

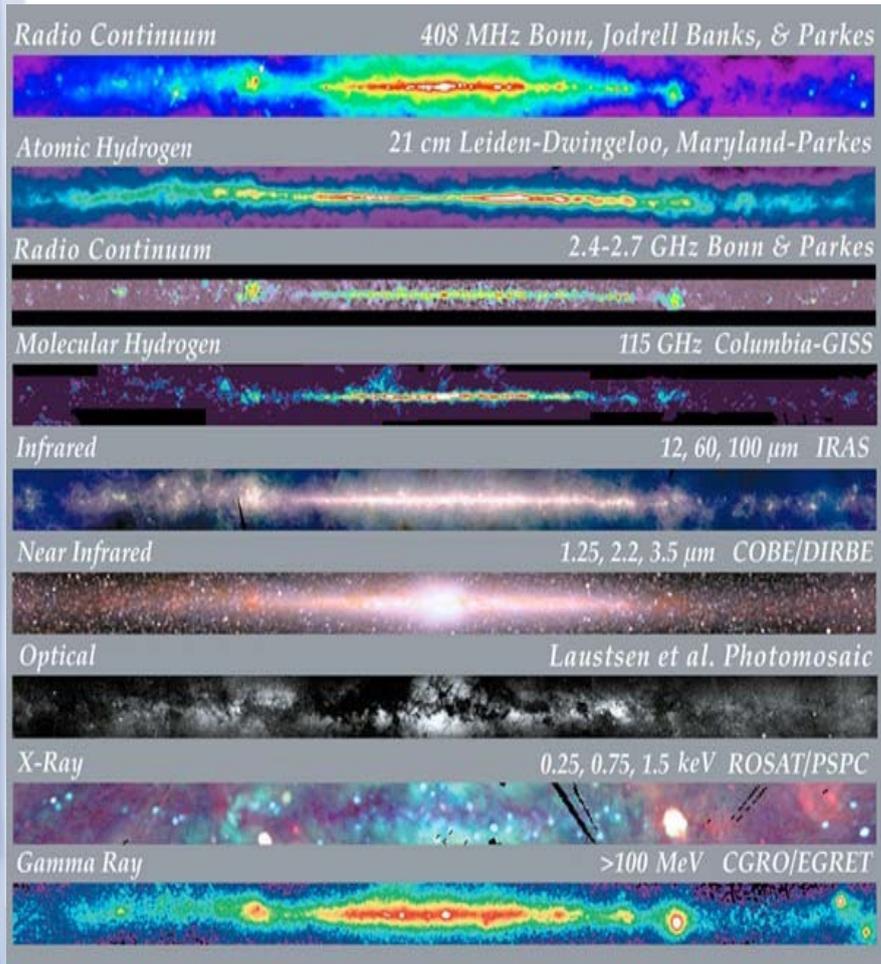
Les ondes gravitationnelles

Écouter l'Univers

Nicolas Leroy
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay

Ecole d'été de physique 2013

Comment a-t-on des informations sur l'Univers ?



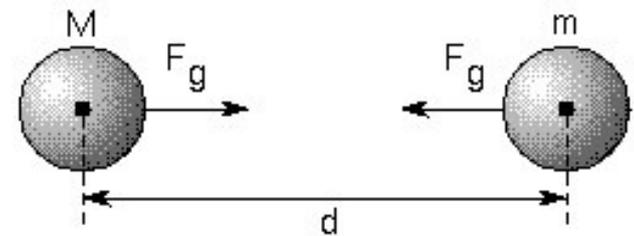
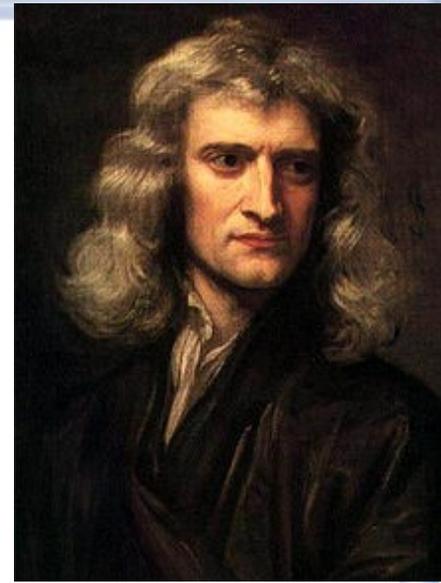
- Ce qui nous tombe dessus
- En allant sur place
- En regardant la lumière sur l'ensemble du spectre électromagnétique
 - Régions très denses restent inaccessibles
- Idée : utiliser d'autres messagers:
 - Neutrinos
 - Ondes gravitationnelles

Commençons ...

- Expliquer ce que sont les OG
 - Un peu de relativité
 - Comment les créer
 - Comment les détecter
- Détecteurs au sol : LIGO – Virgo
- L'espace proche : eLISA
- L'espace lointain : PTA

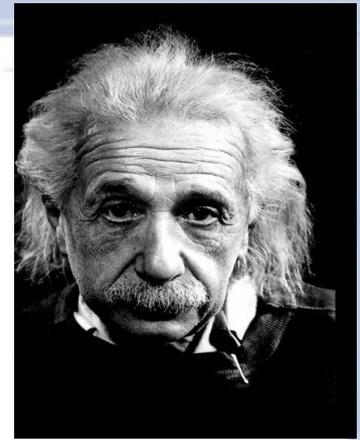
De Newton (1687)

- La gravitation est universelle : même force entre la pomme et la Terre qu'entre le Soleil et la Terre
- Action à distance
 - Explication naturelle pour la forme des orbites des planètes
 - N'explique pas l'origine de la gravitation
 - Effet instantané du moindre changement
- Coordonnées galiléenne
- Temps et distance absolus



$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$

À Einstein (1915)



- La gravité ne résulte pas d'une force mais d'une déformation de l'espace temps
- Tout objet déforme l'espace-temps



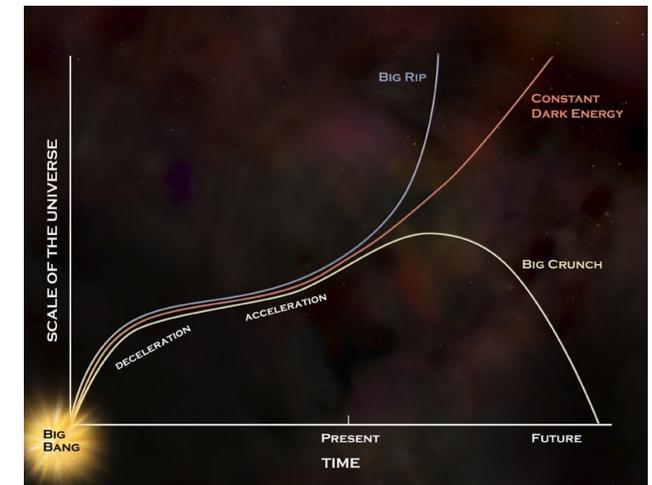
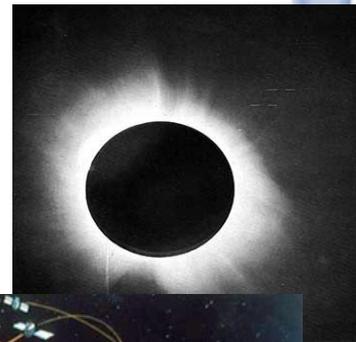
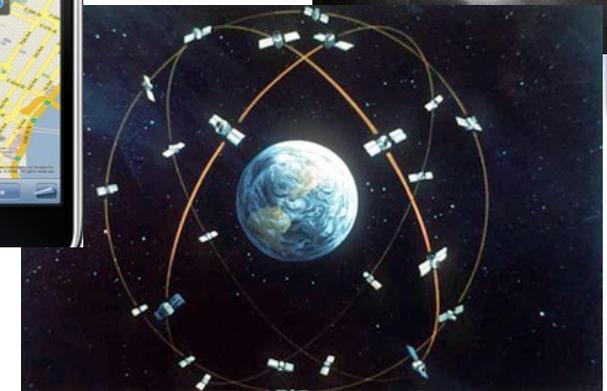
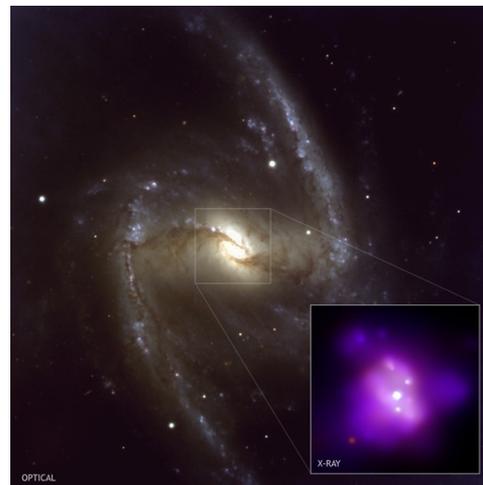
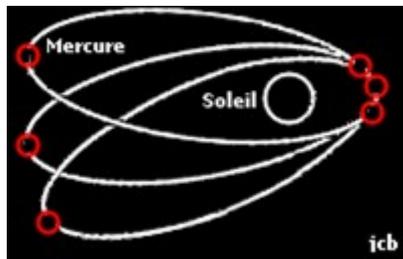
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

- Les objets en chute libre suivent la courbure de l'espace-temps
- Il n'existe plus de référentiel absolu



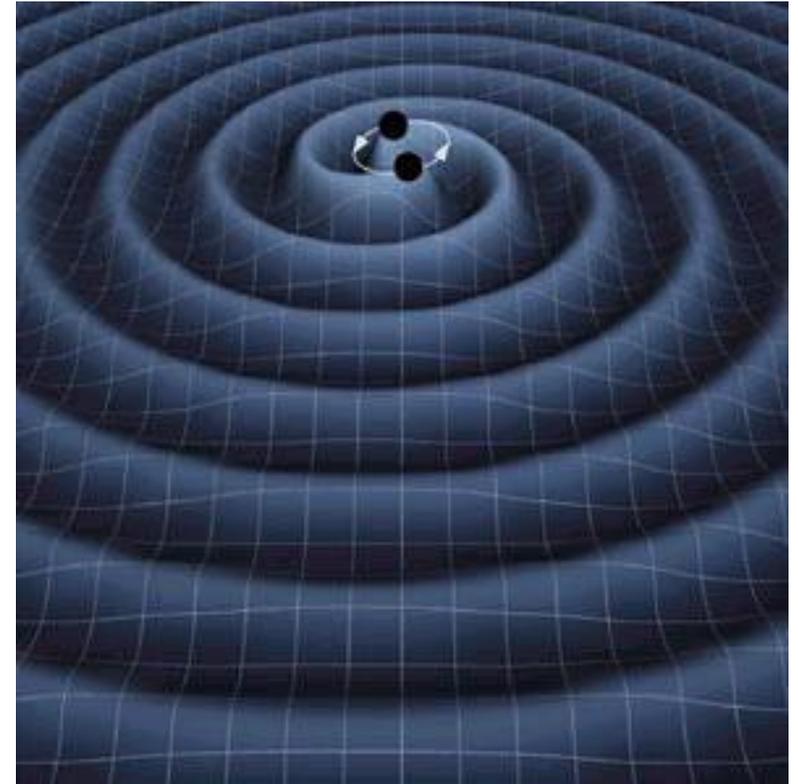
Les succès de la relativité générale

- Déviation de la lumière à proximité de grandes masses (Eddington 1919)
- Orbites planétaires (précession de Mercure)
- GPS (dilatation du temps)
- Singularités gravitationnelles (trous noirs)
- Expansion de l'univers (constante cosmologique)
- Beaucoup d'autres choses...



