

## COMPRENDRE

## la détection des ondes gravitationnelles

Catherine Nary MAN

CNRS - Observatoire de Côte d'Azur, ARTEMIS, UMR 7250, Bd. de l'Observatoire, CS 4229, 06304 Nice Cedex 4  
[nary.man@oca.eu](mailto:nary.man@oca.eu)

Détecter les ondes gravitationnelles sur Terre est un défi fou relevé depuis les années 80. Cette infime vibration de l'espace-temps chère à Einstein et prédite par lui il y a plus de cent ans, est enfin mesurée par trois interféromètres géants dont un européen Virgo et deux américains LIGO, tous trois mis au point depuis presque deux décennies et travaillant en étroite collaboration dans tous les domaines de la physique.

Si Einstein avait prédit l'existence des ondes gravitationnelles (OG) dans sa théorie de la Relativité Générale, il avait aussi souligné leur détection quasi-impossible car ces murmures de l'Univers sont de l'ordre de grandeur du millième de la taille d'un atome. Ces OG sont émises lors des accélérations d'objets massifs tels que des trous noirs ou étoiles à neutrons de quelques dizaines à quelques milliers de Masses Solaires et donc impossibles à générer sur Terre. Depuis cent ans la technologie a fait des avancées remarquables dans tous les domaines et principalement en optique grâce à l'avènement du laser dans les années 60. Le laser, qui a ouvert le domaine des mesures de très haute précision, va être le support de ces mesures de vibrations de

l'espace-temps. Vibrations de l'espace-temps, cela semble une notion difficile à représenter pour un métrologue, mais il va les traduire comme une variation de l'indice du vide qu'on pourra appréhender en mesurant la variation de distance parcourue par un faisceau laser dans une expérience d'interférométrie.

L'interférométrie laser a fait ses preuves dans des mesures très fines de variation de distance en exploitant les variations de phase d'un faisceau laser de mesure par rapport à un faisceau laser de référence. C'est ainsi que les interféromètres de Michelson, de Mach-Zehnder ou de Fizeau etc. sont utilisés car ils transforment les perturbations du chemin optique en variations de phase par rapport à celle du faisceau de référence.

## Particularités de l'onde gravitationnelle

La Relativité Générale prédit que, comme les ondes électromagnétiques (EM), les ondes gravitationnelles (OG) se propagent à la vitesse de la lumière (vitesse limite dans l'Univers) mais, contrairement aux ondes EM, l'amplitude prédite pour les OG qu'on nomme  $h$  est proportionnelle, non à une longueur  $L$ , mais à une variation relative de longueur ce qui s'exprime par :

$$h = \frac{dL}{L}$$

$h$  est de l'ordre de quelques  $10^{-21}$  à  $10^{-23}$  suivant la fréquence émise par l'onde gravitationnelle dans la gamme de fréquences audibles (quelques Hz à quelques kHz). Ceci a donné lieu à des tentatives de détection avec des barres résonnantes dites barres de Weber (inventées par Joe Weber dans les années 70) qui espéraient mesurer des dilatations de quelques  $10^{-19}$  à  $10^{-18}$  m sur des barres de l'ordre du mètre. Ces tentatives se sont révélées infructueuses car ces barres présentent un bruit thermique du même ordre de grandeur que l'OG, masquant complètement toute possibilité de détection.

La deuxième propriété extrêmement intéressante des OG pour leur détection est le fait que, dans un plan perpendiculaire à leur propagation, elles contractent une longueur dans une direction pendant qu'elles dilatent la même longueur dans la direction croisée. La figure 1 illustre cet effet.



Vue aérienne de Virgo.

Cette propriété a très vite été exploitée dans l'idée d'utiliser un interféromètre de Michelson dont les 2 bras perpendiculaires réglés à égales longueurs au départ, verraient l'onde gravitationnelle les faire varier en sens opposés, et donneraient une variation de phase en sortie de l'interféromètre de Michelson proportionnelle à 2 fois l'amplitude de l'OG. Le signal mesuré par la photodiode est en fait

$$o(t) = h(t) + n(t)$$

où  $n(t)$  est le bruit dans le détecteur. Ce dernier est caractérisé par sa densité spectrale de puissance  $S(f)$ , la quantité  $S(f)^{1/2}$  (unité:  $\text{Hz}^{-1/2}$ ) représentant le bruit quadratique moyen dans une bande de 1 Hz autour de la fréquence  $f$ . Les antennes terrestres seront sensibles aux OG dont la fréquence est comprise entre ~10 Hz et quelques kHz, le maximum de sensibilité étant  $S(f)^{1/2} \approx 3 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$ , soit autour de 200 Hz. Les facteurs limitant la sensibilité de ces antennes sont (figure 2) :

- le bruit thermique des fils de suspension des miroirs entre ~3 Hz et ~40 Hz,
- le bruit thermique des miroirs eux-mêmes entre ~40 Hz et ~600 Hz,
- le bruit de photons au-delà de ~600 Hz.

