aucun signal. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse le détecteur, elle modifie la longueur relative des bras (en bleu). La recombinaison des faisceaux donne un signal. La variation de longueur des bras est minuscule, mais est mesurable par ce dispositif.



La photodiode enregistre le motif d'interférence des deux faisceaux. Ces données contiennent du bruit et potentiellement un signal qu'il faut isoler.

RÉDUIRE LE BRUIT AMBIANT

Les interféromètres mesurent la distance avec une précision subatomique. Afin d'empêcher les phénomènes sismiques de perturber la mesure, les miroirs sont suspendus à des pendules. Dans la version *Advanced LIGO*, les miroirs sont plus gros qu'auparavant et suspendus à un quadruple pendule, au lieu d'un pendule simple. Ces miroirs oscillent, mais dans des gammes de fréquences qui n'empêchent pas la mesure de l'onde gravitationnelle provenant d'une coalescence de deux trous noirs, par exemple.



lumineuse émise par l'ensemble des étoiles et galaxies de l'Univers observable! Tout aussi spectaculaire, juste avant la fusion, les deux trous noirs étaient distants de quelques centaines de kilomètres et effectuaient 75 orbites par seconde (la fréquence des ondes gravitationnelles associées est de l'ordre de 150 hertz), décrites à des vitesses de l'ordre de la moitié de celle de la lumière.

Dix fois la puissance de toutes les étoiles

Les signaux enregistrés par les deux détecteurs d'*Advanced LIGO* livrent d'autres informations. Le système binaire était situé à environ 1,3 milliard d'années-lumière. Enfin, le retard de 7 millisecondes entre le signal enregistré à Livingston et celui capté à Hanford et la distance qui sépare ces sites ont permis d'estimer, par triangulation, que la source était située dans une région de la voûte céleste de l'hémisphère Sud (voir la figure b page 29).

La découverte par *LIGO* et *Virgo* d'une onde gravitationnelle démontre l'efficacité des interféromètres géants. Ces détecteurs utilisent une source laser divisée en deux faisceaux, lesquels font de multiples allers et retours dans deux tunnels perpendiculaires, longs de 3 kilomètres pour *Virgo* et de 4 kilomètres pour *LIGO* (voir la figure pages 30 et 31). À la fin de leur parcours, les faisceaux se rejoignent à l'intersection des deux tunnels, où ils interfèrent de façon destructive (voir la figure page 31). Le capteur placé en aval de ce point reçoit alors un signal nul. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse le dispositif, elle contracte et étire alternativement la longueur des tunnels. L'interférence entre les deux faisceaux n'annule plus exactement le signal.

Le principe physique du dispositif est simple, mais la mise en œuvre est un défi pour les chercheurs et les ingénieurs. En effet, à l'arrivée d'une onde gravitationnelle suffisamment intense pour qu'on puisse espérer la détecter, la variation de longueur des bras de l'interféromètre est de l'ordre de 100 milliardièmes de la taille d'un atome! Les interféromètres géants sont sensibles à un changement aussi faible, mais les physiciens doivent écarter de nombreuses sources de bruit qui imitent ou couvrent le signal (les mouvements sismiques de la Terre, l'agitation thermique des atomes à la surface des miroirs placés aux extrémités des bras de l'interféromètre, etc.).

DEUX DÉTECTEURS Jumeaux

séparés de 3 000 kilomètres composent l'expérience américaine *Advanced LIGO*.

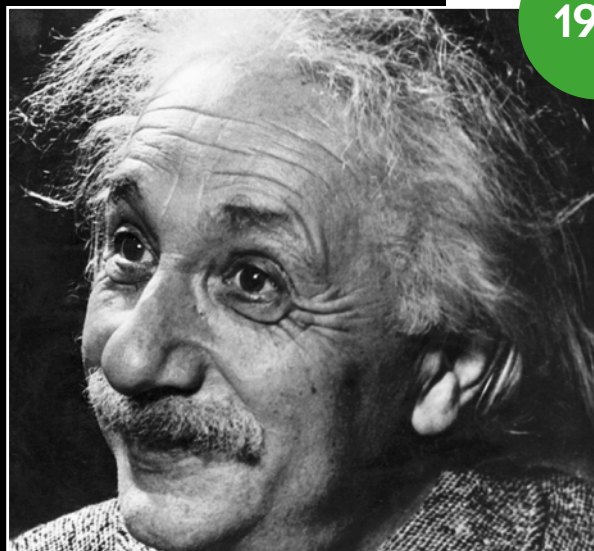
L'un est situé à Hanford, dans l'État de Washington (en haut) et l'autre est à Livingston, en Louisiane (en bas).

Par ailleurs, la théorie de la relativité générale décrit les propriétés de ces ondes et comment elles évoluent dans le cas d'une coalescence de deux trous noirs: en particulier, la fréquence et l'amplitude augmentent lors du rapprochement en spirale des deux corps, jusqu'à devenir détectables juste avant la fusion. Pendant la fusion, le signal est très bref, irrégulier avec une amplitude élevée. Puis, lors de la désexcitation (*ringdown* en anglais) du trou noir final – dont la surface (l'horizon) vibre avant de se stabiliser –, le signal perd en amplitude et la fréquence diminue (voir la figure pages 30 et 31).

