

L'expérience Virgo

- Les ondes gravitationnelles
- Les sources
- Le principe
- Le détecteur
- Le système GPS
- Le futur

Notions utilisées :

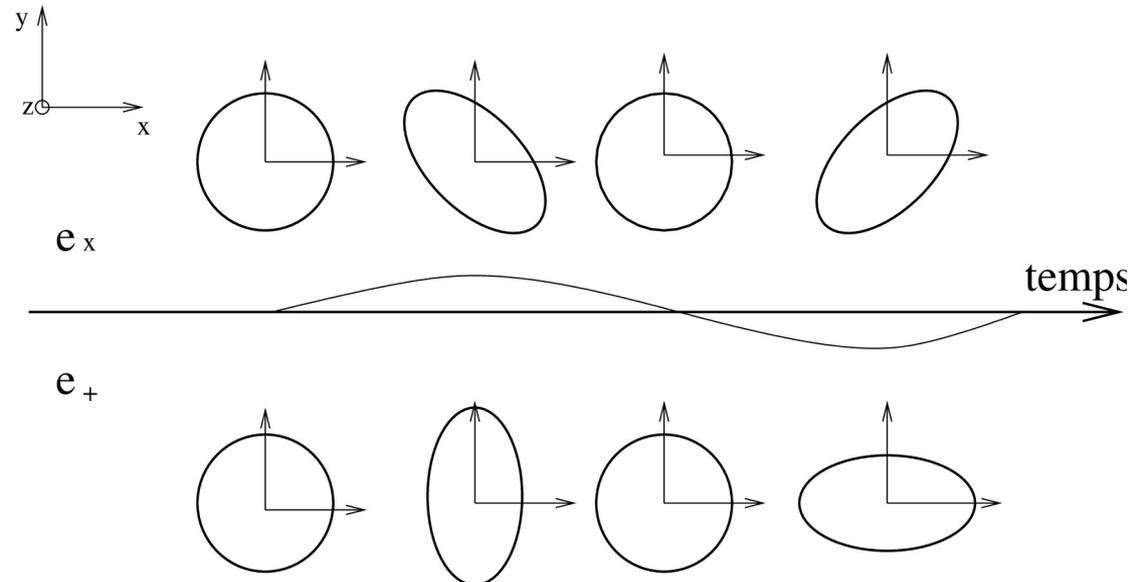
1. Introduction
4. Les ondes
7. La mécanique classique
8. La relativité restreinte
9. La relativité générale



Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées
Images : Wikipedia sauf mention contraire

Les ondes gravitationnelles

- Prédites en 1916 par la **relativité générale**
- Ondes de **déformation de l'espace-temps**
 - Pas **électromagnétiques** ni **mécaniques**
 - Émises lorsque le mouvement d'un objet n'a **pas une symétrie sphérique**
 - L'émission d'OG entraîne une **perte d'énergie** du système
- Le passage d'une OG entraîne une **variation relative des longueurs et du temps**



Les sources

1. Les **systèmes binaires**

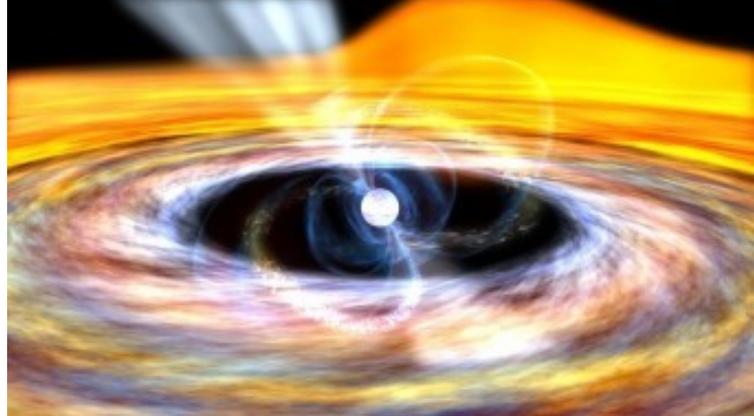
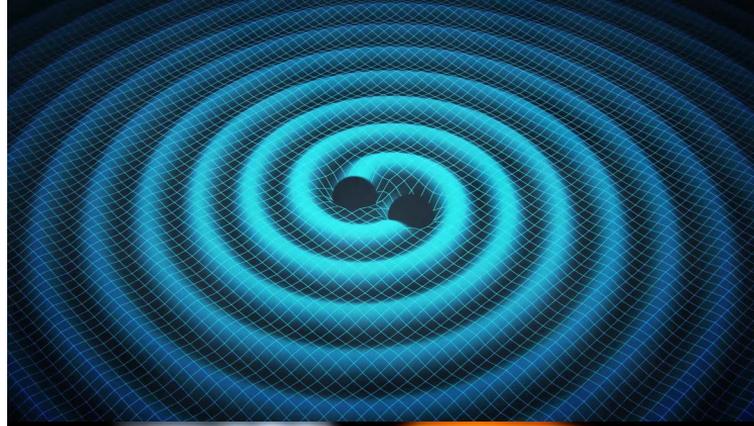
- Deux corps en rotation l'un autour de l'autre (étoiles à neutrons, trous noirs, ...)
- Perte d'énergie → accélération de la rotation (fin = « **coalescence** »)

2. Les **pulsars**

- Étoiles à neutrons tournant (très) rapidement sur elles-mêmes
- Signal stable et **continu** mais **très faible**

3. Les **supernovae**

- Explosions (dissymétriques) d'étoiles
- Signal très bref et difficile à prédire



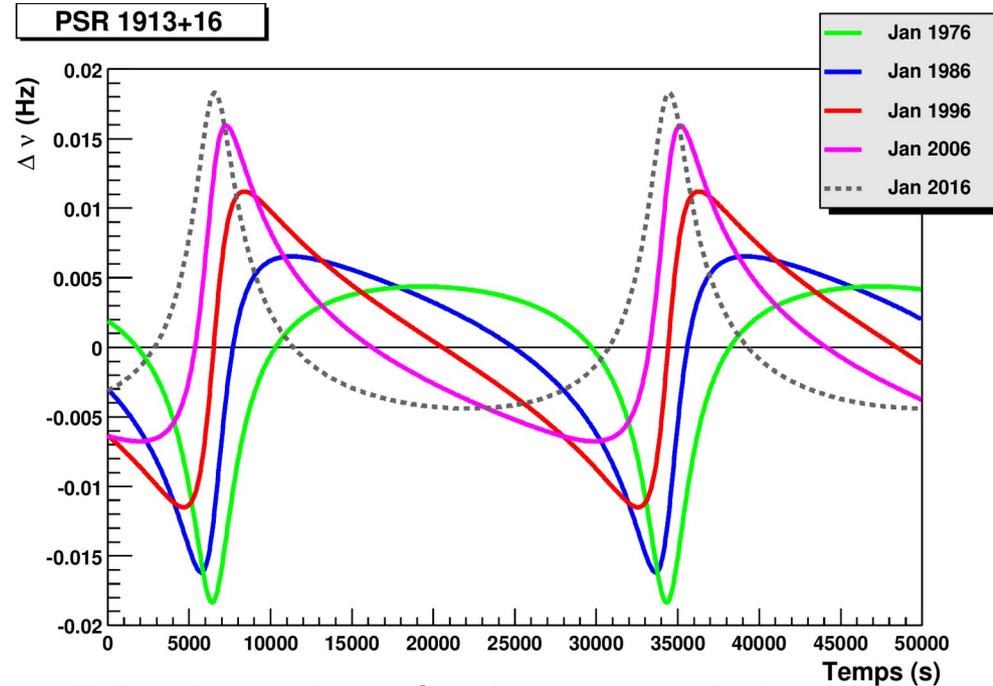
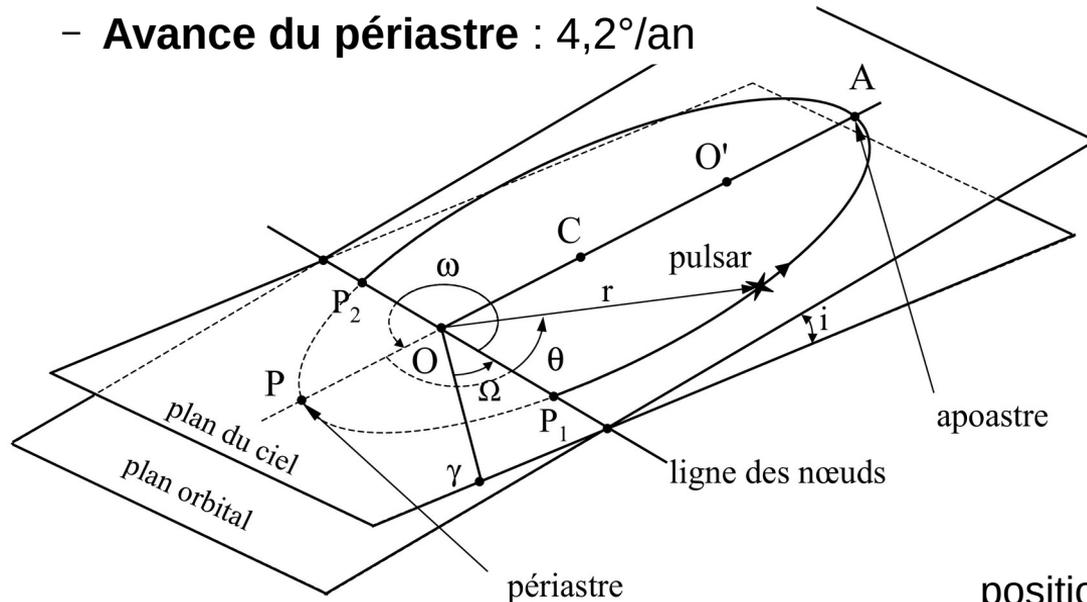
Orbite d'un pulsar en système binaire