Quand les masses se déplacent ...

- Masses en mouvement :
 - variation locale de la courbure
 - propagation de la courbure (comme une onde à la surface de l'eau)



Onde gravitationnelle propage une perturbation locale de l'espace-temps (à la vitesse c)

Les débuts théoriques des OGs

- En 1916 Albert Einstein montre que les OG sont une conséquence directe de la théorie de la relativité générale
- En 1936 en collaboration avec Nathan Rosen, Einstein revient sur cette affirmation dans un article '*Do gravitational waves exist ?*' soumis à la revue Physical Review
- Le papier est refusé (par Robertson), ce qui vaut à la revue une réponse cinglante d'Einstein :
« I see no reason to address the – in any case erroneous – opinion expressed by your referee »
- Finalement il comprend son erreur (sur un choix de coordonnées), les OGs existent et resoumet son article modifié dans une autre revue

Les produire en laboratoire ?

- Prouver l'existence des OG : peut-on faire comme Hertz avec les ondes électromagnétiques ?

- Puissance émise : $P = \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{Q}_{\mu\nu} \ddot{Q}^{\mu\nu} \rangle$ Moment quadrupolaire:
quantifie écart à la symétrie
sphérique

$G/5c^5 \sim 10^{-53} \text{ W}^{-1}$

facteur astronomiquement pénalisant !

source	distance	$H = \Delta L/L$	P (W)
Barreau d'acier, 500 T, $\varnothing = 2$ m L = 20 m, 5 tours/s	1 m	2×10^{-34}	10^{-29}
Bombe H, 1 mégatonne Asymétrie 10%	10 km	2×10^{-39}	10^{-11}

Allons voir plus loin, plus compact

- « G/c^5 very small , c^5/G will be better » @ J. Weber(1974)

- Puissance émise :
$$P = \frac{G}{c^5} \epsilon^2 \omega^6 M^2 R^4$$

ϵ : asymétrie

R : rayon de la source

M : masse de la source

ω : vitesse caractéristique

- Rayon de Schwarzschild :
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

rayon de trou noir de même masse

- Récrivons la puissance :
$$P = \frac{c^5}{G} \epsilon^2 \left(\frac{v}{c}\right)^6 \left(\frac{R_s}{R}\right)^2$$

Pour être détectable :

- **astre compact**
- **grande asymétrie du système**
- **mouvement relativiste**

Supernovae

10 M_\odot @ 10 kpc

$$h \sim 10^{-21}$$

NS-NS @ 10 Mpc

$$h \sim 10^{-20}$$

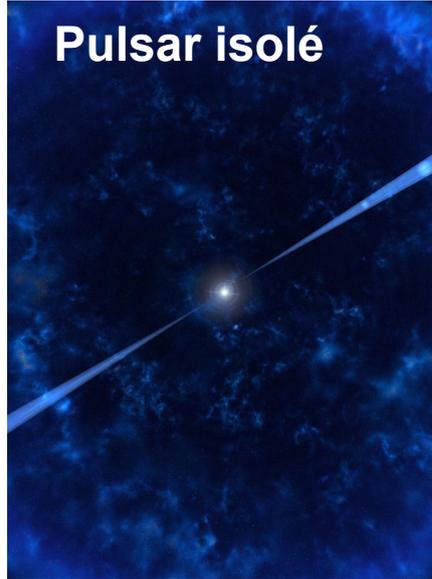
$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ al} = 3.09 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

Sources possibles

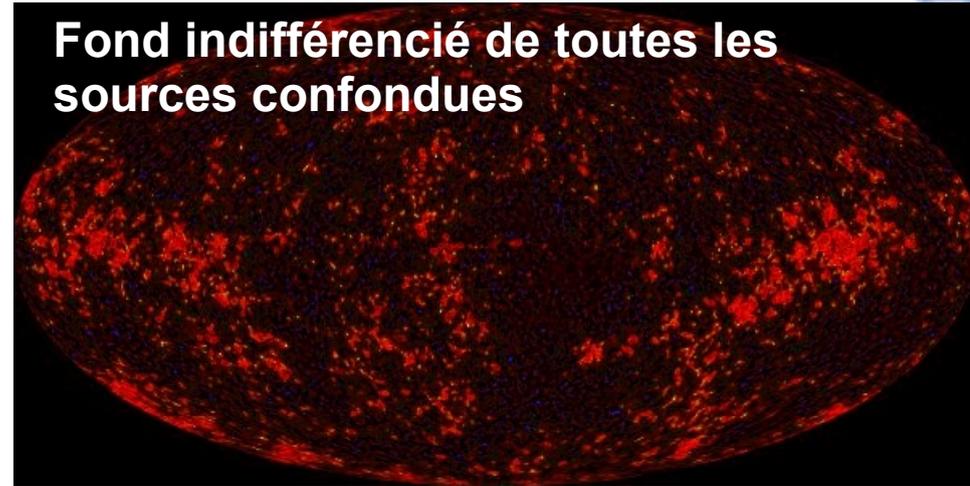
**Effondrement
d'étoile massive
(supernova)**



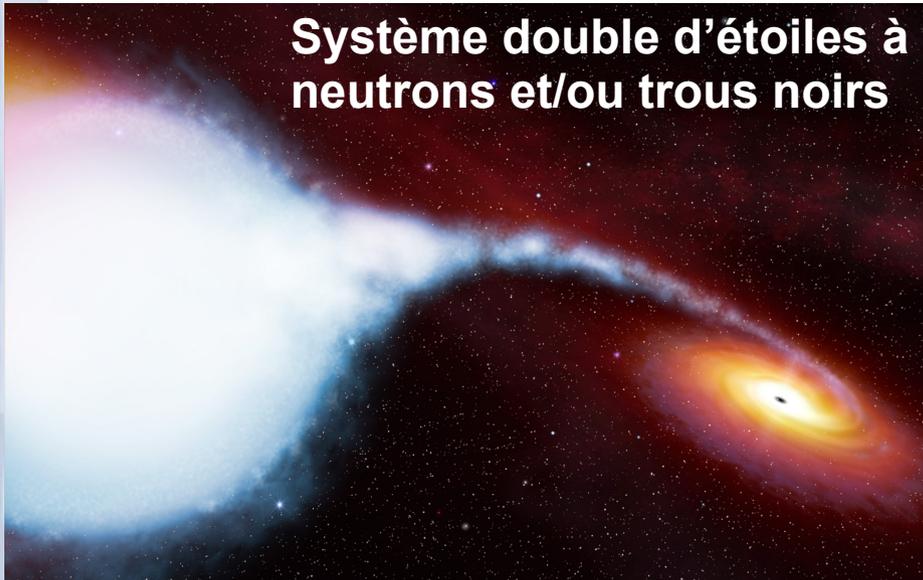
Pulsar isolé



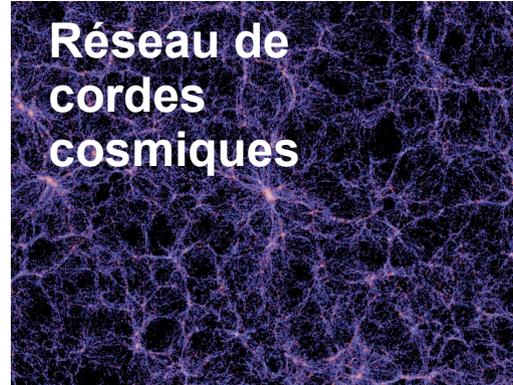
**Fond indifférencié de toutes les
sources confondues**



