

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

-

SESSION 2022

-

**SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES EN LABORATOIRE**

(Classes de terminale série STL)

**ÉPREUVE D'AMMISSION  
ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES**

Temps de préparation : 2 heures

Temps de présentation devant les examinateurs : 10 minutes

Échange avec les examinateurs : 15 minutes

-

**LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES**

# La détection des ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles et les trous noirs sont des distorsions de l'espace-temps. L'existence des ondes gravitationnelles a été prédite par Albert Einstein en 1916. Et presque cent ans après, ces ondes ont été détectées directement sur Terre, pour la première fois, le 14 septembre 2015 par les deux détecteurs LIGO-Hanford et LIGO-Livingston (États-Unis) alors que le troisième détecteur Virgo (Italie) était en maintenance. En 2017, le Prix Nobel de Physique a récompensé les astrophysiciens, Rainer Weiss, Kip S. Thorne et Barry C. Barish, à l'origine de cette formidable découverte des ondes gravitationnelles d'Einstein.

## **Problématique :**

Le 14 août 2017, un nouvel événement scientifique majeur intervient : la première observation par les trois détecteurs existants du passage d'une onde gravitationnelle (signal GW170814).

Vous êtes responsable de la communication scientifique de la collaboration Virgo et LIGO. Vous devez réaliser une présentation de cet événement à un groupe d'élèves de Terminale SPCL.

Pour répondre de manière argumentée à cette problématique, il est demandé de mobiliser vos connaissances et d'extraire des informations de la documentation fournie, et au besoin de celle disponible sur Internet, afin de réaliser un exposé autour des thèmes suivants :

- 1) Présenter les ondes gravitationnelles
- 2) Présenter le fonctionnement des détecteurs Virgo et LIGO en s'appuyant sur le principe de l'interféromètre de Michelson.
- 3) Estimer la distance de la source du signal GW170814 à partir de la théorie de la Relativité Générale (document 4) et de la mesure de l'amplitude, de la fréquence et la durée des signaux (document 8).
- 4) Utiliser le document 6 pour estimer le décalage maximal (exprimé en milliseconde) entre la détection d'une même onde par LIGO-Livingston et LIGO-Hanford.
- 5) Montrer que le décalage de temps mesurable sur le document 8 entre la détection à Livingston et à Hanford, permet de déterminer numériquement la direction de propagation dans l'espace de l'onde GW170814 par rapport à l'axe entre les deux villes.  
Conclure sur l'intérêt de la détection conjointe par Virgo.

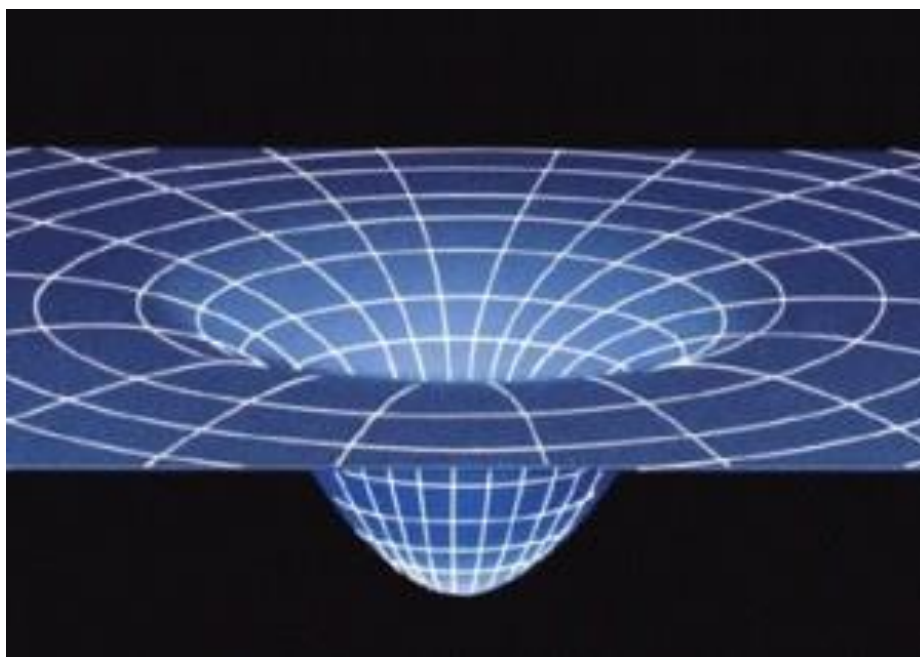
**Document 1 : "Les ondes gravitationnelles", vidéo (pas de son), durée 2 minutes.**