- Trajectoire **elliptique** (1^{ère} loi de Kepler) à **5 paramètres**

- i (inclinaison), ω (argument du périastre)
 Ω (angle / point vernal) = angles d'Euler
- e (excentricité), τ (temps de passage au périastre)

- **Effets relativistes :**

- **Ralentissement de la période** (émission d'OG)
- **Avance du périastre** : $4,2^\circ/\text{an}$

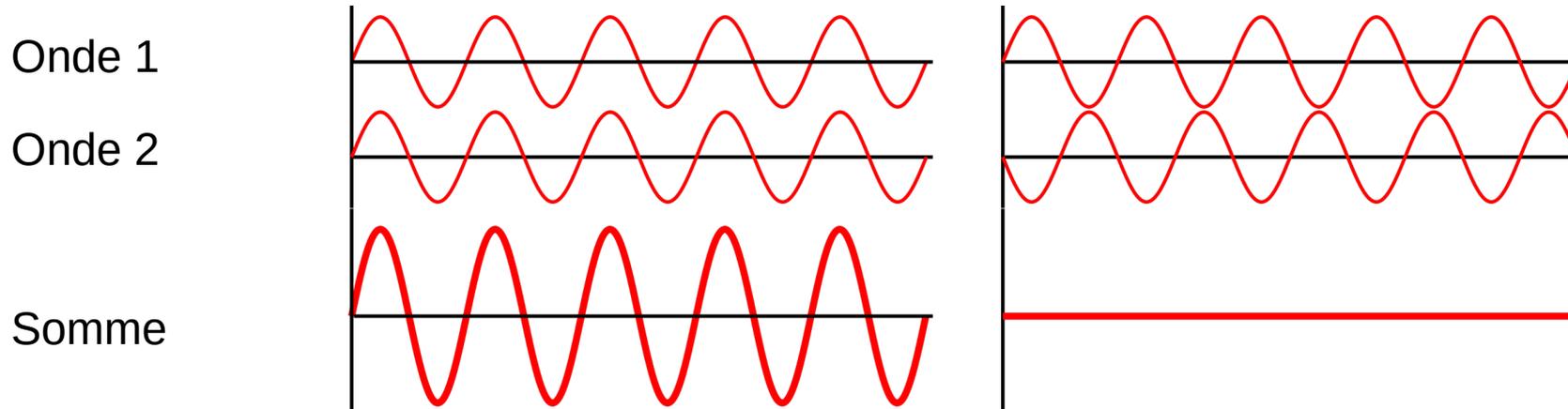


Effet Doppler résultant ($\sim 1 \text{ ‰}$)

+ effet Doppler dû au **mouvement de la Terre**
 (par rapport au barycentre du Système solaire :
 position connue à qq mètres près, vitesse à qq mm.s^{-1} près)

Interférences lumineuses

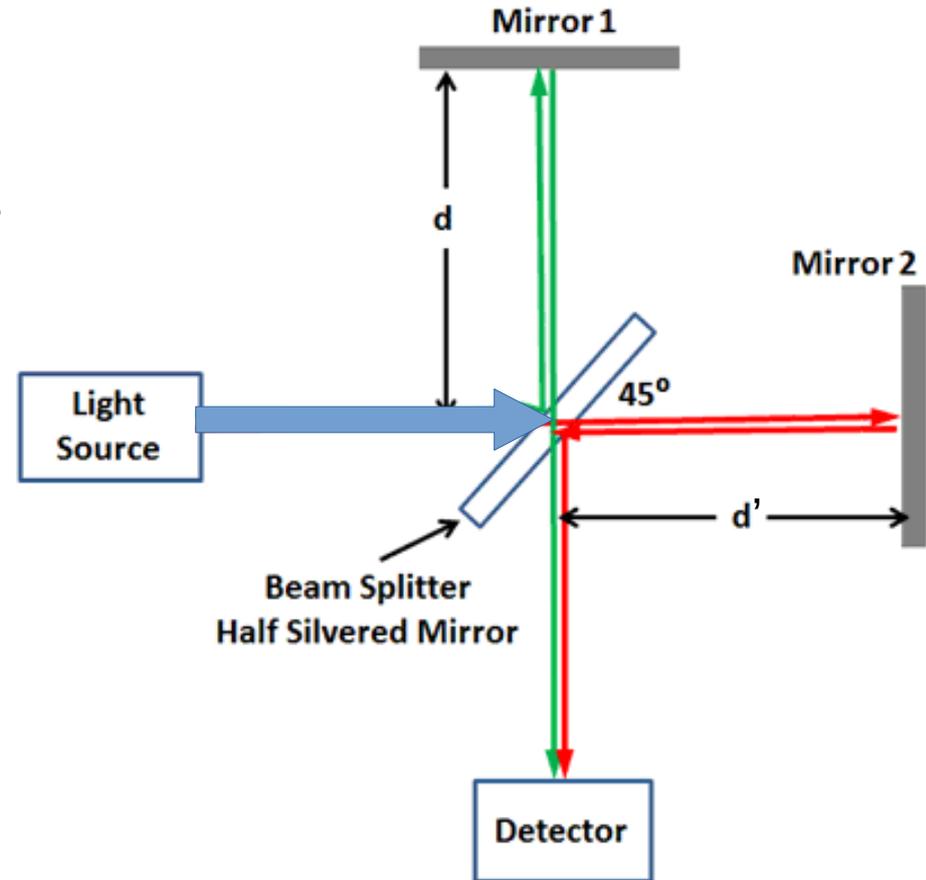
- Deux **intensités lumineuses** peuvent s'additionner
- En raison de la **nature ondulatoire** de la lumière, deux signaux lumineux cohérents en « **opposition de phase** » peuvent s' « **annuler** »



- Cela fonctionne également avec
 - des **ondes sonores** (casque à réduction de bruit)
 - des **électrons** (dualité onde-corpuscule), fentes d'Young