L'analyse du signal obtenu par *Advanced LIGO* révèle certaines caractéristiques de la source de l'onde gravitationnelle. GW150914 a été produit par la fusion de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires. Et la coalescence a produit un trou noir de 62 masses solaires. L'énergie équivalente à trois fois la masse du Soleil s'est donc convertie en ondes gravitationnelles. Cette énergie, selon la formule d'Einstein qui relie l'énergie à la masse ($E = mc^2$), est colossale. La puissance émise au plus fort de la coalescence est comparable à dix fois la puissance

CENT ANS À LA POURSUITE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

- 1916** ■ Albert Einstein émet l'hypothèse des ondes gravitationnelles dans le cadre de la théorie de la relativité générale.



1916

- 1957** ■ Felix Pirani montre qu'il serait possible de détecter les vibrations de l'espace-temps grâce à deux masses-test.
- 1966** ■ Joseph Weber entame la construction de ses « barres », une première tentative de détection d'ondes gravitationnelles.
- 1972** ■ Rainer Weiss améliore le concept d'interféromètre géant pour détecter les vibrations de l'espace-temps.
- 1974** ■ Joseph Taylor et Russell Hulse montrent que le pulsar binaire PSR B1913+16 perd de l'énergie en accord avec l'hypothèse d'ondes gravitationnelles.
- 1994** ■ Début de la construction des détecteurs *Virgo* et *LIGO*.
- 2015** ■ Démarrage d'*Advanced LIGO* et première détection d'une onde gravitationnelle.
- 2016** ■ Démarrage prévu d'*Advanced 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.

P. Grandclément, Trous noirs et ondes gravitationnelles, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

D. Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought : Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, Princeton University Press, 2007.

Après une première phase d'acquisition de données dans les années 2000, les équipes de *LIGO* et *Virgo* ont entrepris d'importantes modifications techniques pour augmenter la sensibilité de leurs détecteurs (et l'améliorer d'un facteur 10 pour certaines fréquences). *Advanced LIGO* a redémarré en septembre 2015 et *Advanced Virgo* devrait être opérationnel à l'automne 2016. L'amélioration de la sensibilité des instruments se poursuivra. Ces derniers seront rejoints par *KAGRA*, un détecteur en cours de construction au Japon. Et le financement pour un interféromètre *LIGO* installé en Inde vient d'être accepté.

Un réseau de détecteurs

La mise en réseau de tous ces détecteurs ouvre d'extraordinaires perspectives pour l'astronomie et l'étude de l'Univers. Jusqu'à présent, pour étudier l'espace, les astronomes n'utilisaient que la lumière, dont ils exploitaient toutes les longueurs d'onde du spectre (des ondes radio aux rayons gamma). Les ondes gravitationnelles promettent d'explorer des phénomènes inaccessibles à la lumière. Par exemple, une étoile massive en fin de vie qui s'effondre sur elle-même produit des ondes gravitationnelles, alors que le cœur de l'étoile est opaque pour la lumière. Les ondes gravitationnelles pourraient donc fournir des informations précieuses sur ce qui se passe au cœur d'une supernova. Il y a néanmoins une incertitude sur l'intensité du signal et le nombre de supernovæ que l'on pourra détecter ainsi.

Les détecteurs au sol ont une sensibilité optimale pour des ondes gravitationnelles de fréquences comprises entre 10 et quelques milliers de hertz, ce qui est idéal pour l'étude des coalescences de systèmes binaires de trous noirs ou d'étoiles à neutrons, ou pour les supernovæ.

Cependant, d'autres sources d'ondes gravitationnelles de fréquences plus basses (émises par des coalescences de trous noirs supermassifs entre autres) échappent à ces détecteurs. Des projets d'interféromètres spatiaux, non soumis aux vibrations sismiques, pourront les étudier, tels *eLISA*, prévu à l'horizon de 2030, et dont un prototype *LISA Pathfinder* a été mis en orbite en décembre 2015. La découverte des équipes de *LIGO* et *Virgo* n'est que la toute première étape d'une nouvelle ère de l'astronomie, qui sondera les objets les plus étonnants du cosmos et même de l'Univers primordial. ■

« 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.

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



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

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

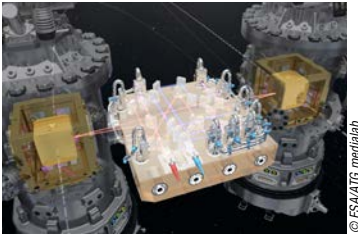
B. P. Abbott et al., *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, *Physical Review Letters*, vol. 116, 061102, 2016.

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.



© Collaboration Virgo



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 ?