<https://www.youtube.com/watch?v=Wxm2nUIL38c>

Source: <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-onde-gravitationnelle-4003/>

**Document 2 : "Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?"**

A deux dimensions, on peut imaginer l'espace-temps comme une toile en caoutchouc. Quand on met un objet dessus, la toile est déformée, et tout ce qui se déplace sur la toile suit cette courbure.

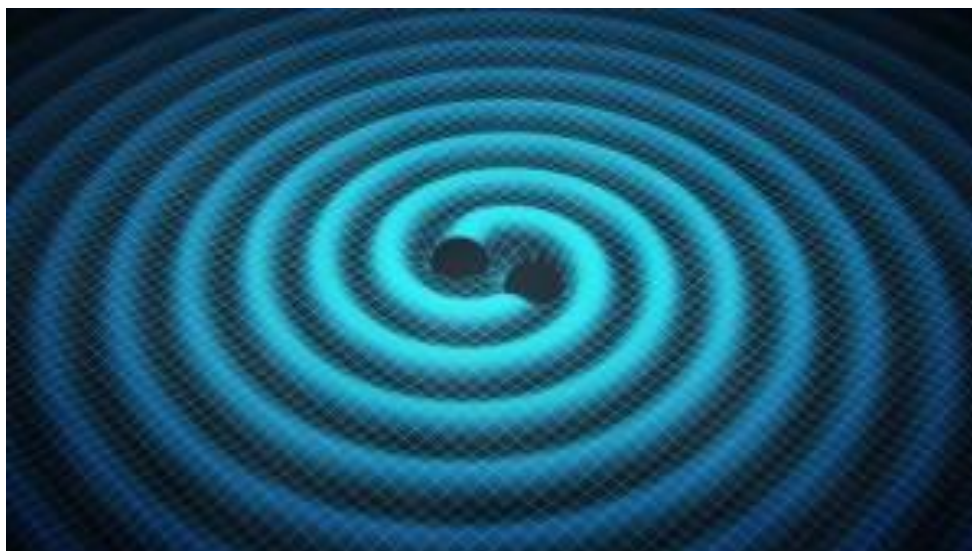


*Vue d'artiste de l'espace-temps courbé par un corps massif.*

La même chose arrive avec l'espace-temps : une masse test passant près d'un corps massif va suivre la courbure de l'espace-temps autour de cet objet. Nous observons cet effet comme une force « attractive » que l'on appelle la gravité. **La lumière voyage en ligne droite dans un espace-temps plat, mais elle suit la courbure de l'espace-temps** autour d'un objet massif. Par conséquent, il semble que la lumière est, elle aussi, attirée vers le corps massif.

Les ondes gravitationnelles apparaissent quand un événement perturbe la courbure de l'espace-temps. On peut imaginer une goutte tombant dans un puits. Elle perturbe la surface de l'eau, et cette perturbation se propage dans l'eau à partir du point où elle a été générée : c'est une onde mécanique. De façon similaire, quand l'espace-temps est perturbé, des ondes gravitationnelles sont générées et elles se propagent à partir de là, à la vitesse de la lumière.

Quels événements peuvent générer de telles perturbations dans le tissu de l'espace-temps ? En principe, toute masse en mouvement pourrait générer une onde gravitationnelle. On peut l'imaginer comme un « tremblement d'espace-temps ». Ceci arrive par exemple quand deux trous noirs, ou deux étoiles à neutrons, orbitent rapidement l'un autour de l'autre.