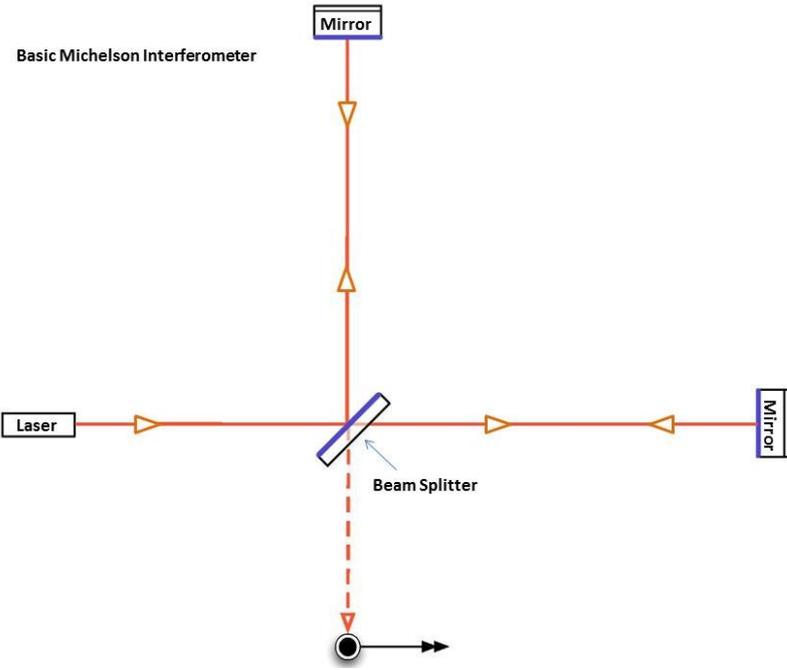
L'interféromètre de Michelson

- On sépare un faisceau laser en 2 faisceaux perpendiculaires **cohérents**
- Une **différence de longueur** entre les trajets va faire **varier la figure d'interférences**
 - Si $d = d' + n\lambda$, les faisceaux sont en **phase**
→ **interférences constructives**
(intensité lumineuse maximale)
 - Si $d = d' + n\lambda + \lambda/2$, les faisceaux sont en **opposition de phase**
→ **interférences destructives**
(pas de lumière détectée)
 - Cas quelconque : luminosité intermédiaire



L'expérience de Michelson-Morley

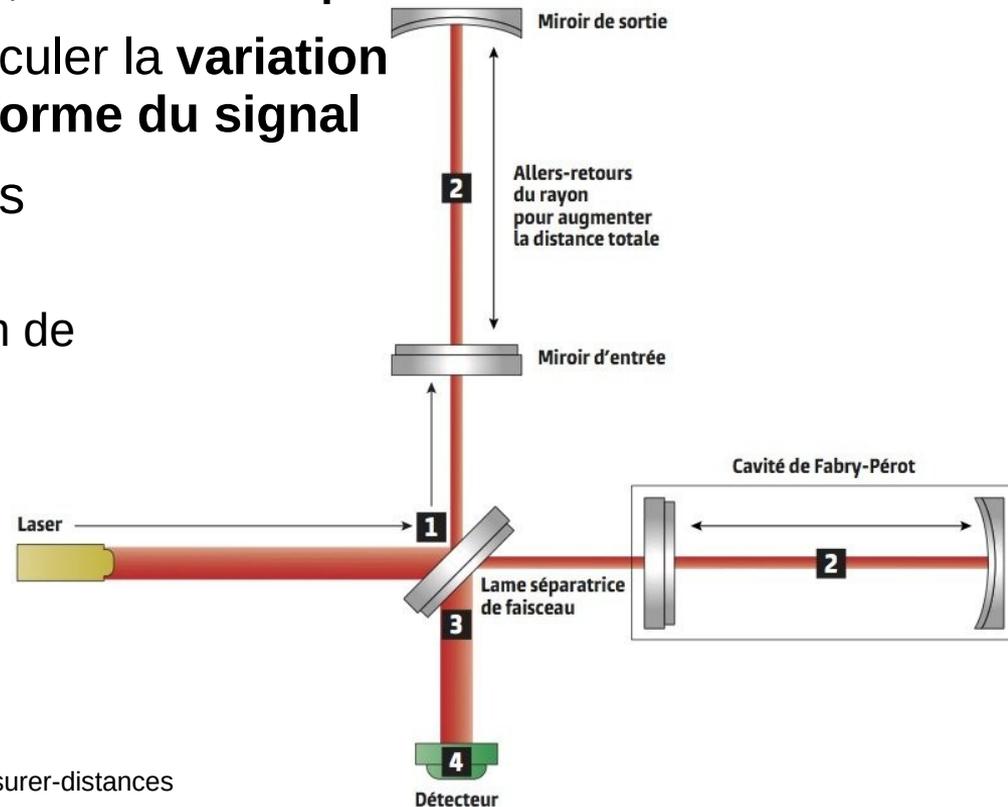
- Après l'établissement des **équations de Maxwell**, nombreuses tentatives pour formuler une **théorie d'un « éther »** qui transporterait ces ondes (éther = « substance subtile distincte de la matière et permettant de [...] transmettre des effets entre les corps » (Scott Walter))
- Expérience optique visant à démontrer l'existence de l'éther (1881-1887) :
 - si Terre immobile par rapport à l'éther, les trajets dans les deux directions se font à la même vitesse
 - Si Terre en mouvement par rapport à l'éther, trajets faits à des vitesses différentes dans les deux directions



- **Résultat : pas de différence de vitesse de la lumière entre les directions**
 - → **mise en doute l'existence de l'éther**
 - → **la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions (à la précision de l'expérience près)**
 - **Prix Nobel** pour Michelson en 1907