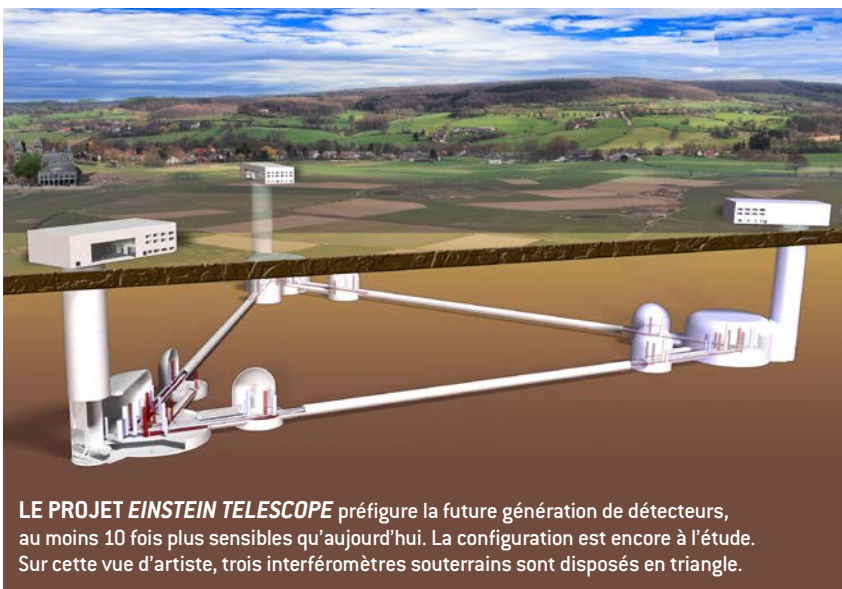
B. M. : Les objets en mouvement (plus exactement, s'ils sont accélérés), s'ils ne sont pas trop symétriques, émettent des ondes gravitationnelles. Les plus intéressants pour nous sont les systèmes binaires d'objets compacts (trous noirs, étoiles à neutrons), les supernovæ, etc. La forme du signal permet 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



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.

© ASPERA/Marco Kraan/Nikhef

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

Quand nos horloges biologiques se dérèglent

Keith Summa et Fred Turek

Les fonctions du foie, du pancréas et d'autres tissus se synchronisent avec l'horloge centrale de l'organisme grâce à l'action de certains gènes. Le dérèglement de ces horloges périphériques augmente le risque d'obésité, de diabète, de dépression...

L'effet d'un décalage horaire ne vous est probablement pas inconnu. Si vous avez voyagé en avion pendant plusieurs heures vers l'est ou vers l'ouest, vous avez déjà ressenti ce qui se produit lorsque l'horloge interne de l'organisme n'est pas en phase avec le fuseau horaire où vous vous trouvez. Il faut parfois plus d'une semaine pour se remettre du décalage horaire (*jetlag* en anglais), selon l'avance ou le retard que doit prendre l'horloge centrale, au cœur du cerveau, pour synchroniser avec la tombée de la nuit le moment où l'organisme et le cerveau ont besoin de dormir.

Ces dernières années, cependant, des biologistes ont montré que l'horloge centrale n'est pas le seul élément de notre horloge interne. Le fonctionnement de l'organisme dépend de plusieurs autres horloges localisées dans le foie, le pancréas et d'autres organes, ainsi que dans le tissu adipeux – les cellules qui stockent des graisses. Si l'une ou l'autre de ces horloges périphériques se désynchronise de l'horloge centrale, le désordre qui en résulte favorise le développement de l'obésité, du diabète, de la dépression ou d'autres troubles complexes.

L'ESSENTIEL

- Dans le cerveau, une horloge centrale régule les cycles de nombreux processus biologiques.
- Dans le foie, le pancréas et divers organes et tissus, d'autres horloges synchronisent le fonctionnement de ces différentes parties avec l'horloge centrale.
- Manger ou dormir de façon répétée aux mauvais moments désynchronise ces horloges.
- Ces perturbations prédisposent au développement de l'obésité, du diabète, de la dépression et d'autres maladies.

Nous nous sommes tous deux consacrés à l'exploration du mode de fonctionnement de ces horloges périphériques et à l'identification des gènes qui régulent leur activité – rassemblés sous le nom de gènes d'horloge. Le premier a été isolé chez la mouche du vinaigre en 1984. L'un de nous (Fred Turek) faisait partie de l'équipe qui, en 1997, a découvert le premier gène impliqué chez les mammifères. Depuis, des chercheurs du monde entier ont identifié des dizaines de gènes jouant un rôle dans la synchronisation de l'organisme, auxquels ils ont donné des noms évocateurs tels que *Clock* (pour horloge), *Per* (pour période) ou *Tim* (pour timeless ou intemporel).

Dans notre laboratoire, les études ont porté sur des souris, mais une étonnante variété d'organismes vivants, allant de bactéries aux mouches du vinaigre et à l'homme, présentent des gènes d'horloge. Beaucoup de ces gènes semblent similaires chez de nombreuses espèces, signe qu'ils ont été essentiels à la survie au fil de l'évolution.

L'avancée la plus importante à ce jour est la compréhension du rôle des horloges dans les troubles du métabolisme. Le métabolisme