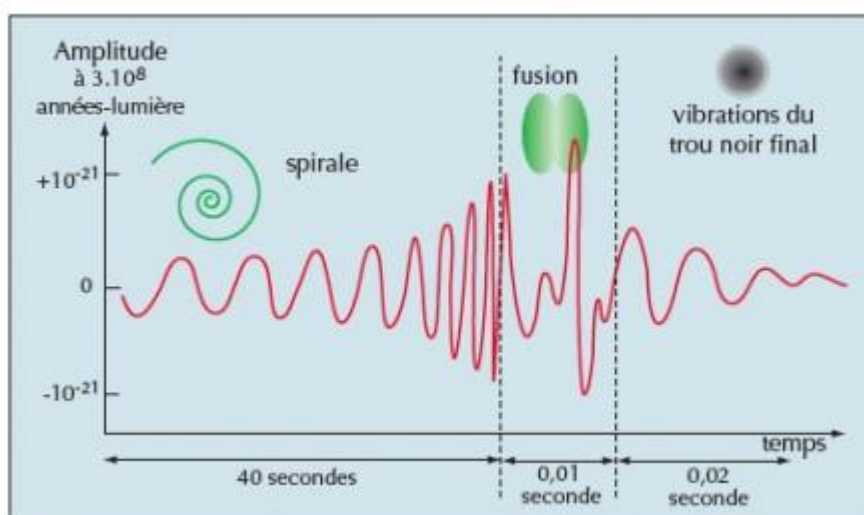
*Vue d'artiste d'une onde gravitationnelle. Dans cet exemple, l'espace-temps est perturbé par le mouvement de deux trous noirs en rotation l'un autour de l'autre (crédits : Swinburne Astronomy Productions).*

Source : <http://public.virgo-gw.eu/quest-ce-quune-onde-gravitationnelle/>

### Document 3 : "La fusion de deux trous noirs".

À mesure qu'ils se rapprochent, la vitesse orbitale des trous noirs augmente, le taux d'émission gravitationnelle croît, et le processus s'emballe jusqu'à la fusion des deux trous noirs en un trou noir plus gros.

L'amplitude des ondes gravitationnelles émises par la coalescence de deux trous noirs est d'environ  $10^{-21}$  à une distance de 300 millions d'années-lumière.



La coalescence de deux trous noirs de 10 masses solaires chacun engendre des ondes gravitationnelles caractéristiques des phases du mouvement. D'abord, les trous noirs s'approchent l'un de l'autre en spirale, puis fusionnent. Le trou noir final évacue ses irrégularités sous forme de modes quasi normaux.

Source : <https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2016/02/10/la-lumiere-gravitationnelle-1/>

#### Document 4 : Amplitude $h$ du signal d'après la théorie de la Relativité Générale

L'amplitude des ondes gravitationnelles  $h$  est une amplitude relative à la distance  $d$  de la source, donc sans unité. Pour un signal observé sur Terre, donc dans le système solaire, elle est donnée par la relation :

$$h \sim 2 \cdot 10^{-11} \left( \frac{M}{M_{Sol}} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{d} \right) \left( \frac{1}{f} \right) \left( \frac{1}{\sigma} \right)^{1/2}$$

avec :

- $M$  et  $M_{Sol}$ , les masses respectives de la source et celle du soleil ;
- $d$ , la distance de la source (en année-lumière)
- $f$ , la fréquence des ondes (en hertz)
- $\sigma$ , la durée de l'évènement (en secondes)

#### Document 5 : "Que sont les interféromètres LIGO et Virgo ?"

Virgo est un interféromètre gravitationnel conçu pour détecter des signaux gravitationnels extrêmement faibles. En fait, le passage d'une onde gravitationnelle induit une déformation d'un milliardième de milliardième de mètre dans les bras de 3 km de Virgo. Qu'est-ce que cela représente ? Moins d'un millième de la taille d'un proton !