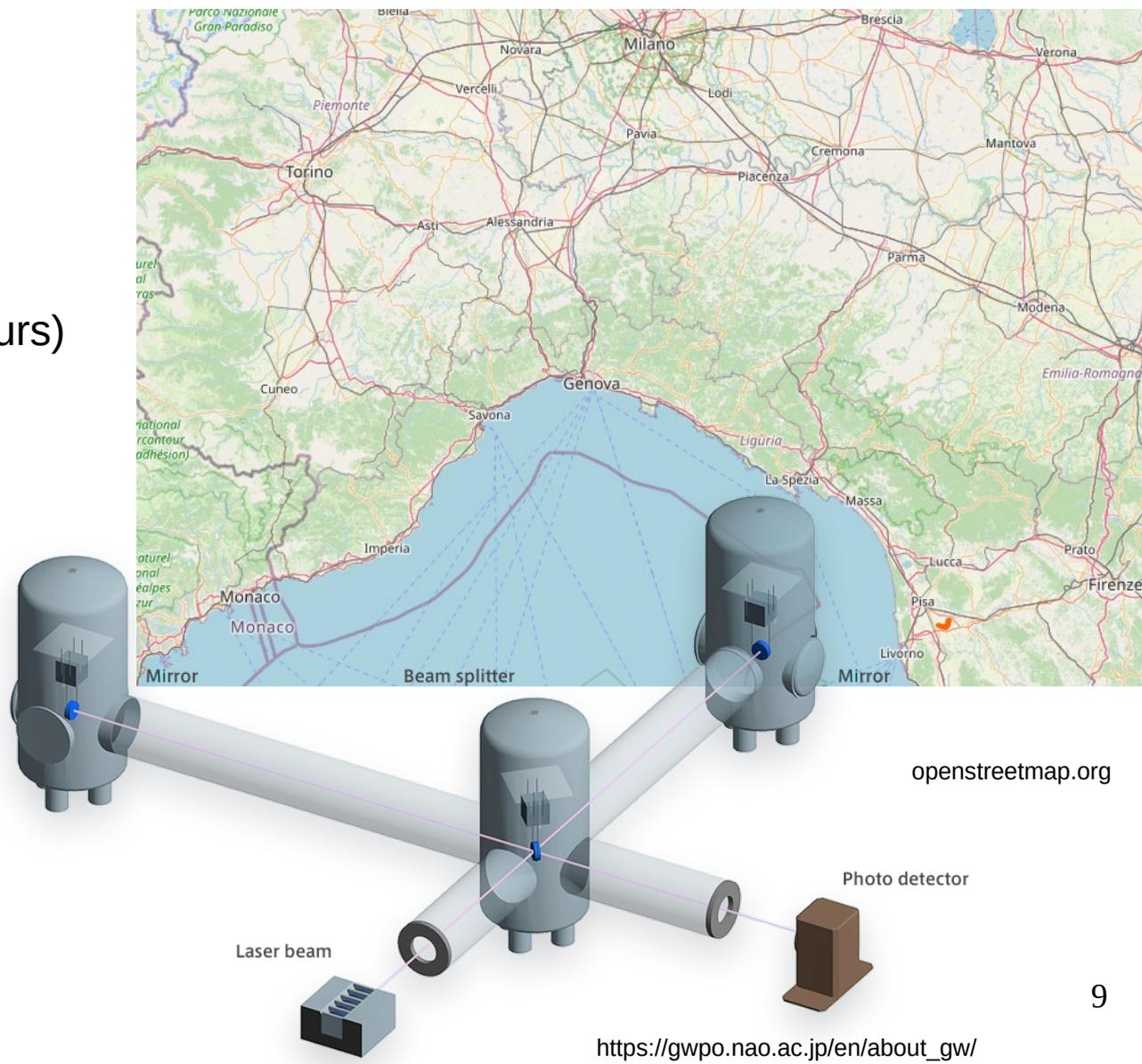
Principe de détection des OG

- On « **verrouille** » le détecteur en interférence destructrice : **pas de lumière détectée**
- Le passage d'une onde gravitationnelle va faire **varier un trajet par rapport à l'autre**
 - L'interférence n'est **plus totalement destructrice**, on détecte **un peu de lumière**
- L'étude de l'intensité lumineuse permet de calculer la **variation relative des longueurs des bras** et donc la **forme du signal**
- Défi : les variations de longueur relative dues aux ondes gravitationnelles sont **infimes**
 - **Ordre de grandeur : 10^{-20}** , soit une déformation de $\pm 10^{-9}$ m de la distance Terre-Soleil (150 Mkm)
 - Il faut un trajet très long : bras de 3 km de long, **plusieurs allers-retours (150 km)** $\rightarrow \sim 10^{-15}$ m
 - Il faut donc **isoler le système** des influences extérieures (= minimiser le « **bruit** »)



L'expérience

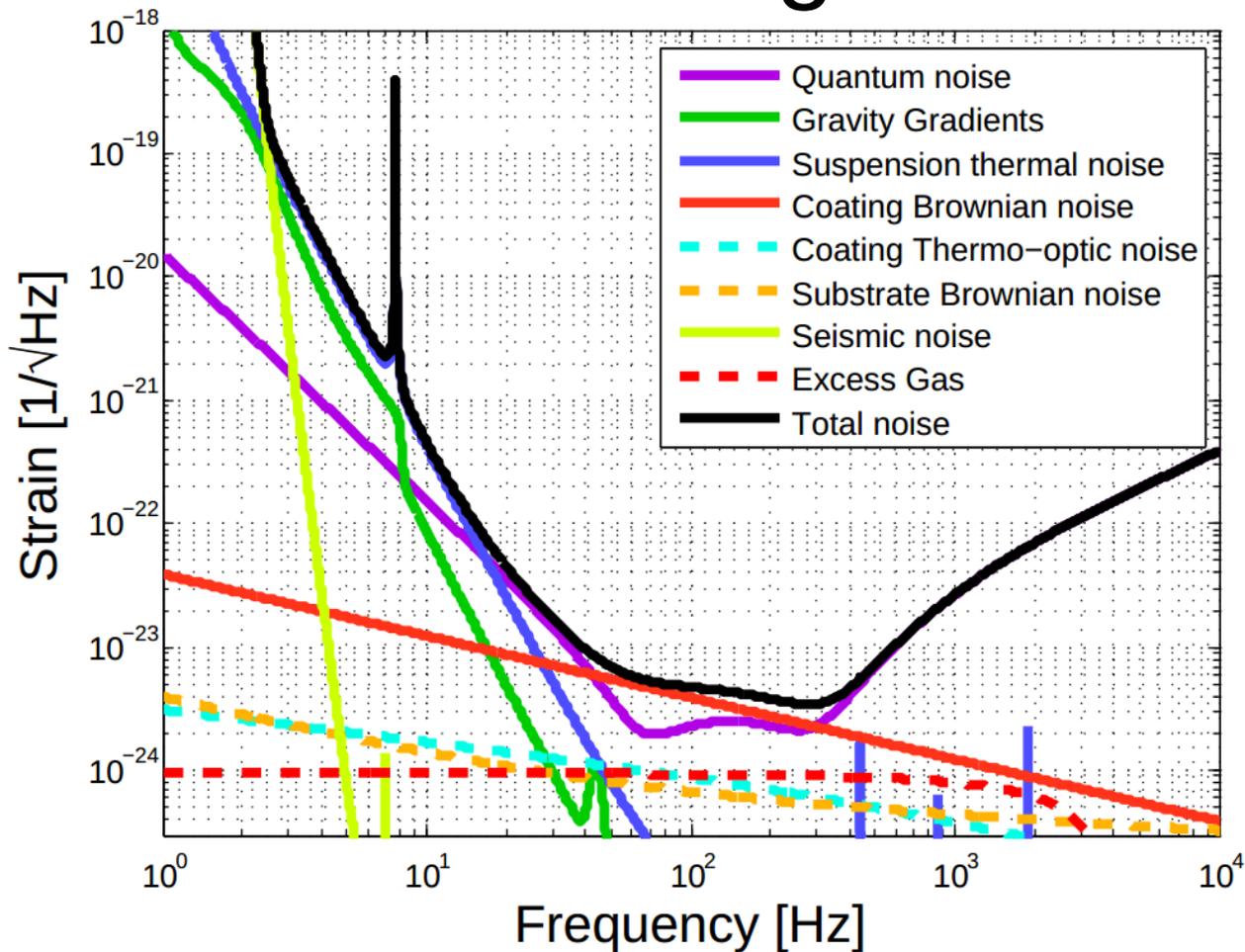
- Expérience franco-italienne
 - Début des pré-études : 1979
 - Proposition en 1989 (~50 chercheurs)
 - Approbation en 1994
 - Construction débutée en 1996, achevée en 2003
 - Première observation : 2017
 - LIGO (« Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory ») : 2015
- Aujourd'hui 16 pays, 130 laboratoires, 700 membres
- Construite à proximité de Pise
 - Seulement 2 lieux convenaient



Sensibilité d' « Advanced Virgo »

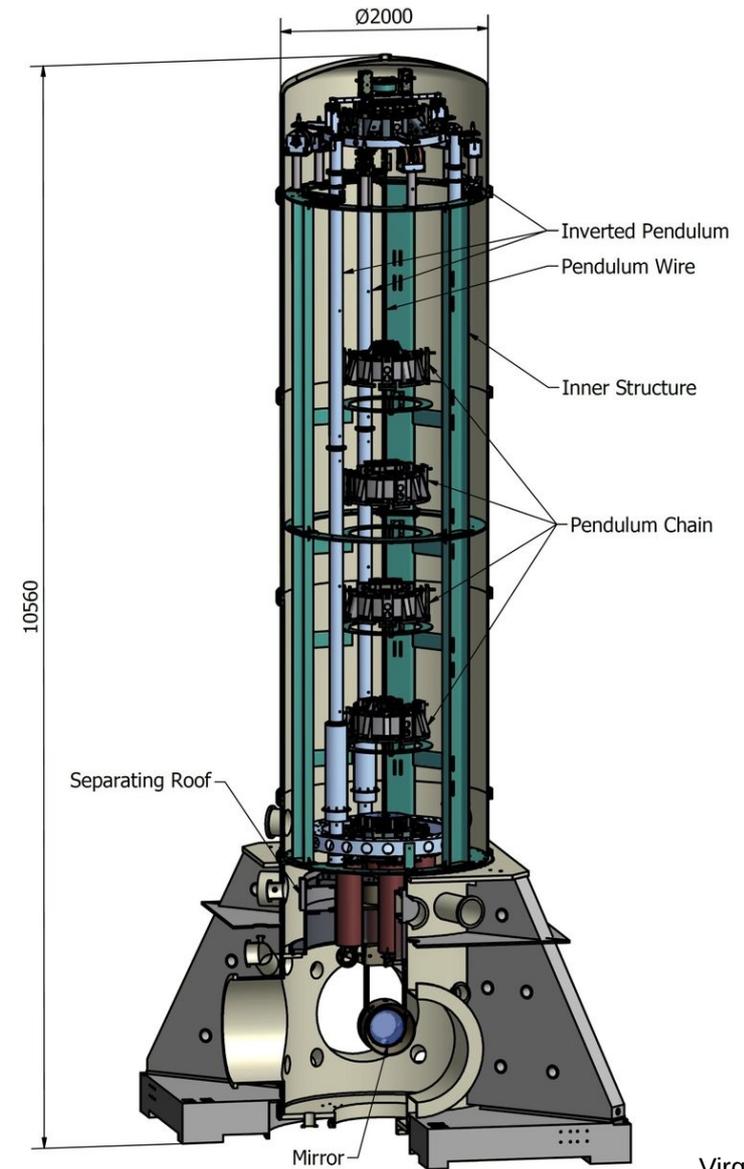
La détection du signal est perturbée par des « bruits »