**Système double d'étoiles à
neutrons et/ou trous noirs**

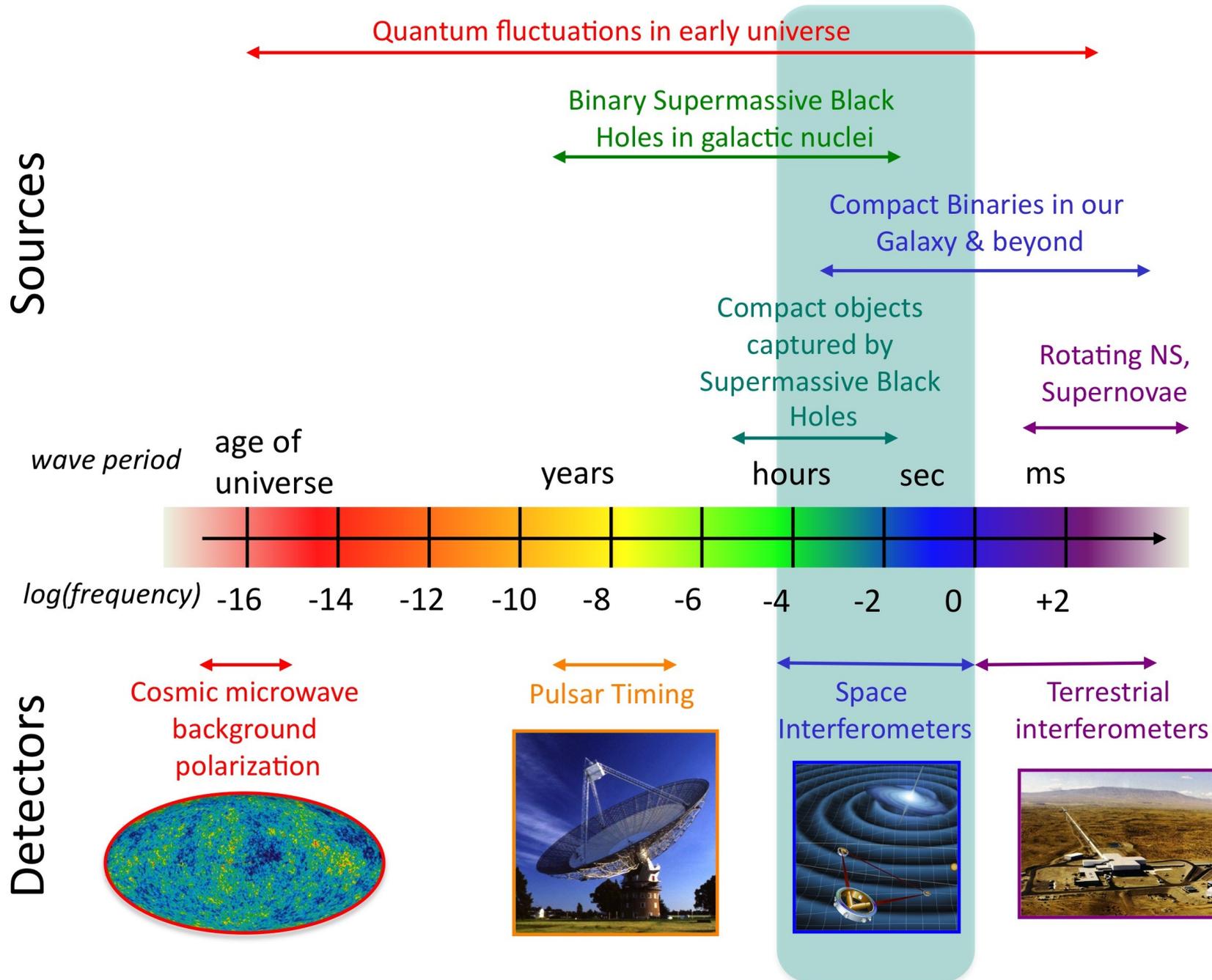


**Réseau de
cordes
cosmiques**



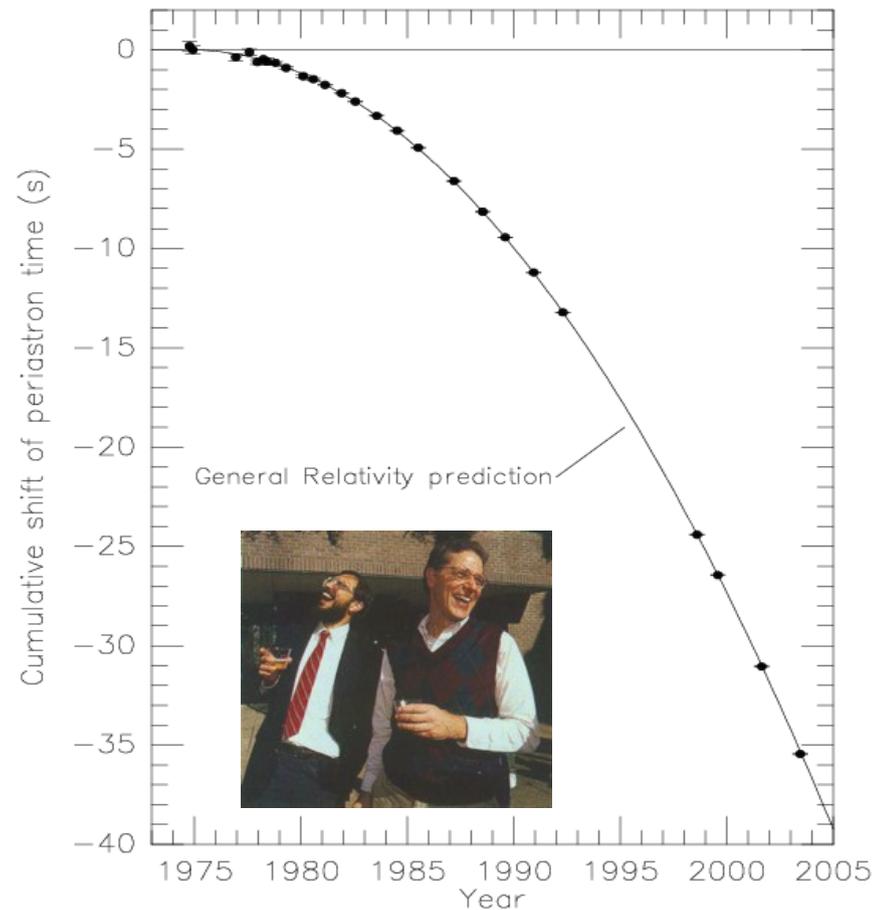
Surprise !

The Gravitational Wave Spectrum



Preuves d'existence ?

- La première preuve expérimentale existe !
 - Pulsars binaires comme PSR 1913+16
- Perte d'énergie de ces systèmes par OG induit une diminution de la période orbitale
 - ♦ Séparation $\sim 10^6$ km
 - ♦ Diminution de 3mm/orbite(8h)
 - ♦ Observée pendant plus de 30 ans

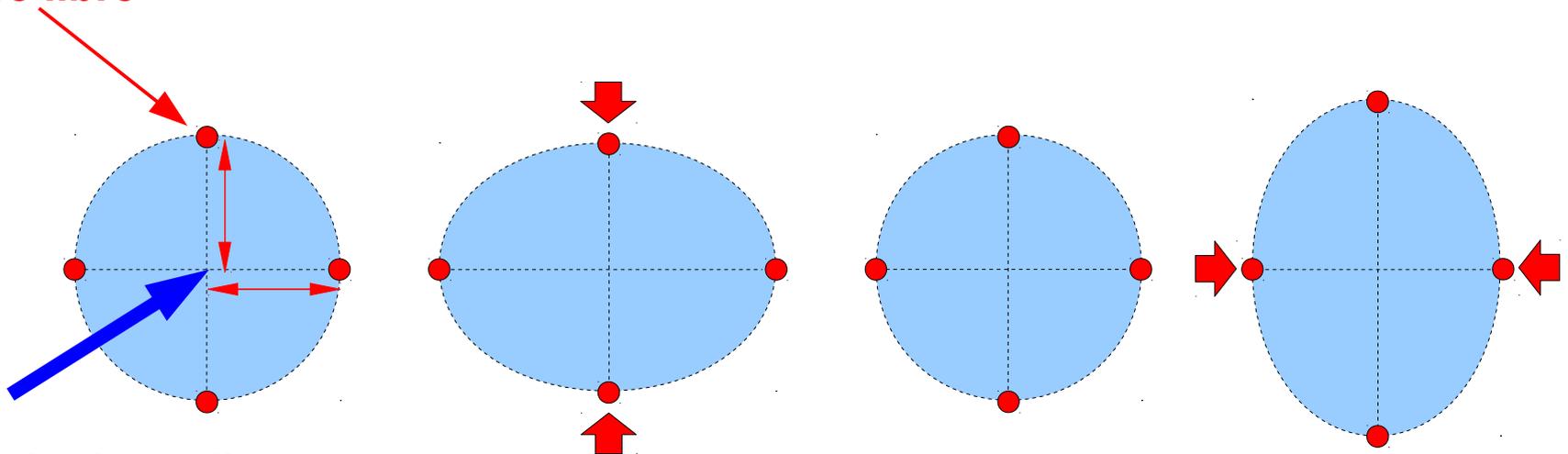


Prix Nobel Hulse et Taylor en 2003

Passage d'une onde

- Espace-temps légèrement modifié
→ les distances changent brièvement : $h = \delta L / L$
- h correspond au taux de déformation de l'espace-temps
- Très faible interaction avec la matière – accès aux grandes distances
- Détecter une onde gravitationnelle revient à détecter une variation relative de distance

Masse libre



Onde gravitationnelle

Comment les détecter ?

Les problèmes :

- Amplitudes très faible
- Peu/pas de couplage avec la matière

Première solution :

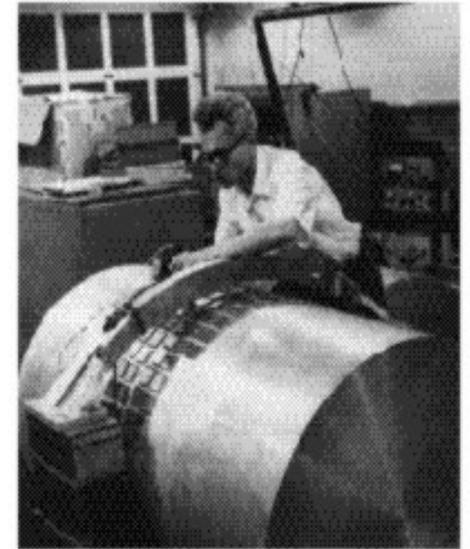
- Mesurer l'impact sur un solide :
détecteurs de type barres
- premières expériences par Weber dans les années 60

Les barres de Weber

- Barre d'Aluminium – 2m long., 1m Ø
- Détection longueur via piézoélectriques
- Sensibilité dictée par la forme de la barre
- Fausses détections dans les années 80
- Détecteurs les plus récents étaient cryogéniques et suspendus

Conclusions :

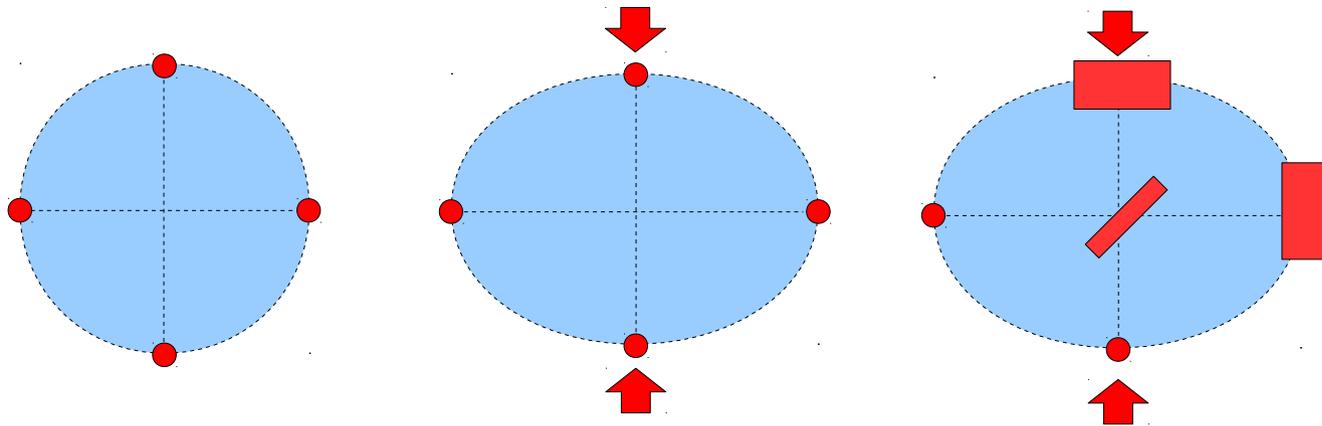
- Difficile à mettre en place
- Détecteurs bruyants
- Sensible à une seule fréquence



Comment les détecter ?