## Détection interférométrique sur Terre

Il s'agit donc de mesurer un déplacement de longueur relatif de quelques  $10^{-18}$  m ou une variation de phase de quelques  $10^{-11}$  rd en sortie d'un interféromètre de Michelson. Pour cela il faut minimiser deux types de sources de bruit rencontrées couramment dans toute expérience : les bruits technologiques et les bruits fondamentaux. Par bruits technologiques, on mentionne tous les bruits environnants qu'ils soient acoustiques ou de vibrations.

Le remède est alors de mettre l'interféromètre de Michelson sous vide et de le suspendre à une chaîne de pendules qui assureront l'isolation mécanique par rapport au sol. Les bruits fondamentaux sont plus difficiles à combattre, qui sont les bruits sismiques, le bruit d'agitation thermique proportionnel à  $M^{-1/2}$  et le bruit de photons (ou bruit de grenaille) proportionnel à  $P^{-1/2}$ . On voit que pour le bruit thermique, il faut augmenter la masse  $M$  des miroirs de l'interféromètre de Michelson, et pour le bruit de photons,

### « La Nuit des ondes gravitationnelles »

Le CNRS et la Société Française de Physique ont organisé le 20 mars 2017 « La Nuit des ondes gravitationnelles » (cf. <http://www.cnrs.fr/nuit-des-ondes-gravitationnelles/>). Avec des conférences scientifiques, des visites virtuelles de laboratoires, un quizz et une projection d'extraits de films commentés, cet événement ouvert à tous a célébré, de façon festive et avec une grande adhésion du public (5000 participants au total dont 2700 au Grand Rex à Paris), la découverte des ondes gravitationnelles annoncée en février 2016. Les lycéens, étudiants, enseignants et le grand public ont pu s'informer et échanger avec des scientifiques sur cette découverte majeure. Cette grande soirée festive s'est tenue simultanément dans onze villes en France et deux en Italie. Les commentaires reçus, à la fois dans les différentes salles mais aussi sur les réseaux sociaux, ont été très enthousiastes, notamment sur Internet où la soirée a été suivie en webcast par plusieurs milliers de personnes. Enfin, signalons qu'au cours de cette soirée exceptionnelle ont été annoncés les lauréats des quatre concours mêlant art et science organisés à destination principalement des scolaires.

Guy WORMSER, [wormser@lal.in2p3.fr](mailto:wormser@lal.in2p3.fr)

La photo « Comment détecter des phénomènes cataclysmiques via des signaux délicats ; comment voir au-delà des limites de la physique ? » d'Audrey Hess, premier prix du concours « Photo dans l'oeil du trou noir », catégorie « Tout public ».



**PHOTOMÉTRIE**  
Colorimétrie  
Radiométrie

**SCIENTEC**  
La Solution à vos mesures

**Luxmètre : CL-70F**  
Efficace & performant  
IRC et nombreux types de mesures  
Sources lumineuses et LED



**Analyse de sources lumineuses et LED**

DISTRIBUTEUR OFFICIEL



**Spectroradiomètre CL-500A**  
Précis & performant  
Source LED/EL, Température de couleur, IRC...



**Photomètre Chromamètre Luminancemètre CS-150 ou LS-150**  
Précis & rapide  
Large plage de luminance...



**Photomètre Chromamètre CL-200A**  
Polyvalent & léger  
Eclairage, R&D et Production...



*ScienTec c'est aussi*

Vidéocolorimètres  
Photogoniomètres  
Analyseurs d'écran  
Sources de référence



info@scientec.fr / www.scientec.fr  
01.64.53.27.00

il faut augmenter la puissance optique  $P$  du laser.

Dans la limite des technologies existantes, les projets Franco-Italien Virgo et américain LIGO ont résolu ces problèmes par des miroirs de plus de 20 kg et des puissances laser de l'ordre de 1 kW ultra-stabilisés; en effet les bruits résiduels de ces lasers, à la fois en amplitude et en fréquence, doivent produire des signaux largement inférieurs aux signaux des OG. La figure 3 donne un schéma complet des interféromètres de Virgo ou LIGO et les principaux paramètres utilisés.

### Quelques prouesses technologiques

Virgo et LIGO ont réussi leurs défis grâce à de nombreuses prouesses technologiques dont les principales sont décrites brièvement ci-dessous.