- Fluctuation du nombre de photons
- Perturbations locales de gravité
 - Variations de g
- Excitation thermique des fils de suspension des miroirs
- Miroirs :
 - Mouvement brownien du revêtement
 - Bruit thermo-optique du revêtement
 - Mouvement brownien du corps
- Bruit sismique : micro-séismes, vagues, météo, trafic routier
- Gaz résiduels



L'amortissement

- Le miroir doit être **le plus immobile possible** (pour maintenir l'interférence destructive)
- « **Superatténuateurs** » (7 étages)
- But : que les **mouvements résiduels** des miroirs soient inférieurs aux autres sources de bruit / les plus faibles possibles → 10^{-12} – 10^{-13} m
 - → Réduire d'un **facteur 10^6 – 10^7 les vibrations du miroir** par rapport au haut de la tour



Le vide

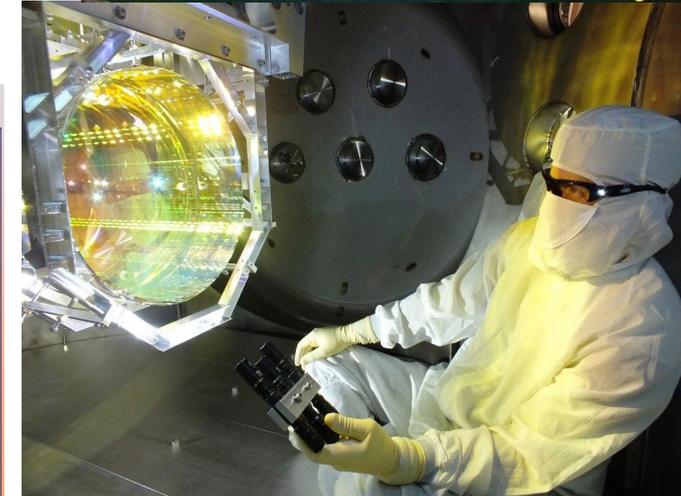
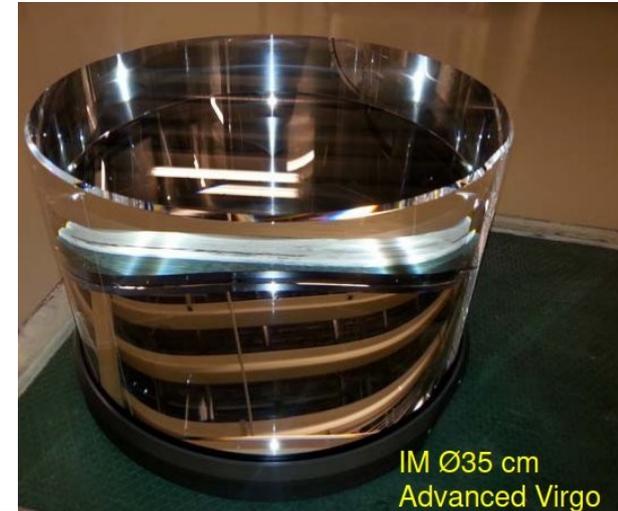
- Pour minimiser les perturbations dues à la présence de particules sur le trajet des faisceaux lumineux, on travaille **dans le vide** :
 - Virgo est l'un des **plus grands systèmes** sous **ultravide** du monde ($p = 10^{-12} p_{\text{atm}}$)
- 7 000 m³ mais surtout 24 000 m²
 - Problème de **dégazage** des équipements, qui rend le vide difficile à maintenir/améliorer



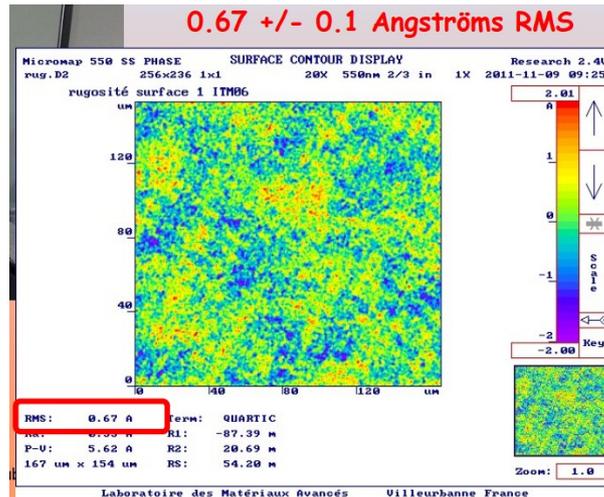
Virgo

Les miroirs

- Si si, ce sont bien les ~meilleurs miroirs du monde...
- Plusieurs années de travail au LMA (Laboratoire des Matériaux Avancés)



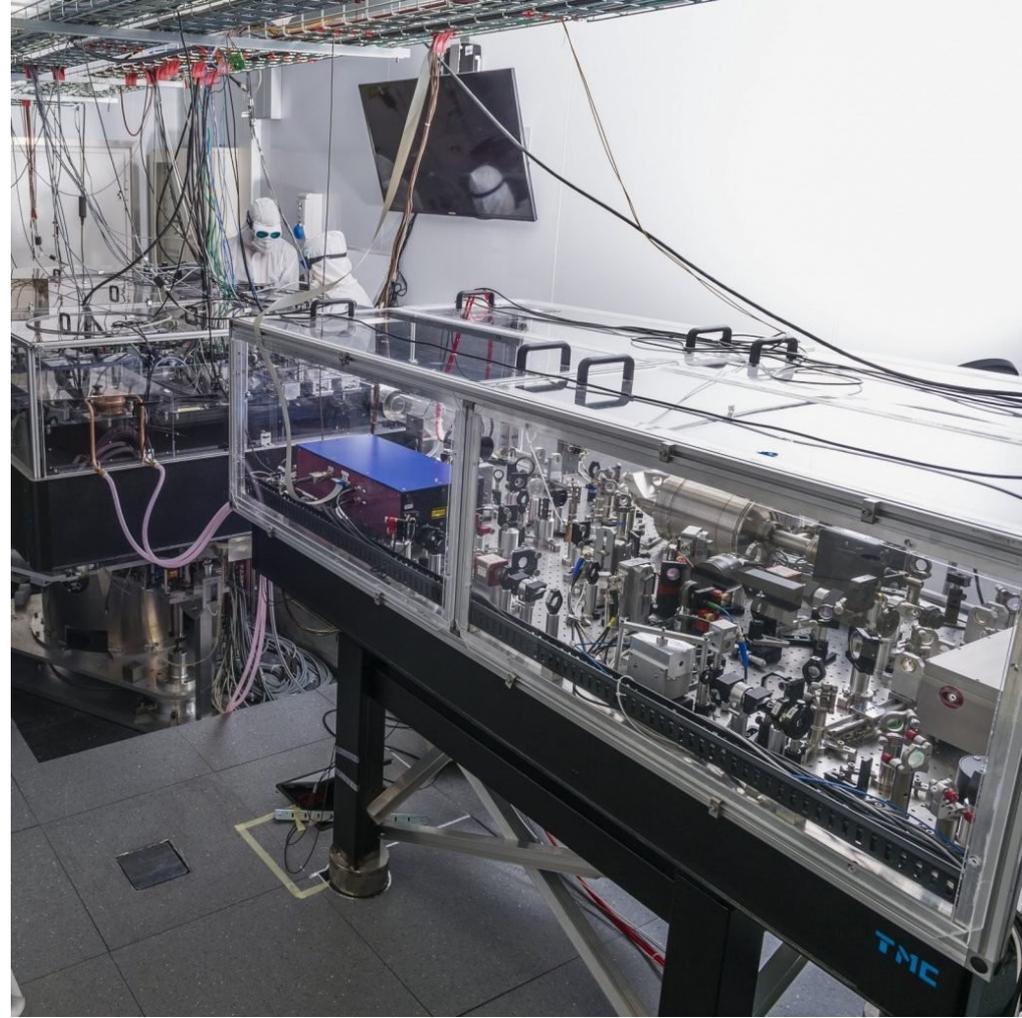
Miroir d'Advanced LIGO
<http://lma.in2p3.fr/Lma.htm>