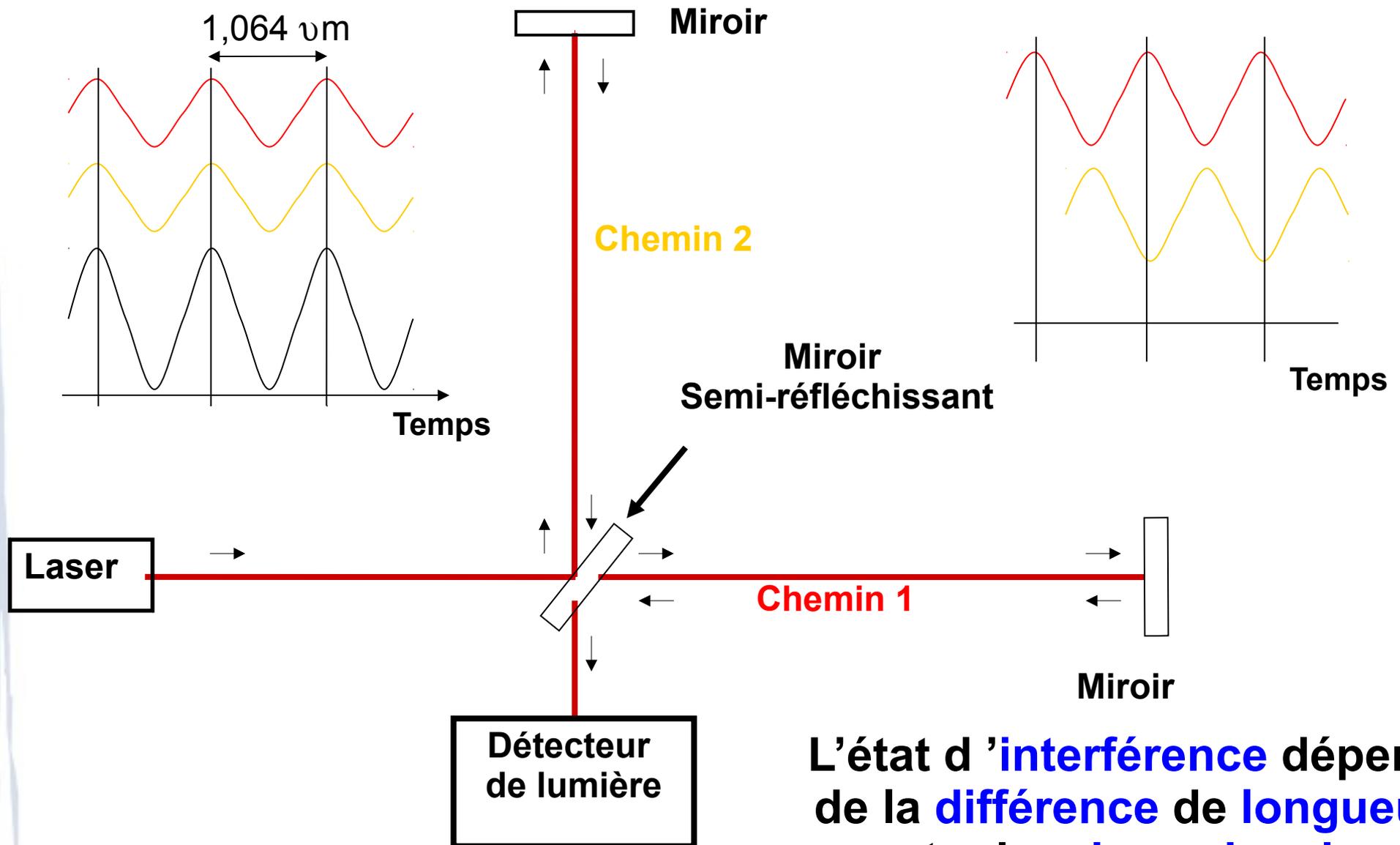
Seconde solution :

- Utiliser l'effet différentiel : idées d'utiliser les interféromètres de Michelson-Morley (non détection de l'ether) dans les années 70



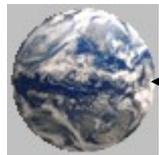
- Mise au point du concept complet sur la décade suivante
- Technique aujourd'hui la plus sensible

Interféromètre de Michelson



Pour détecter des OG ...

- Une OG va modifier la longueur des deux chemins optiques
- On obtient une figure d'interférence différente
- Réglons nous sur la frange noire
- Si OG, le détecteur va recevoir de la lumière
- La quantité de lumière sera proportionnelle à l'amplitude h de l'onde incidente
- Toutefois cela revient à :



Terre

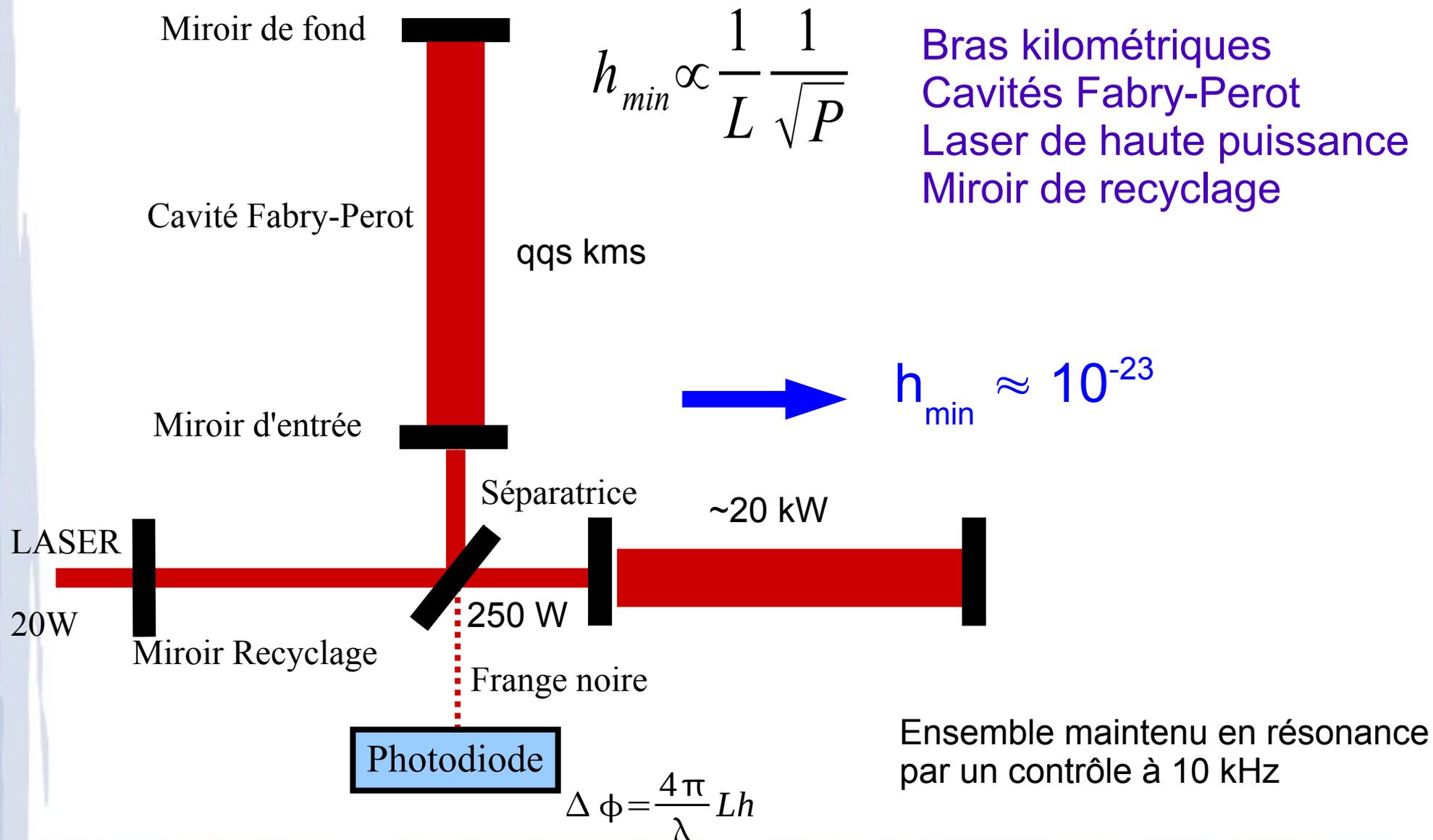
Mesurer une distance de l'ordre de
150 millions de kilomètres

à un atome près

Soleil

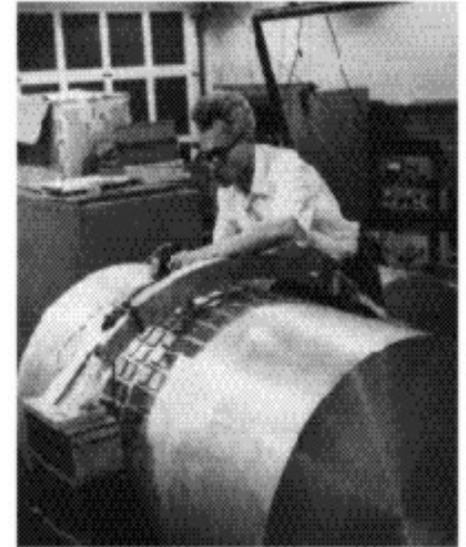


Détecteurs interférométriques



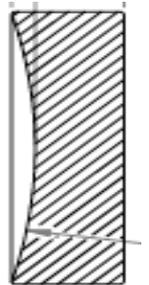
Une histoire déjà longue

- 1960 Premier détecteur(Weber)
- 1963 Idée d'un détecteur ITF(Gersenshtein&Pustovoit, Weber)
- 1969 Première fausse alarme (Weber)
- 197X Age d'or des détecteurs type Weber
- 1972 Faisabilité de l'ITF (Weiss) et premier prototype (Forward)
- 1974 PSR1913+16 (Hulse&Taylor)
- Fin 70s Barres à 4K, prototypes ITF(Glasgow, Garching, Caltech)
- 1980 Premières activités in France
- 1986 Naissance de la collaboration VIRGO (France+Italie)
- 1989 proposal VIRGO, proposal LIGO (USA)
- 1992 VIRGO FCD Approbation Française. LIGO approuvé
- 1993 VIRGO approuvé en Italie
- 1996 Début Construction VIRGO et LIGO
- 2001-2002 VIRGO CTF. LIGO : engineering runs
- Fin 2005 LIGO à sa sensibilité nominale
- 2007 Premier run commun LIGO/Virgo
- 2009 Virgo ~ à sa sensibilité nominale



Détection sur notre bonne veille Terre

- Avoir une masse de référence de la métrique en s'isolant du sol
 - Système d'isolation sismique (limite basse en fréquence)
- Avoir un laser de haute puissance (20/200 W) stable en puissance et en fréquence 24h/24
- Avoir des miroirs de qualité optique à la limite des techniques actuelles
 - Réflectivité de 99.9999 %
 - Courbure de 3-4 km sur 30 cm (flèche de 1 μm)
 - Matériau pour avoir le moins de bruit thermique
- Mettre l'ensemble du système sous-vide ($\sim 7000 \text{ m}^3$ à 10^{-9} mbar)
- Contrôler en permanence le système (à 10 kHz) pour le garder à son point de fonctionnement optimal



Un premier réseau mondial de détecteurs

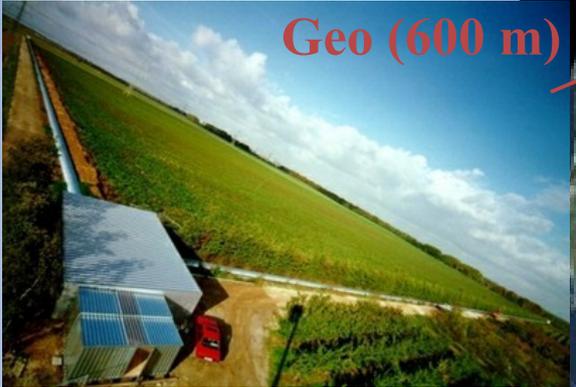
Virgo (3 km)