Virgo est conçu comme un interféromètre laser kilométrique, c'est-à-dire un instrument qui utilise les interférences de deux faisceaux de lumière issus d'un laser pour mesurer de minuscules déplacements et déformations. Le schéma optique est basé sur l'interféromètre construit par les physiciens américains Albert A. Michelson et Edward W. Morley à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle pour détecter le mouvement de la Terre dans l'éther.

Comme un grand « cousin » de l'interféromètre de Michelson-Morley, Virgo est constitué de deux bras perpendiculaires de 3 km de long. Un bras est orienté sud-nord et l'autre est-ouest.

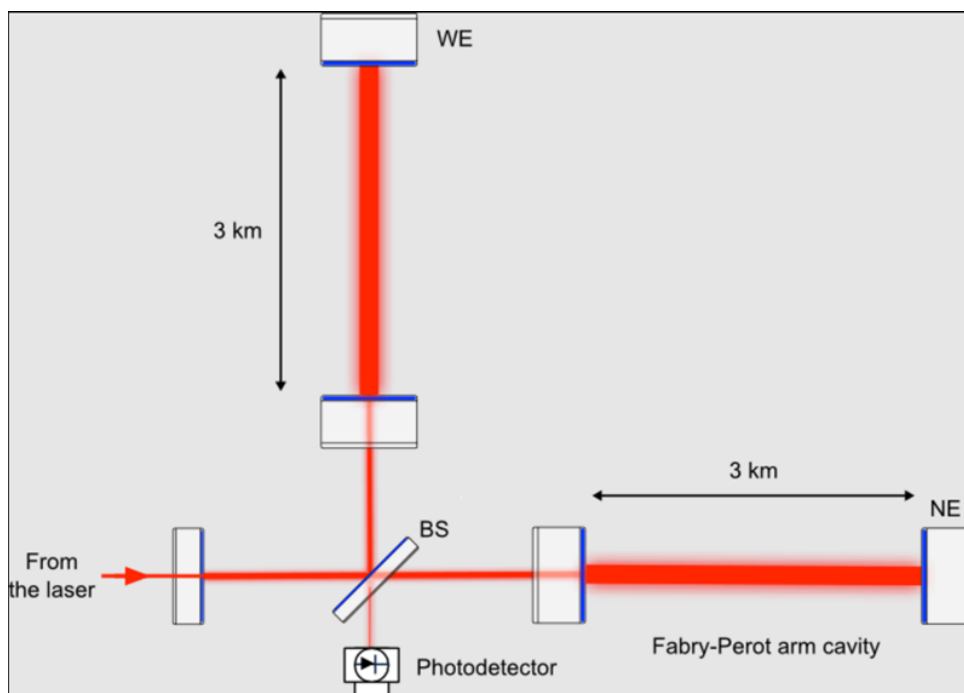


Schéma optique simplifié de l'interféromètre Virgo (crédits : Collaboration Virgo).

À l'entrée du détecteur Virgo, un faisceau laser arrive sur un miroir semi-réfléchissant, appelé séparatrice (BS) et tourné de  $45^\circ$ , qui le sépare en deux faisceaux envoyés dans deux tubes à vides de 3 km dans les bras de l'interféromètre.



*Le tube à vide nord de Virgo, d'un diamètre de 1,2 m (crédits : Collaboration Virgo).*