Qualité du polissage : $< 1 \text{ \AA}$

Le laser

- Laser **infrarouge**
 - $\lambda = 1 \mu\text{m}$ ($\lambda_{\text{rouge}} = 800 \text{ nm}$)
- Besoin d'un **laser très stable**
 - En **puissance**
 - En **fréquence**
- Nouveau laser : 100 W
 - (50 W utiles dans l'interféromètre)

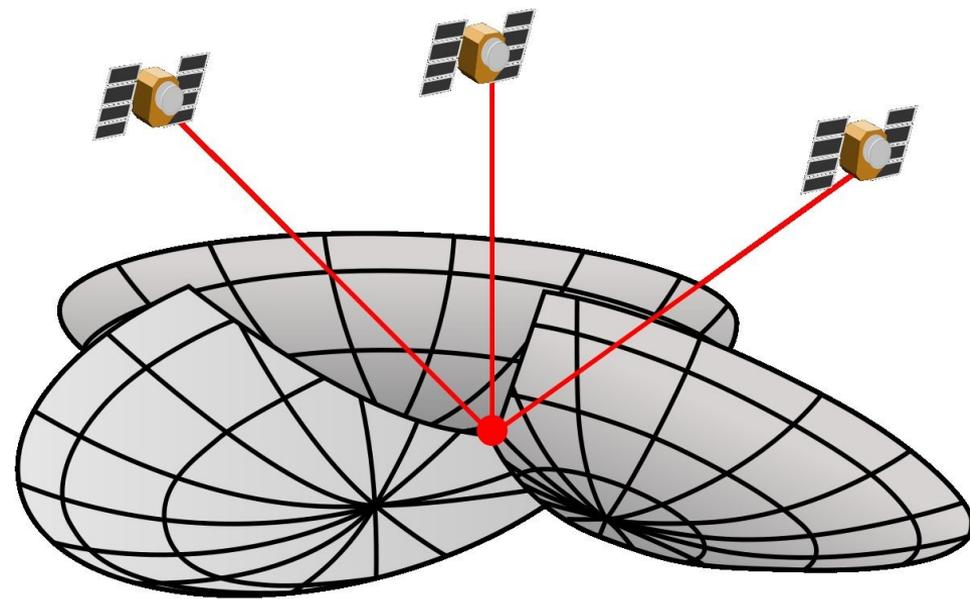


Génération du faisceau laser

<https://www.virgo-gw.eu/science/detector/optical-layout/>

Le système GPS

- « **Global Positioning System** »
- Système états-unien à l'origine militaire déployé entre 1973 et 1995
 - Premier satellite lancé en 1978
- 24 satellites ($h \approx 20\,000$ km, $T \approx 12$ h)
 - Position mise à jour et publiée
- **Autres systèmes**
 - Galileo (Europe)
 - GLONASS (Russie)
 - Beidou (Chine)
 - QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), ou « Michibiki » (Japon)



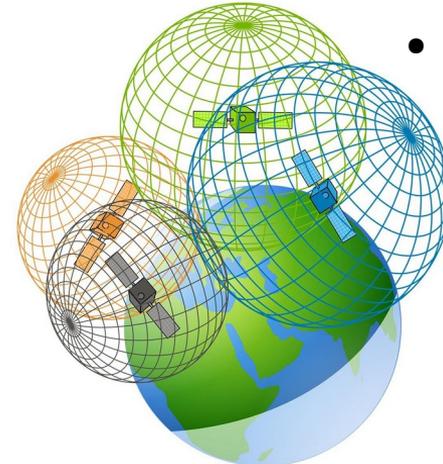
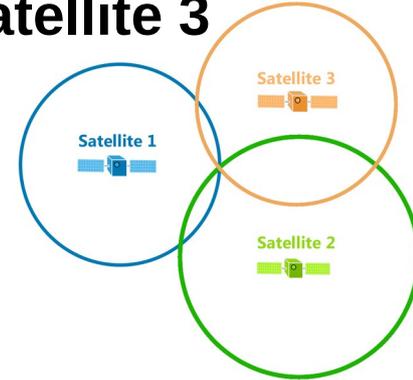
- Ce système fournit la **position** et le **temps**
 - → précision sur Terre des **horloges atomiques** des satellites
 - → permet de **synchroniser les horloges atomiques des expériences** (utilisées pour **estampiller les données** et **dater précisément les événements**)

Localisation (simplification en 2D)

- On mesure la **distance au satellite 1** : on se trouve sur un **cercle de rayon r_1 et de centre ce satellite 1**
- On mesure la **distance au satellite 2** : on se trouve **également** sur un **cercle de rayon r_2 et de centre ce satellite 2**
- Il y a mathématiquement **2 intersections** (en pratique une seule vraisemblable)



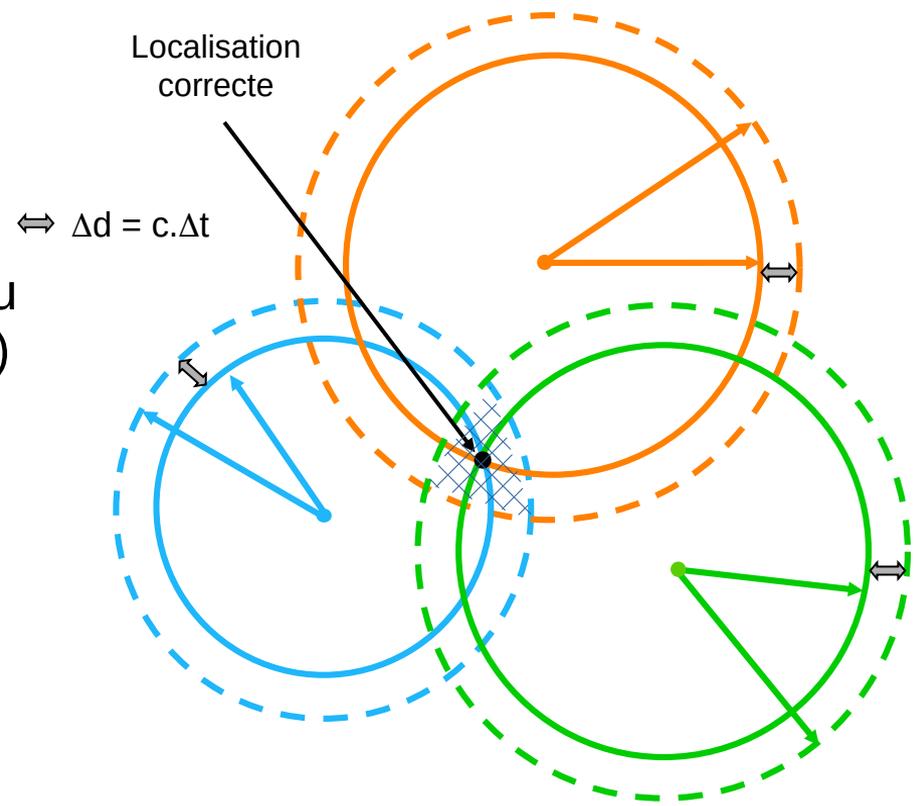
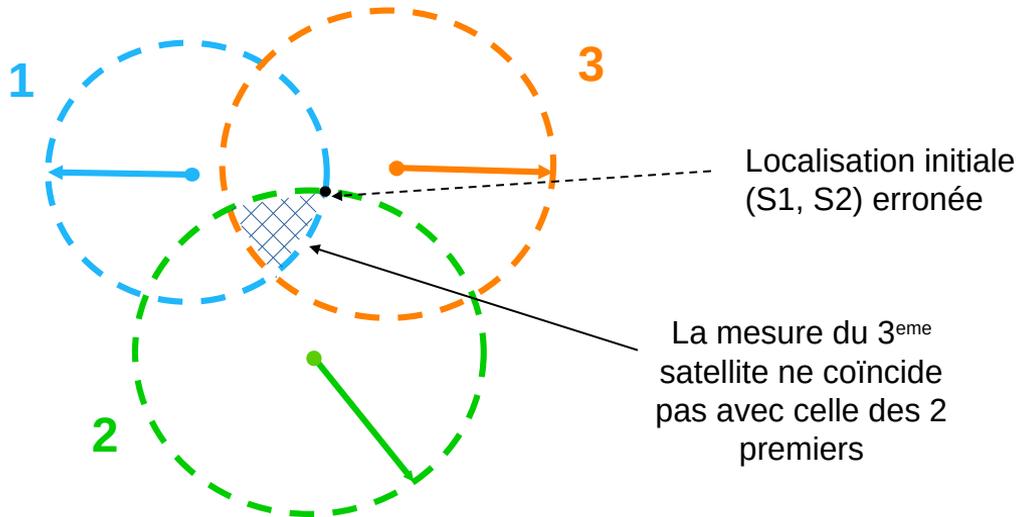
- On mesure la **distance au satellite 3** : on se trouve **également** sur un **cercle de rayon r_3 et de centre ce satellite 3**
 - Une seule intersection mathématique
 - → **c'est notre position !**
 - C'est la **tri-/multilatération**
 - Pas la **triangulation...**