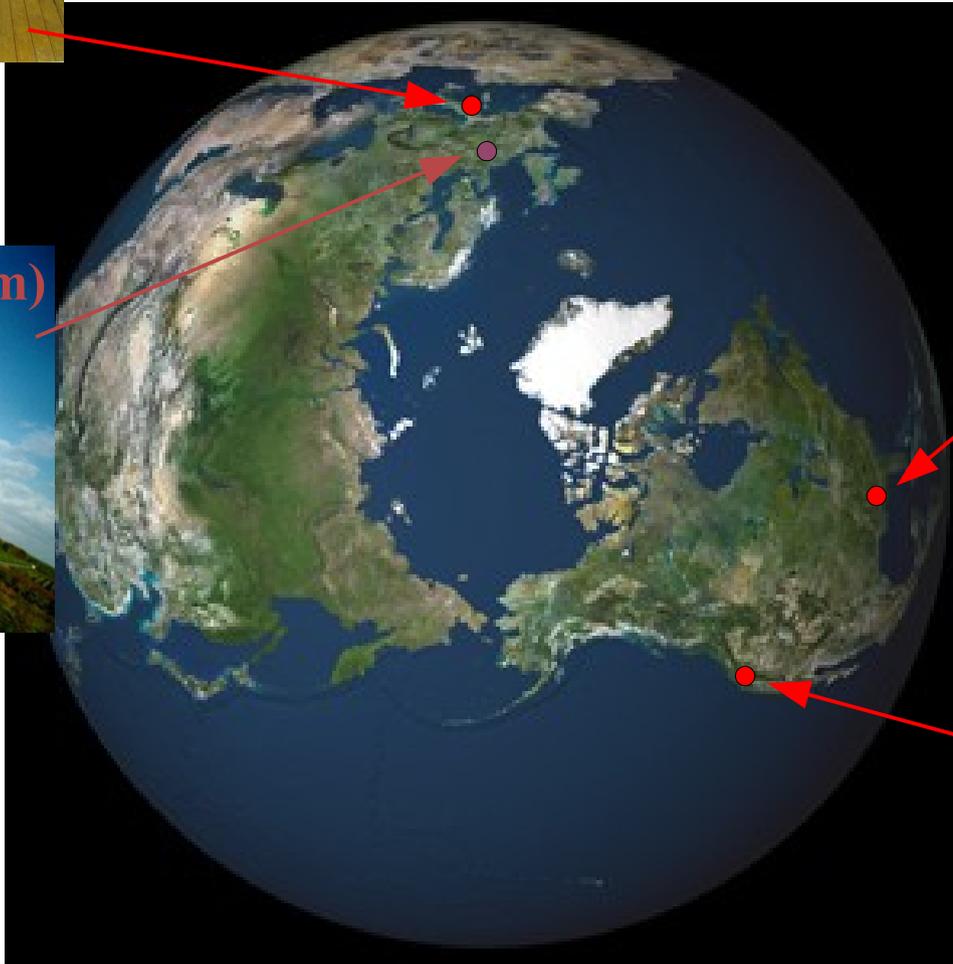
Livingston (4 km)



Geo (600 m)



Hanford (2 - 4 km)



Et dans quelques années

H1: 4 km



G1: 600 m



V1: 3 km



L1: 4 km

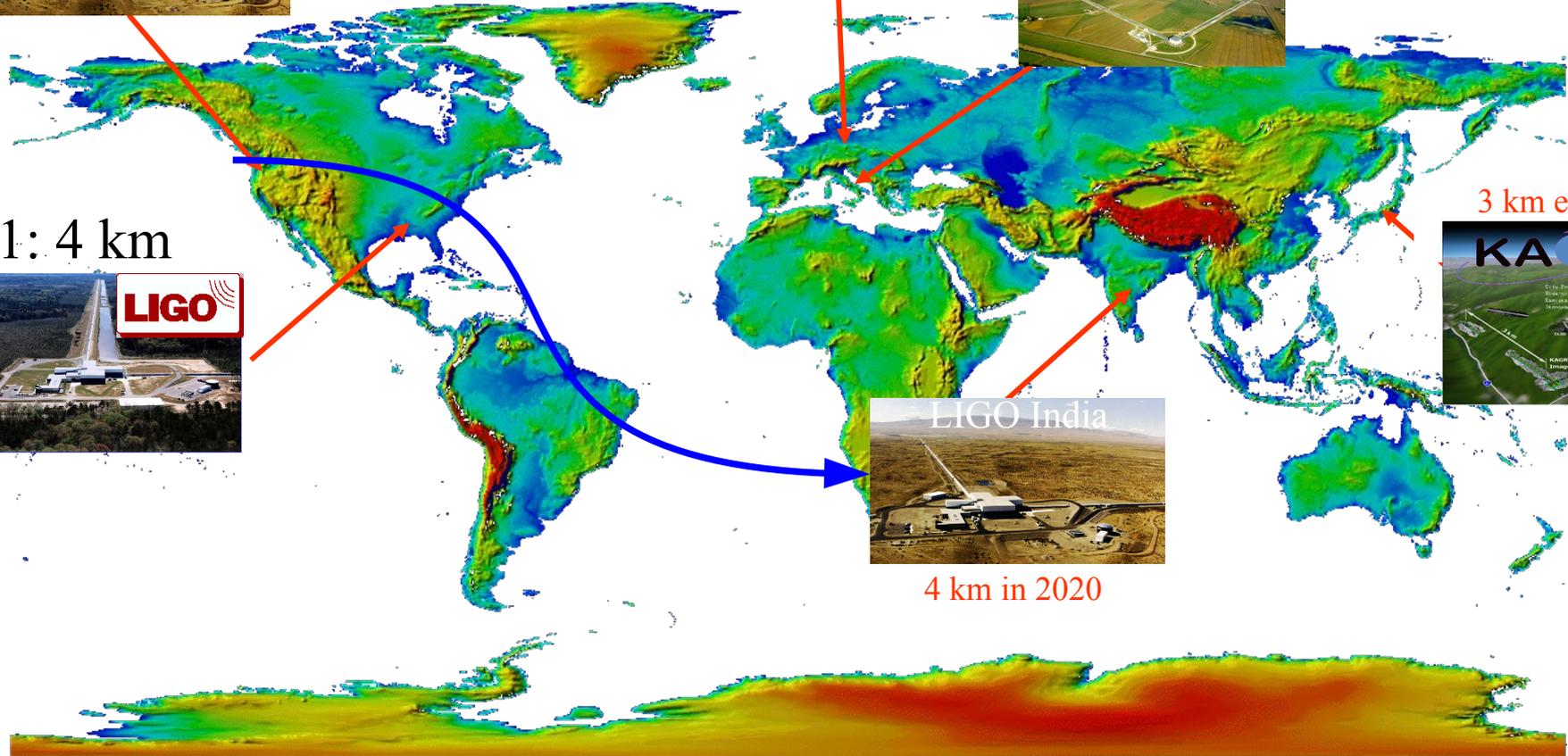


LIGO India



4 km in 2020

3 km en 2017



S'isoler du sol

- Origines du bruit (quelques exemples):
 - Houle
 - Activité humaine
 - Tremblements de terre
- Bruit sismique mesuré :
 - Filtrage indispensable



Pendule inversé : 7m, 1 tonne
5 filtres passifs intermédiaires

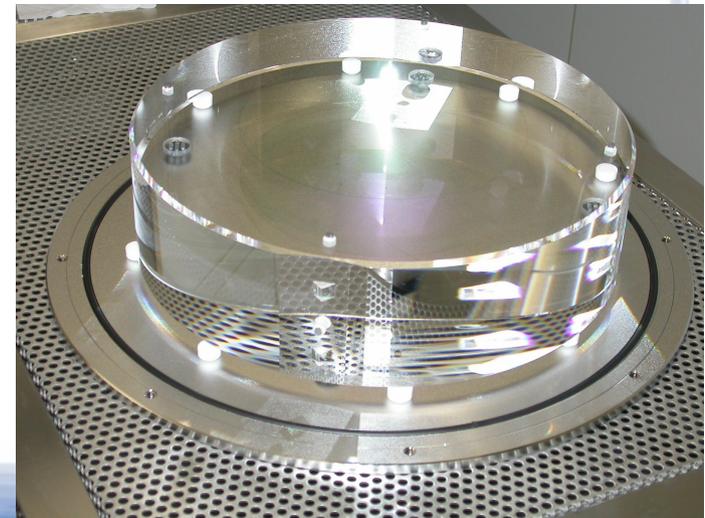
Atténuation sismique:
 $\sim 10^{14}$ à 10 Hz

Miroir, mon beau miroir

- A température ambiante la surface du miroir peut bouger
 —→ masse de + de 10 kg
- Réflectivité définie à mieux que 0.01 % : nos miroirs standard le sont à 1 %
- Faibles pertes (absorption, diffusion) de l'ordre que quelques ppm à $\lambda=1064\text{nm}$
- Surface définie avec défauts $<$ au nm ($\lambda/1000$) sur 30 cm de diamètre

Solution actuelle :

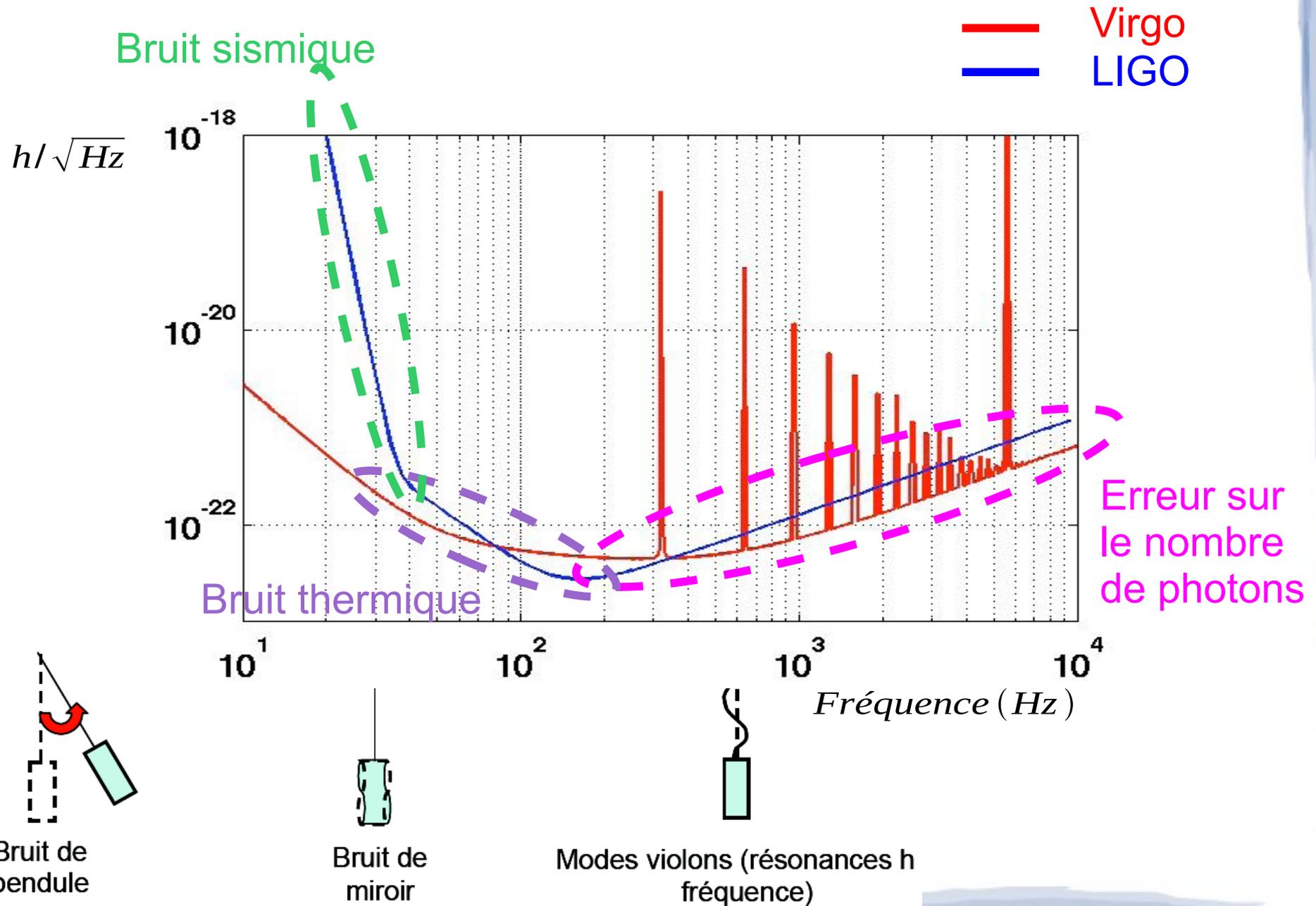
- miroir en silice (SiO_2)
- diamètre : 35 cm
- épaisseur : 10 – 20 cm
- masse : 20-30 kg
- dépôt en couches monoatomiques