### Masses des miroirs et leur qualité

Pour vaincre le bruit thermique, les miroirs de l'interféromètre de Michelson sont de l'ordre de 40 kg ce qui implique une fabrication et une métrologie de contrôle ultra-sophistiquées, car ils

doivent réfléchir ou transmettre *tous* les photons reçus, que ce soit sur leur couche réfléchissante ou à leur traversée dans le matériau : il s'agit d'une silice spéciale absorbant moins de 1 ppm par cm, qui a été développée pour Virgo; et des couches réfléchissantes absorbant et diffusant 1-2 ppm ont été mises au point dans un laboratoire de la collaboration Virgo (ce même laboratoire fabrique les miroirs de LIGO également).

### Lasers de puissance ultra-stabilisés

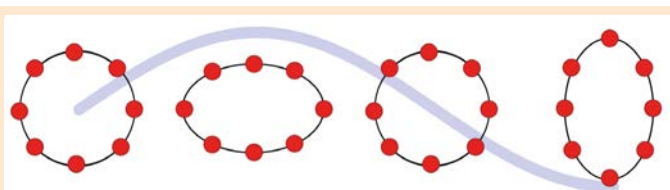
Pour que le bruit de photons soit inférieur aux signaux d'OG, il faut une puissance incidente sur la séparatrice de l'interféromètre de Michelson de 1 kW et plus. Les antennes Virgo et LIGO ont démarré avec des lasers de 20 à 50 W et un facteur de recyclage de 30-50 pour atteindre ces objectifs (voir figure 3). Ces lasers sont stabilisés avec des boucles d'asservissement très bas bruit que l'on cascade en série après avoir filtré spatialement leur faisceau dans plusieurs cavités de résonance communément appelées *mode cleaner*, qui font une centaine de mètres dans Virgo ou qui sont repliées en X dans LIGO pour des questions d'encombrement.

### Isolation sismique

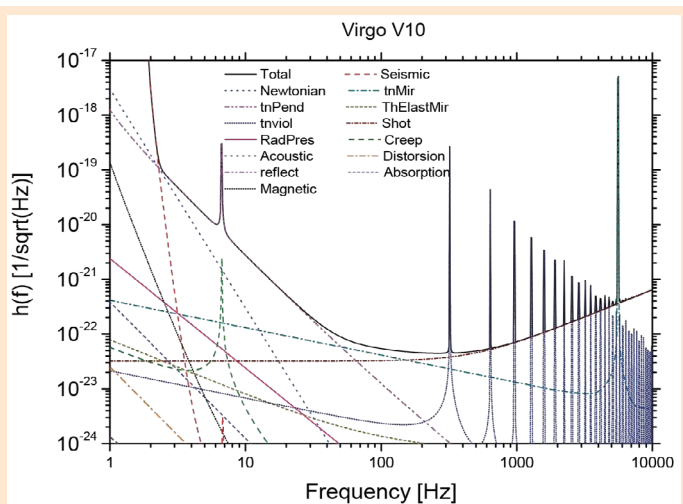
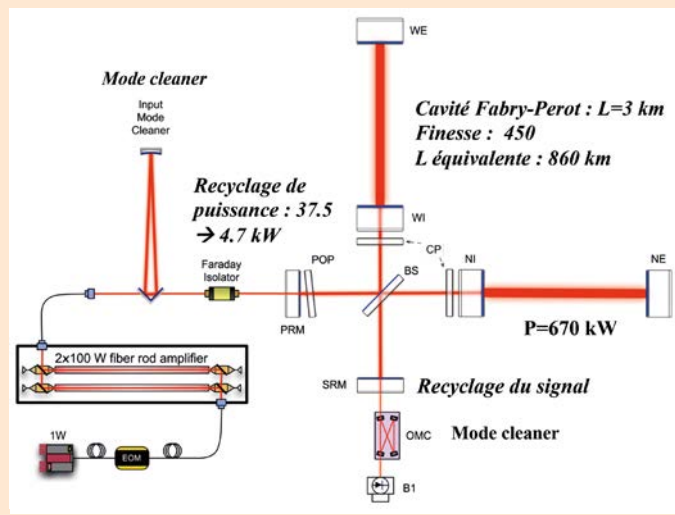
Les OG étant plus nombreuses et mieux connues pour leur émission EM dans la gamme basse fréquence, Virgo a la particularité de proposer, dès le début, une détection démarrante à quelques Hz à l'aide de « super atténuateurs » pour filtrer le bruit sismique à partir de 5-6 Hz. C'est une chaîne de sept pendules en cascade permettant d'atténuer le bruit sismique à  $10^{-14}$  à la fréquence de 10 Hz. La figure 4 donne le schéma de ce super atténuateur.

### Limitations de détection des antennes terrestres

Toute expérience sur Terre subit en basse fréquence ce bruit fondamental qu'est le bruit sismique qui trace dans la courbe de sensibilité des détecteurs un « mur » que Virgo et LIGO arrivent à contourner avec des chaînes d'isolation sismique de 5 à 7 étages de pendules, mais un autre bruit limitant en très basse fréquence est le bruit Newtonien, sorte de bruit de gravité dû aux déplacements des masses telles que celles des nuages ou celles des mouvements de terrain



Δ Figure 1. Effet d'une OG sur un anneau de particules libres et la forme d'OG superposée.