- **Généralisation en 3D :**
 - Cercle → sphère
 - Intersection de
 - 2 sphères = 1 cercle
 - 3 sphères = 2 points
 - 4 sphères = 1 point

Synchronisation

- Rappel : **distance = vitesse x temps**
 - Temps = **intervalle** entre **départ du signal** (du satellite) et **arrivée du signal** (récepteur GPS)
- Donc les horloges du GPS et du récepteur doivent être **synchronisées** ! Sinon les **distances** mesurées sont **erronées**



La correction du décalage Δt entre les 2 horloges permet de résoudre la contradiction apparente des mesures

Le 3^{+ème} satellite (4^{+ème} en 3D) permet donc de synchroniser les horloges

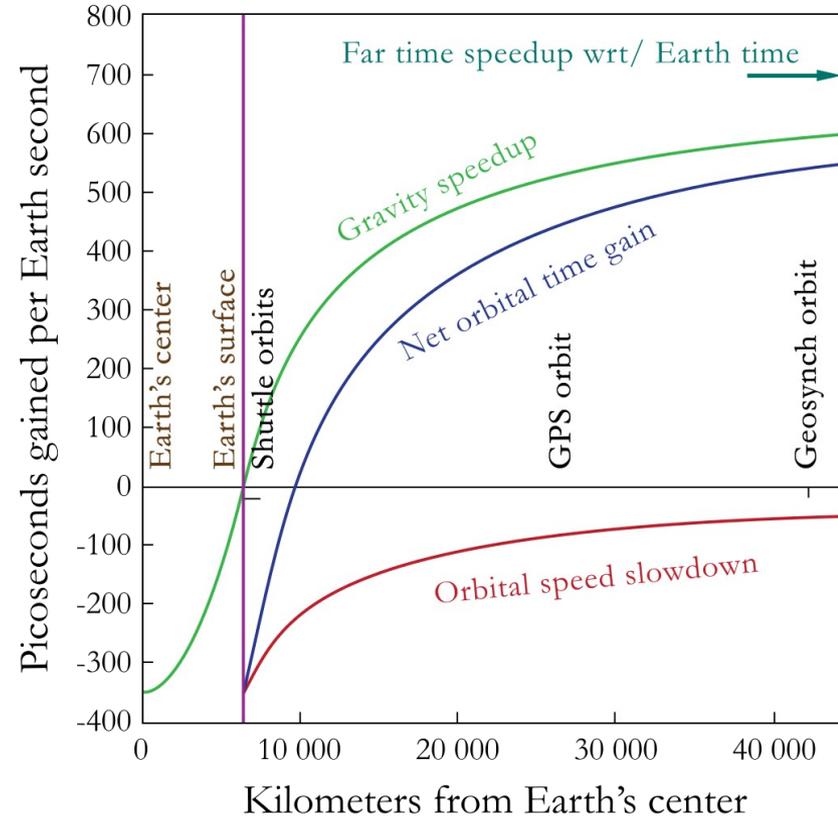
Corrections

- **Précision souhaitée ≈ 3 m, soit 10 ns**
- **Corrections gravitationnelles** : les orbites des satellites sont influencées par
 - L'attraction gravitationnelle de la Lune
 - L'attraction gravitationnelle du Soleil
 - La pression de radiation du Soleil
- **Corrections relativistes nécessaires**
 - **Relativité restreinte** : le temps s'écoule moins vite dans un référentiel en mouvement relativement à un référentiel immobile : $-7,2 \mu\text{s/j}$
 - **Relativité générale** : le temps s'écoule plus vite dans un champ gravitationnel plus faible relativement à un champ plus fort : $+45,8 \mu\text{s/j}$
 - **Combinaison** : l'horloge du satellite **avance de $38,6 \mu\text{s/j}$** par rapport à une horloge sur Terre

$$h \approx 20\,000 \text{ km}$$

$$v \approx 4 \text{ km/s}$$

Time Dilation Effects on Earth

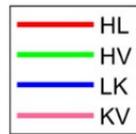
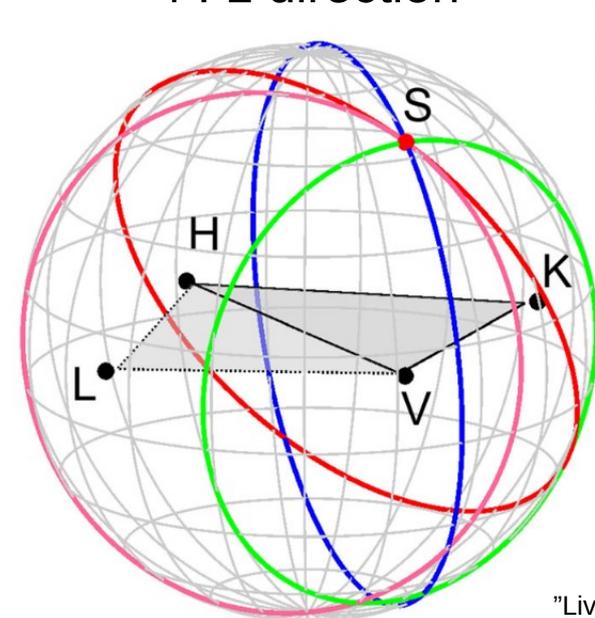
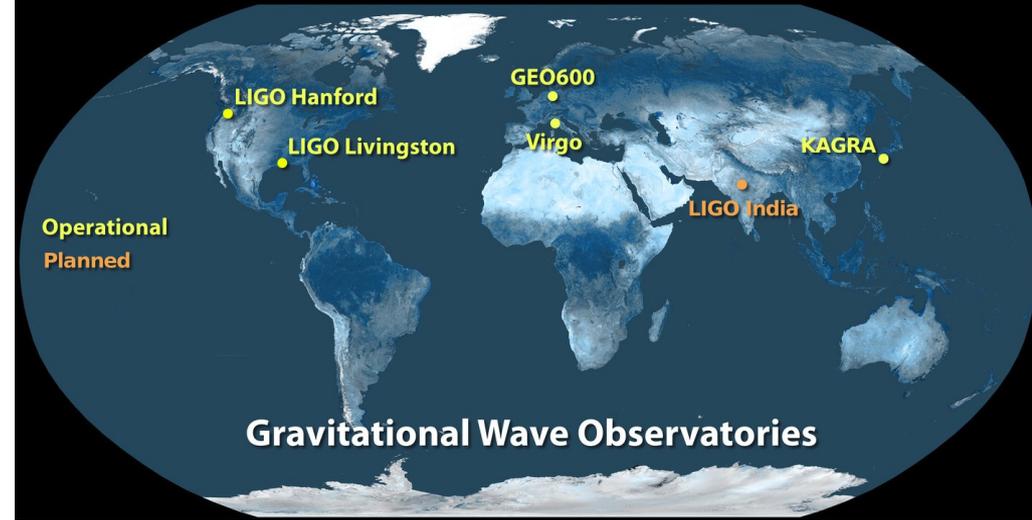


$$T_{\text{Satellite}} = T_{\text{Terre}} * \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$T_{\text{Satellite}} = \frac{T_{\text{Terre}}}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}}$$