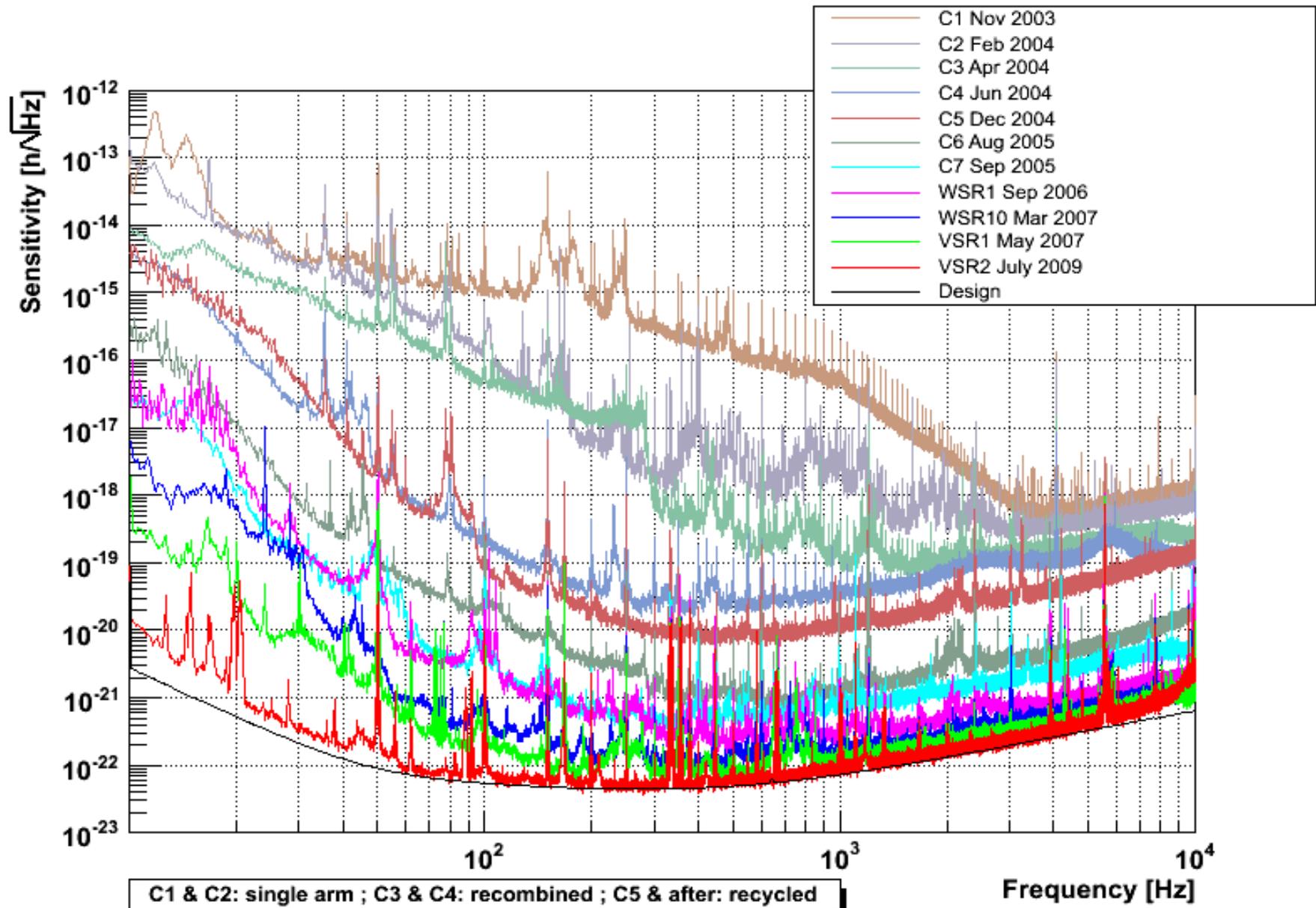
Autres problèmes possibles

- Bruit acoustique – enceinte à vide + protection spécifiques autour des systèmes externes
- Fluctuation d'indice sur le chemin optique – enceinte à vide
- Bruit du laser – contrôle en permanence
- Toute lumière diffusée doit-être piégée
- Contrôle des éléments optiques (par couple bobine-aimant):
 - Contrôle des longueurs : $\sim 10^{-10}$ m
 - Alignement des miroirs : $\sim 10^{-9}$ rad

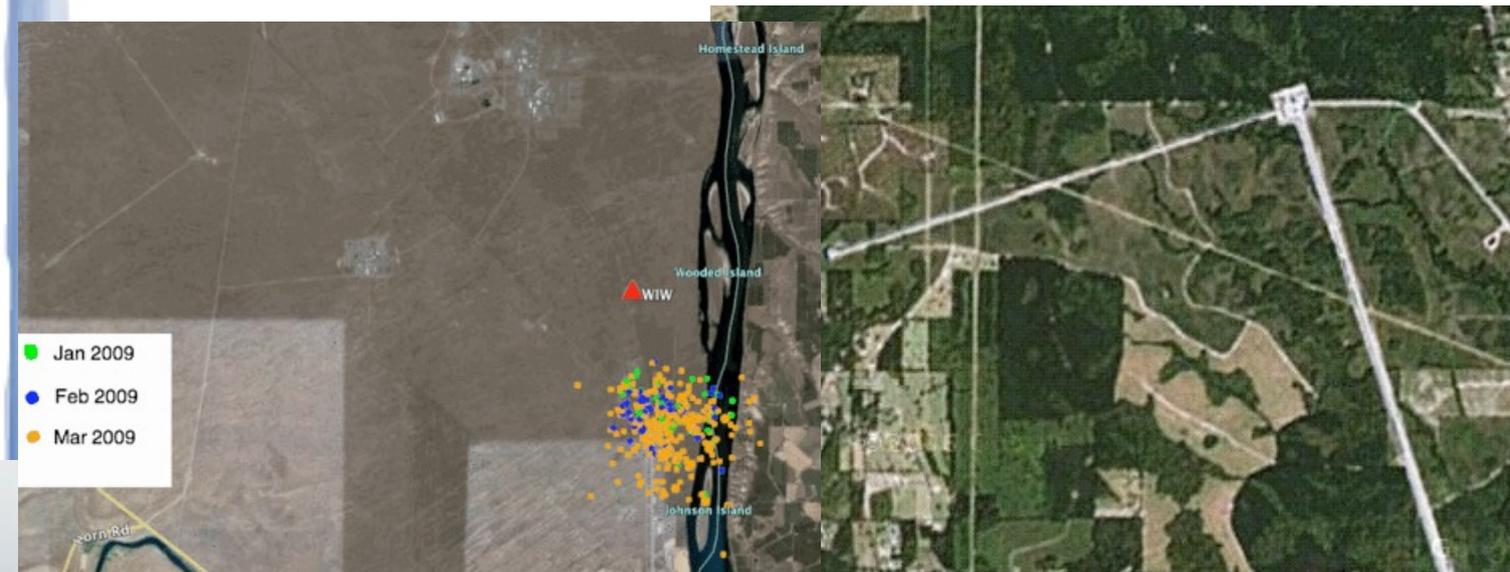
Sensibilité de l'expérience



Cela ne se fait pas tout seul



Expériences dans la vie réelle



2006 Google - Imagery ©2006 DigitalGlobe, TerraMetrics, Map data ©2006 NAVTE
Exemples de LIGO
@ Sam Waldman



Performances malgré tout ça

- Record de la plus longue durée de lock : 143 hrs (juillet 2009 – Virgo)
- Temps utile pour faire des recherches d'ondes gravitationnelles : 80 % / instrument → 50 % en triple coïncidence
- Si le système perd le contrôle et que le mouvement des miroirs est excité : 30 minutes pour revenir en mode scientifique
- Longueurs:
 - Meilleur contrôle : $8 \cdot 10^{-16}$ m
 - Au moins un facteur 100 sous la valeur de référence
- Suspension des miroirs avec de la silice (verre) sans aucun problème sur plus d'un an