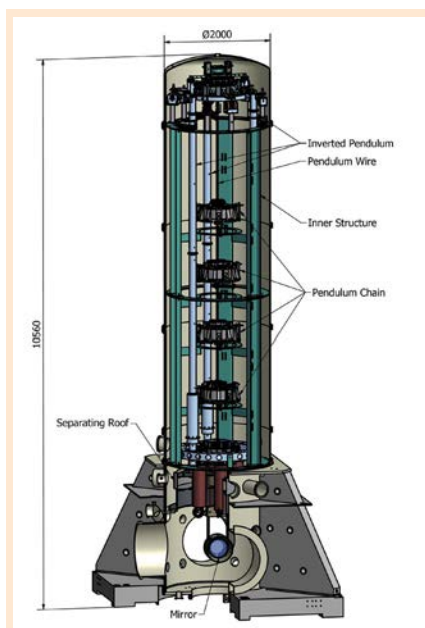
Δ Figure 2. Courbes de sensibilité typique d'une antenne terrestre où sont représentés les divers bruits limitant sa sensibilité.

◁ Figure 3. Schéma typique de Virgo ou LIGO : les bras de l'interféromètre de Michelson sont des cavités résonnantes Fabry-Perot pour augmenter la distance de propagation du photon dans les bras. L'interféromètre, réglé sur la frange noire en transmission, réfléchit la frange blanche vers le laser et cette lumière est renvoyée dans l'interféromètre par un miroir dit de recyclage qui va enfermer l'interféromètre tout entier dans une cavité résonnante : la puissance laser incidente est ainsi multipliée par un facteur de l'ordre de 50.

internes à la Terre. La *figure 2* montre les « murs » limites de ces bruits liés à la Terre et induisent une fréquence de détection limite sur Terre de quelques Hz. C'est ainsi qu'est née depuis plusieurs décennies l'idée d'un projet spatial de détection des OG qui serait complémentaire des détecteurs terrestres car la bande de détection pourrait descendre au milli-Hertz : ce projet spatial LISA vient d'être inscrit par l'ESA comme Large Mission pour voler dans les années 2034.

### Conclusion

Cent ans après les prédictions d'Einstein, les OG ont été détectées en septembre 2015 par les 2 antennes LIGO d'abord, puis en août 2017 par Virgo travaillant en coïncidence avec LIGO. Les résultats ont été spectaculaires non seulement par la réussite de fonctionnement de ces antennes mais aussi par les résultats astrophysiques découverts : les OG ont été émises par des coalescences de trous noirs dans la gamme de 30-40 Masses Solaires, dont les astrophysiciens avaient prédit la rareté car ils s'attendaient à une découverte de coalescence d'étoiles à neutrons dans un premier temps. Cette première découverte des OG par les antennes LIGO vaudra le prix Nobel à leurs dirigeants ; la coalescence d'étoiles à neutrons a été finalement détectée avec le fonctionnement de Virgo en août 2017, ce qui a permis de trianguler la position des étoiles à neutrons dans le ciel et permis à plus



**Figure 4.** Super-atténuateur de Virgo comportant 7 pendules en série, donnant ainsi une isolation sismique du miroir, suspendu en bas de la chaîne, un facteur de filtrage de  $10^{-14}$  à 10 Hz.

de 60 observatoires EM d'observer les contreparties optiques, radio et en émission gamma et d'identifier ces étoiles à neutrons. Les exploitations astrophysiques de ces résultats vont se poursuivre dans les mois qui viennent et l'observation de l'Univers s'est ouverte sur une nouvelle fenêtre. Le souhait des chercheurs qui ont proposé ces projets Virgo et LIGO s'est réalisé : les antennes de détection d'OG sont maintenant des observatoires astrophysiques d'objets violents de l'Univers, et elles ont acquis leurs lettres de noblesse dans la communauté astrophysique.

**PLUS DE SPECTRES SUR UN TEMPS PLUS COURT**

Le Spectromètre **OCEAN FX** bénéficie d'acquisitions rapides, d'interfaces de communication fiables et d'une mémoire tampon

**ACQUISITIONS RAPIDES**

**INTERFACES FIABLES**

**MÉMOIRE TAMPON**

**Ocean Optics**  
www.oceanoptics.com

Pour plus d'information sur nos offres, contactez notre distributeur français  
T: 02 96 05 40 20  
info@idil.fr | www.idil.fr

**IDIL**  
FIBRES OPTIQUES

**AGENDA Photoniques**

- Formations,
- Salons et conférences,
- Appels à contributions

Retrouvez notre agenda en ligne sur :  
**www.photoniques.com**