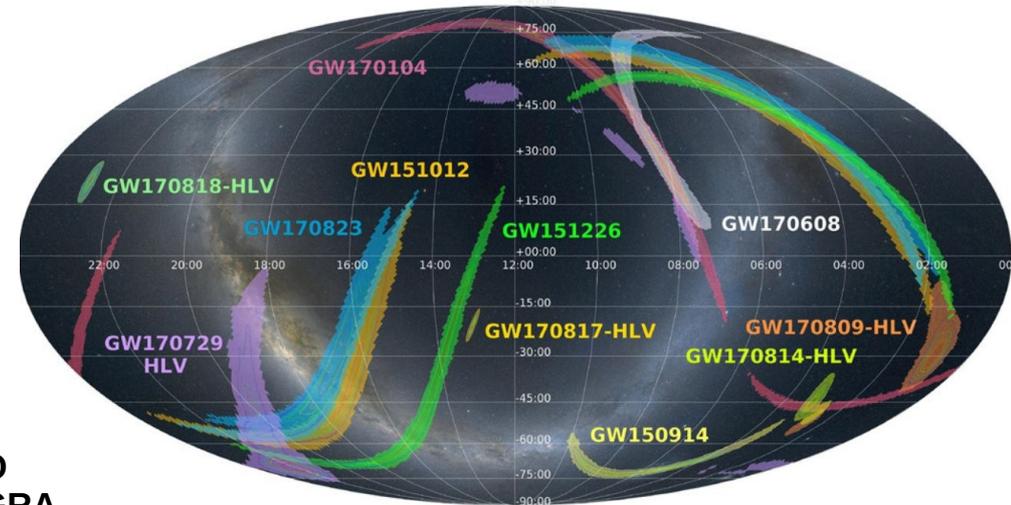
Localisation des sources

- Avec 3+ détecteurs, on peut remonter à la direction de la source
 - 3 : 2 directions possibles
 - 4 : 1 direction



**Besoin de dater
précisément les
événements !**

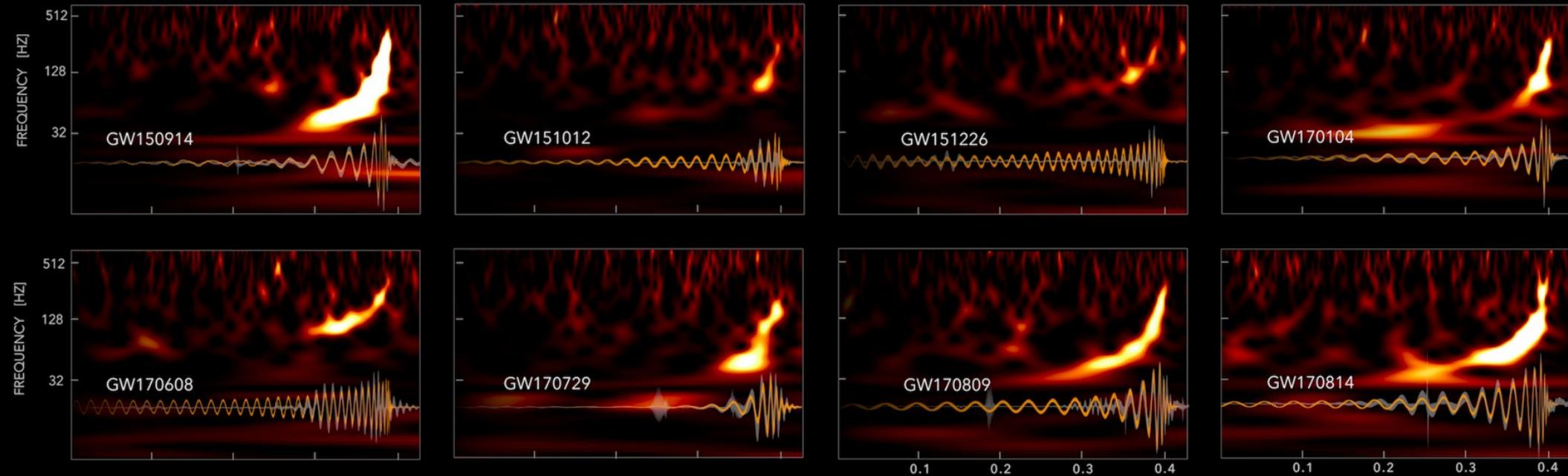
**H : LIGO Hanford, L : LIGO
Livingston, V : Virgo, K : KAGRA**



Détections

- **Coalescences binaires** (= effondrement des systèmes binaires)
 - LIGO : **détection directe** en 2015, prix Nobel en 2017

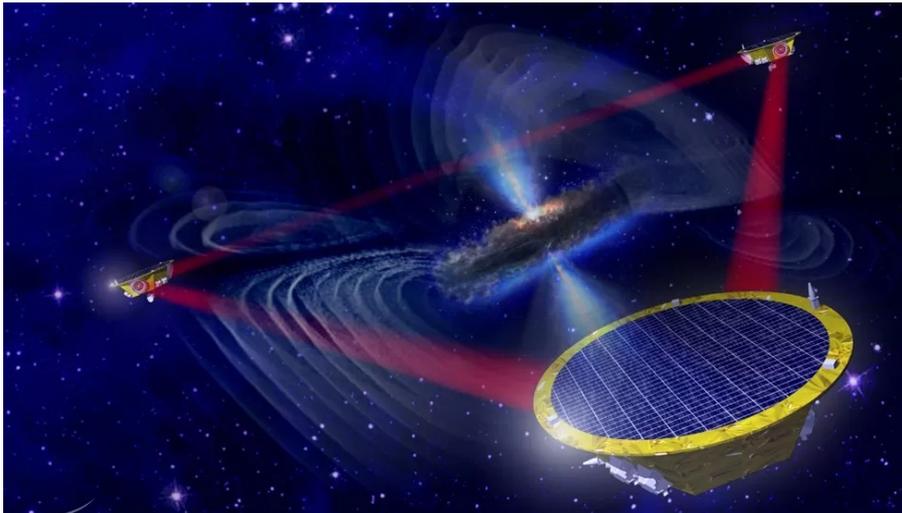
GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



Futurs détecteurs

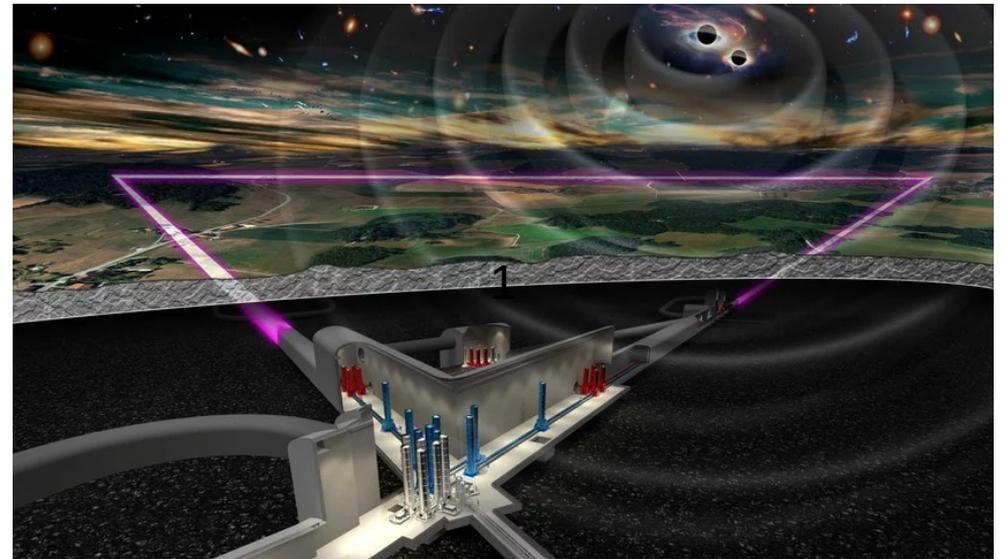
LISA (« Laser Interferometer Space Antenna »)

- Trois satellites en orbite héliocentrique formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté, reliés par six faisceaux laser
- Ondes gravitationnelles de fréquences beaucoup plus basses : 0,1 – 100 mHz
- Lancement en 2037...



Einstein telescope

- 8 pays européens
- Bras en triangle de 10 km de long, sous terre
- 10 fois plus sensible que Virgo → détection d'événements dans un volume 1000 fois plus grand (signaux émis juste après le Big Bang)
- Aux USA, Cosmic Explorer (bras de 40 km)



Pour aller plus loin

- <https://www.virgo-gw.eu/>
- <https://www.ligo.org/>
- http://www2.cnrs.fr/sites/communique/fichier/3_advanced_virgo.pdf
- Cosmic Explorer : <https://arxiv.org/pdf/2109.09882.pdf>
- <https://theses.hal.science/tel-00003878>