Réseau mondial : quelques chiffres

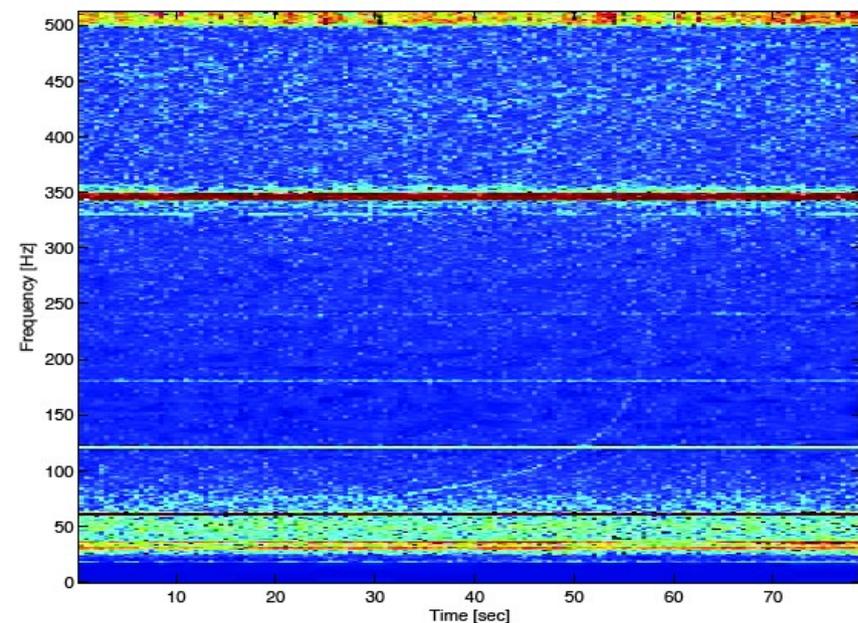
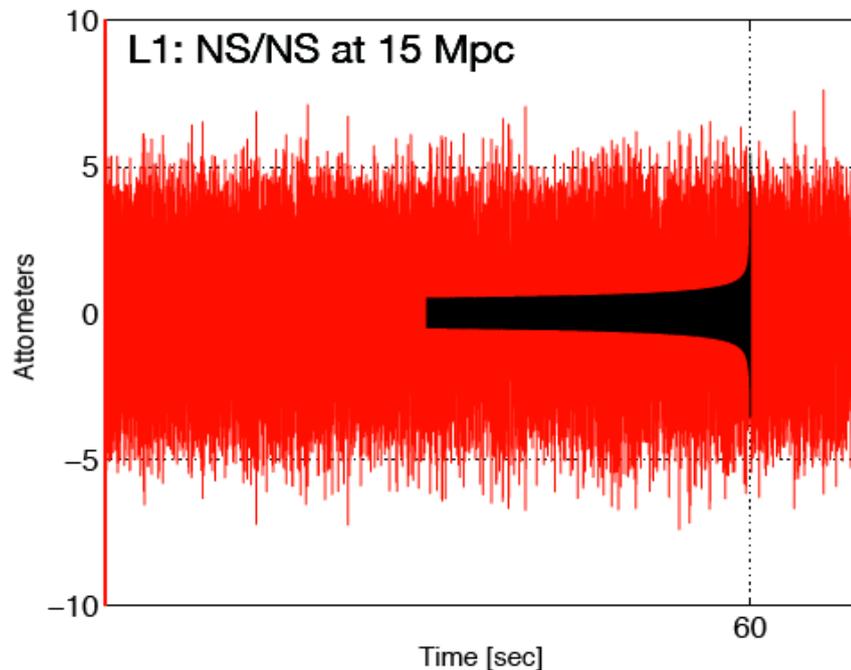
- Nombre de collaborateurs : 190 Virgo / 690 LIGO
- Prix d'un miroir : 400 000 euros
- Prix d'un laser : 2 millions euros pour un laser de 200 W
- Prix d'une suspension : 500 000 euros
- Prix total pour Advanced Virgo : 22 millions euros (rien en infrastructure)
- Coût fonctionnement : 10 millions par an/site (coût lié au site , R&D, ...)
- 1 seul signal contenant l'information OG mais plus de 1000 canaux pour le comprendre
- Espace disque : 410 000 Go / site / an

Analyse des données

- Tenir compte de la nature des objets astrophysiques recherchés
- Différents types d'analyse selon le type de signal
- Savoir reconnaître un problème du/des détecteurs par rapport à un vrai événement
 - taux d'événements en sortie d'analyse ($\sim 10/s$)
 - taux attendu d'OG : au mieux 1 sur trois ans de données (pour la première génération)
 - Rapport 1 / 100 000 000
- Reconstruire les caractéristiques de cet événement

D'autres difficultés

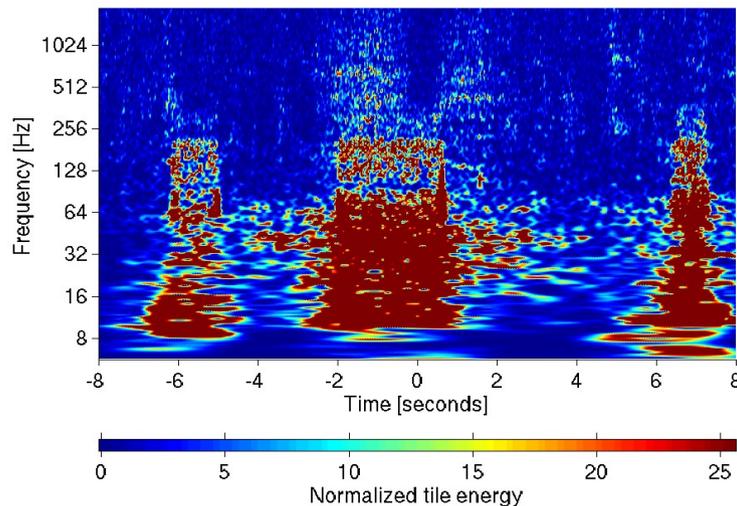
- Pas de déclenchement de l'expérience, ni de conditions expérimentales connues
- Rapport signal sur bruit et très faible comparé aux observatoires électromagnétiques



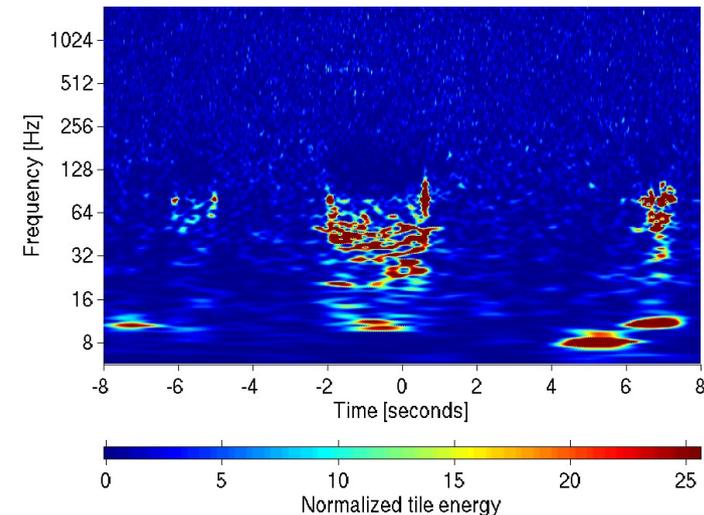
Nettoyer les données

- Un grand nombre d'événements peuvent être détectés au niveau de la frange noire : problème électronique, bruit acoustique sur les tables optiques, ...

Signal sur la frange noire



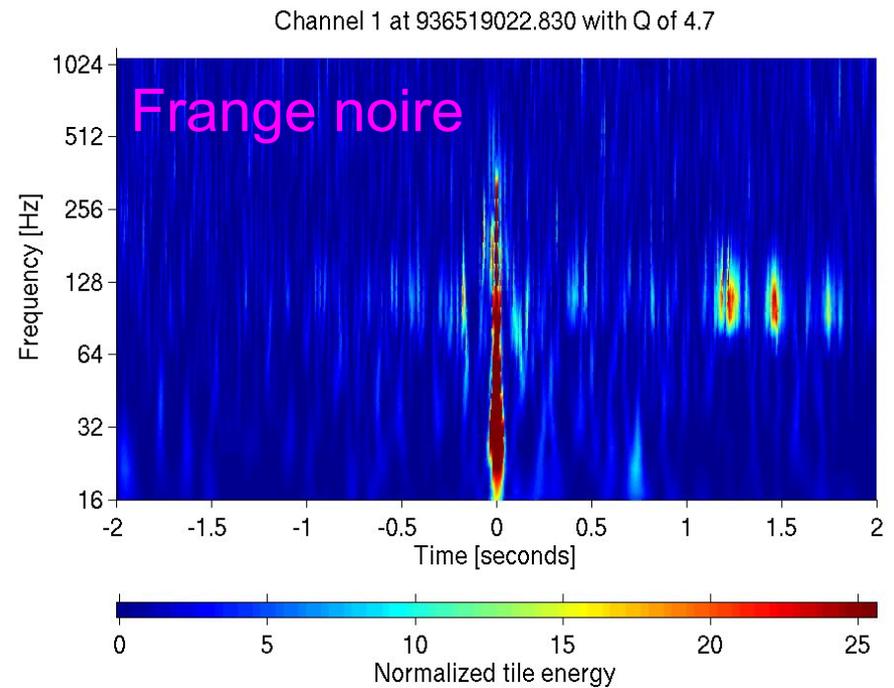
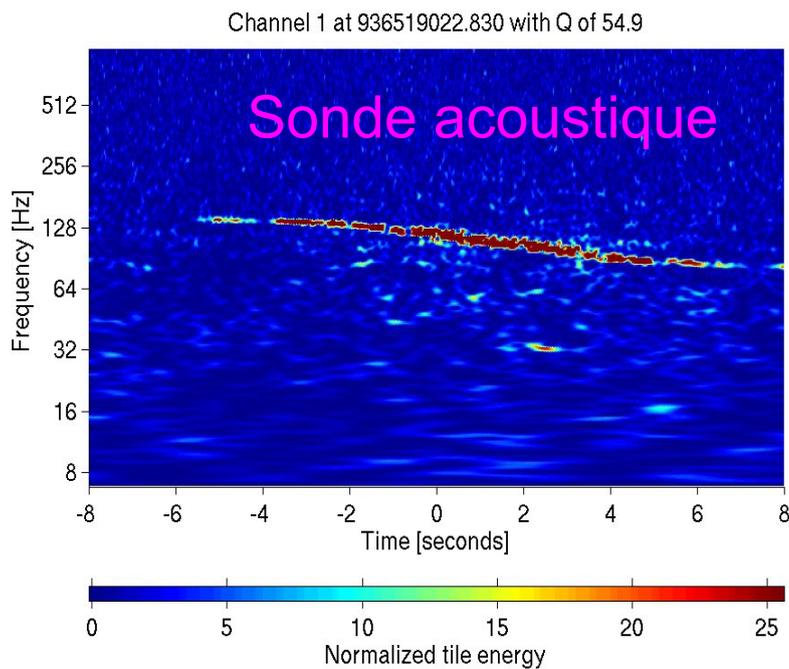
Courant envoyé sur une bobine



- Travail important sur la compréhension des bruits du détecteur

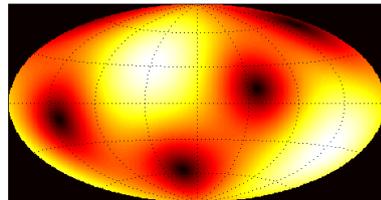
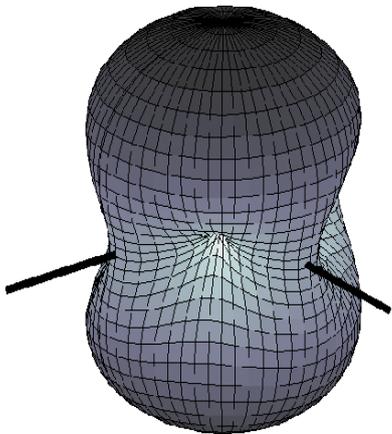
D'autres problèmes

- Système de climatisation – couplage magnétique avec les aimants
- Avions

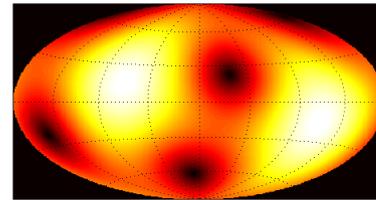


Analyse en réseau

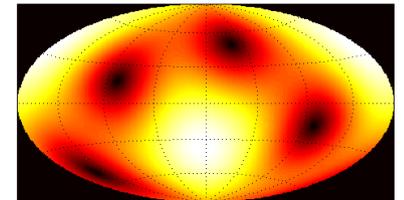
- Beaucoup d'avantages:
 - Meilleure discrimination des faux événements
 - Les ITFs ne sont pas directionnels mais n'ont pas la même couverture sur l'ensemble du ciel
 - 3 sites permet de reconstruire l'événement
 - Position de la source, précision $< 1^\circ$
 - Reconstruction de la forme d'onde