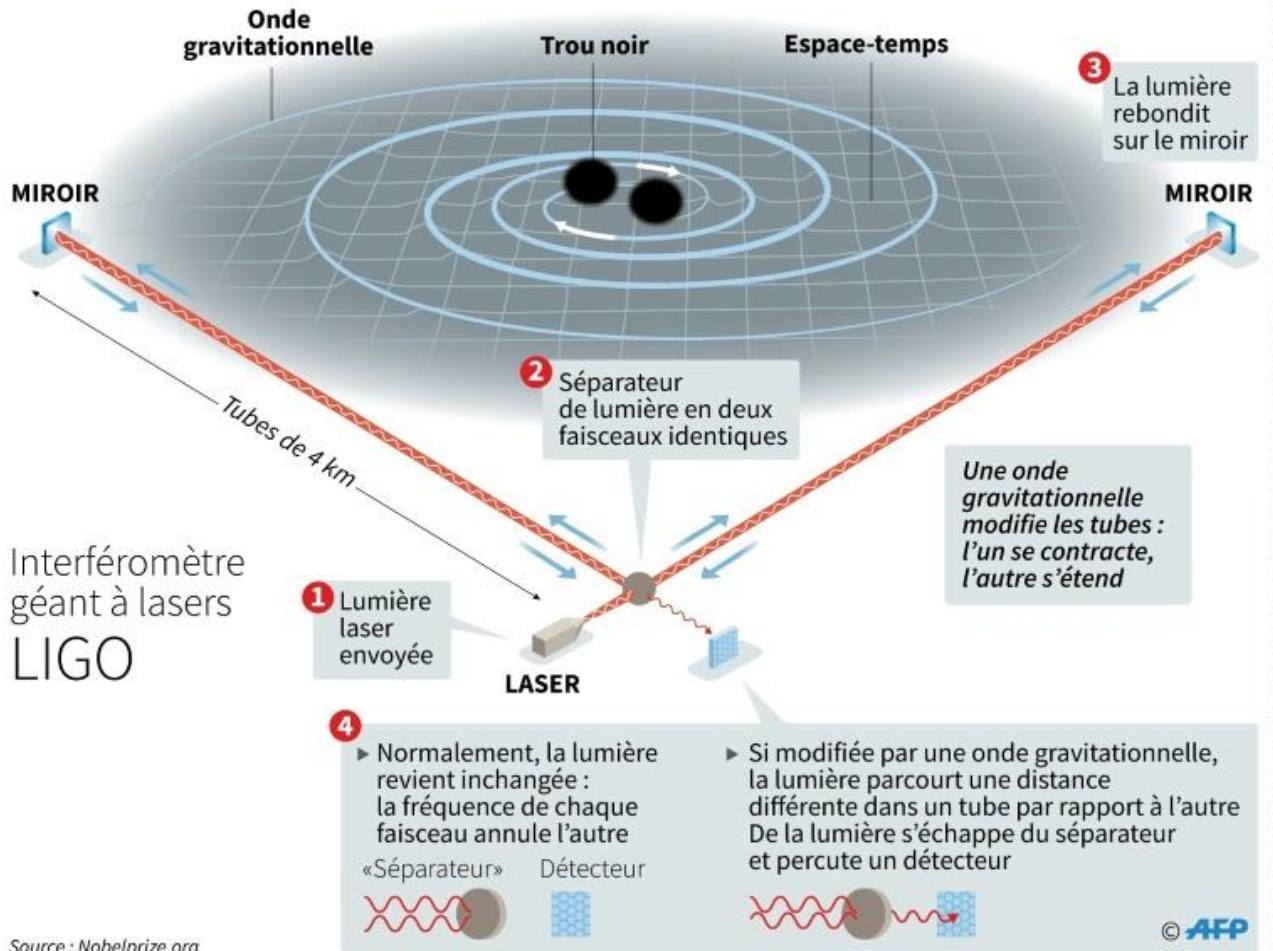
Le faisceau laser est réfléchi sur des miroirs, placés à chaque extrémité des tubes ouest (WE) et nord (NE). Ces deux miroirs de 40 kg sont parfaitement polis et réfléchissent 99,999 % de la lumière incidente. Les deux faisceaux réfléchis se recombinent sur le miroir semi-réfléchissant (BS), produisant une figure d'interférences. Celle-ci est observée par un photodétecteur, un élément qui convertit la lumière incidente en courant électrique, qui est ensuite amplifié, converti en tension, enregistré numériquement et enfin analysé.

Quand une onde gravitationnelle passe à travers le détecteur, l'espace-temps et par conséquent les distances des deux bras kilométriques sont étirées et compressées alternativement. Les franges d'interférences se mettent à « clignoter » très légèrement à la fréquence de l'onde gravitationnelle.

Source : <http://public.virgo-gw.eu/quest-ce-que-virgo/>

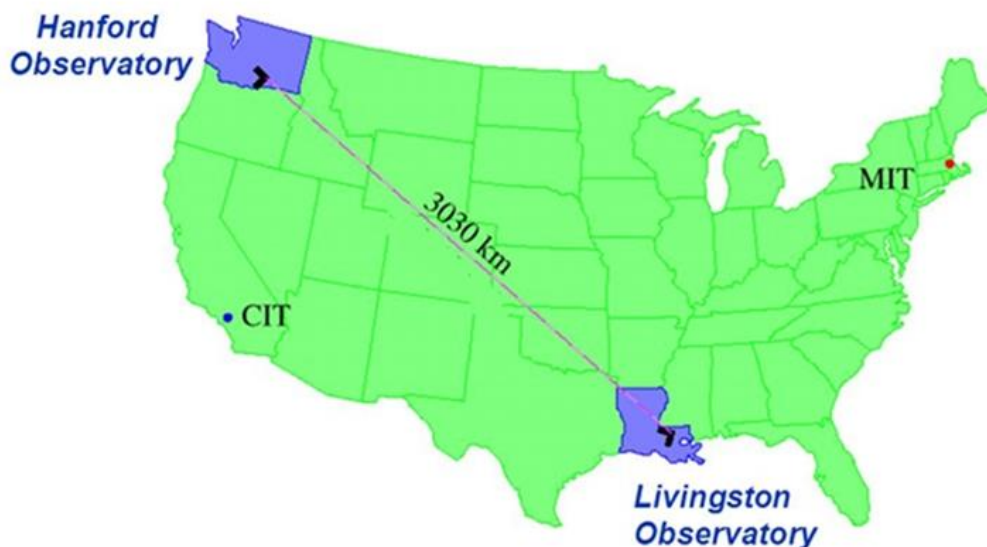
# Le détecteur d'ondes gravitationnelles

Pour sa conception et ses résultats, les astrophysiciens Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne récompensés



Source : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/popular-information/>

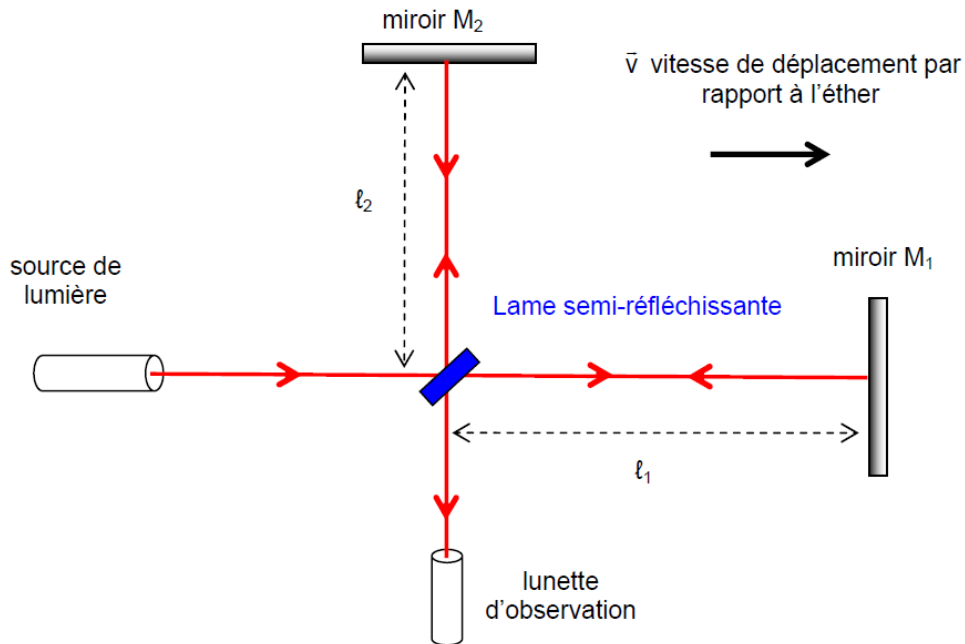
## Document 6 : "Positions de LIGO-Livingston et LIGO-Hanford"



Source : Sites LIGO - <https://slideplayer.com/slide/5184315/>

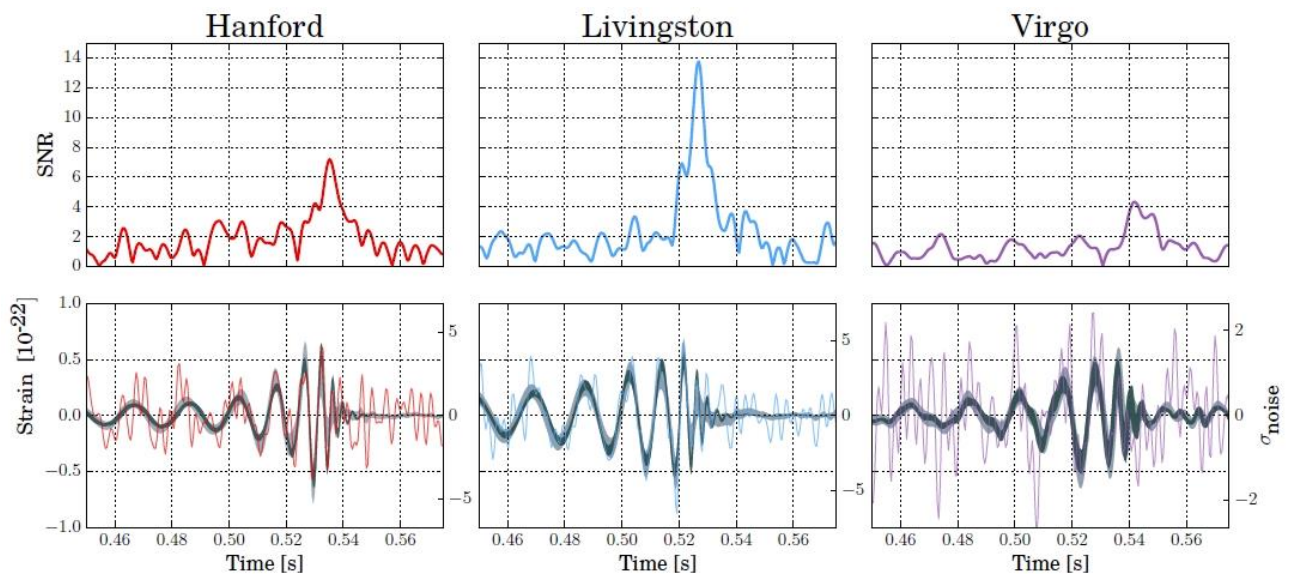
## Document 7 : "L'interféromètre de Michelson"

La lumière émise par une source est partiellement transmise ou réfléchiée par la lame semi-réfléchissante et peut emprunter ainsi deux chemins différents. Les deux ondes peuvent alors interférer au niveau de la lunette où l'on observe des franges d'interférence.



Source : Ministère de l'éducation nationale (DGESCO – IGEN)

## Document 8 : "Le signal GW170814".



- Le signal référencé « GW170814 » a d'abord été détecté à LIGO-Livingston puis à LIGO-Hanford.
- L'amplitude  $h$  du signal ("Strain"), est une variation relative de longueur, c'est un nombre sans dimension.
- Le rapport signal / bruit (SNR) permet de mettre en évidence la détection des ondes gravitationnelles.

L'analyse d'autres données montrent que **l'évènement concerne des masses d'environ 30 masses solaires.**

Source : <https://www.ligo.org/science/Publication-GW170814/translations/science-summary-french.pdf>