Hanford



Livingston

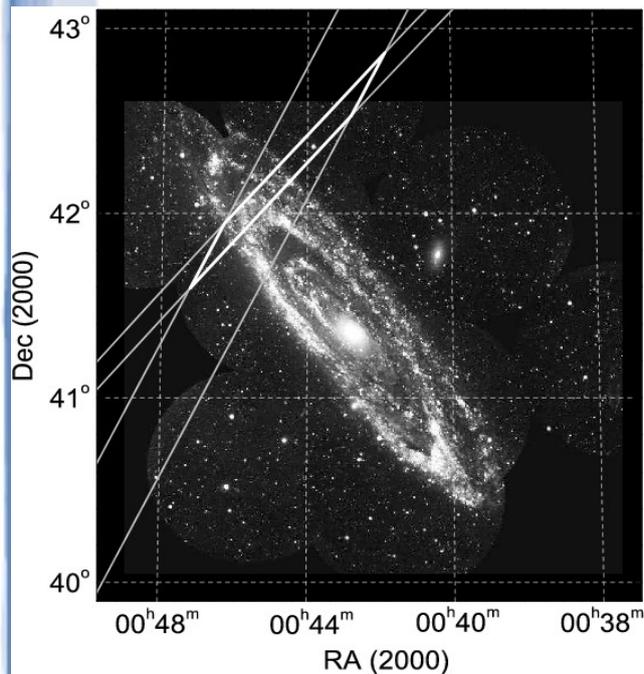


Virgo

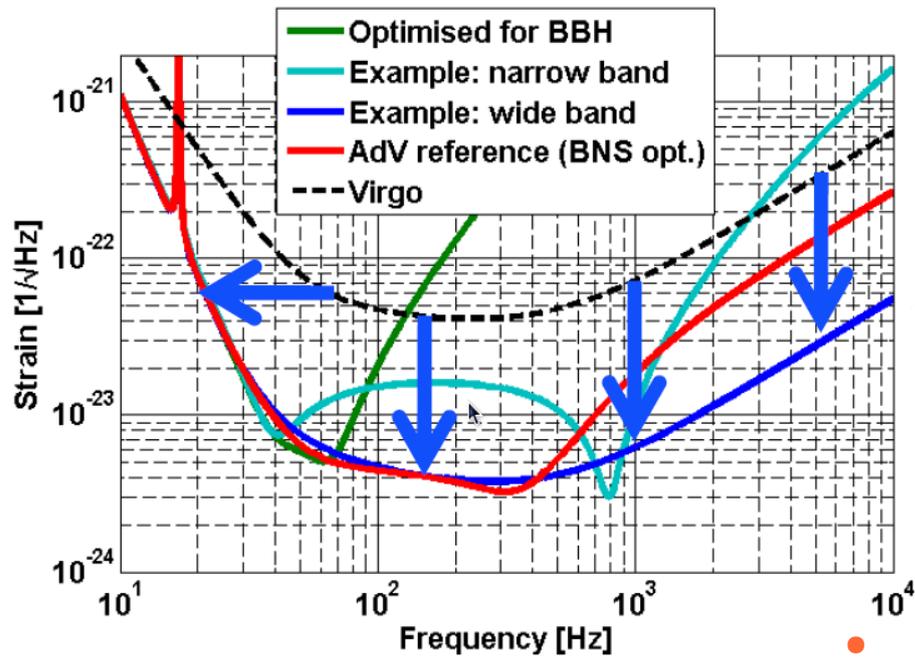
Premiers résultats scientifiques

- Toujours pas d'OG détectée
- Mais le domaine commence à sortir des résultats contraignant:

GRB 070201

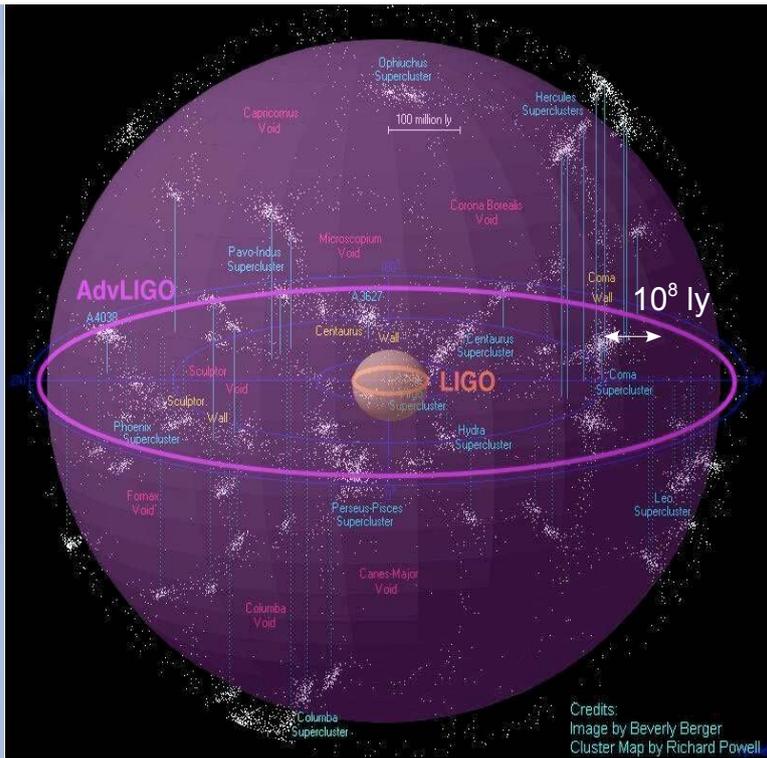


- Pulsars : le ralentissement ne peut pas être expliqué uniquement par les OG ($\epsilon < 10^{-8}$)
- Limites sur les sursauts gamma
- Premières contraintes sur les modèles cosmologiques



D'ici quelques années

- La prochaine génération de détecteurs est déjà en route:
 - Idée : gagner un facteur 10 par rapport à LIGO/Virgo -> gain 1000 volume
- Différents choix de configuration étudiés
- Distance probable pour coalescence :
 - ~150 Mpc NS/NS
 - ~900 Mpc BH/BH
- **Détection probable : plusieurs événements/an**
- **LIGO prêt dès 2015, Virgo un an plus tard**



Credit: R.Powell, B.Berger

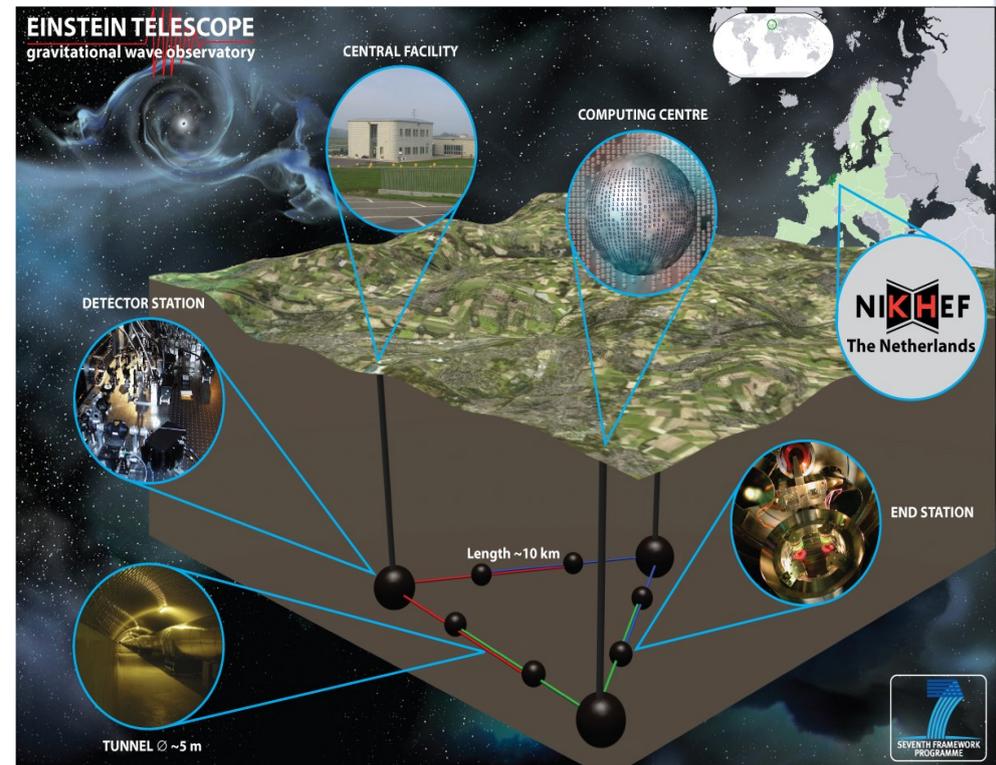
Si l'on regarde encore plus loin dans le temps

- La communauté commence à réfléchir à la génération suivante, projet le plus avancé : Einstein telescope – 2030 ?

Points forts :

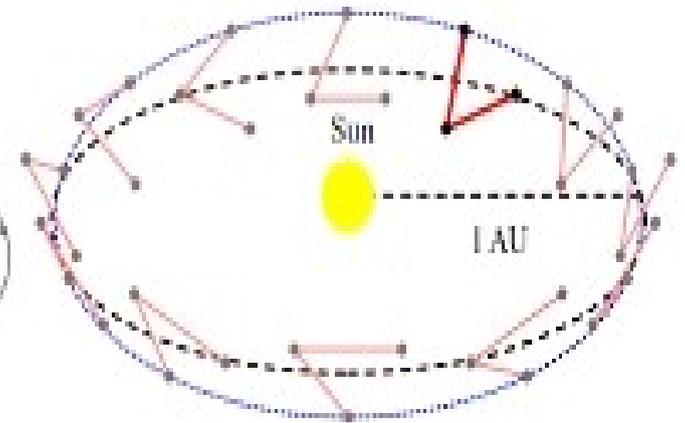
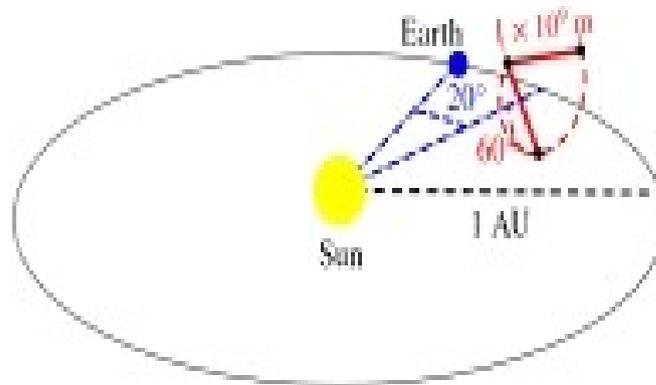
- Souterrain – moins de bruit sismique
- Cryogénique
- Bras de 10 km
- 3 instruments redondants
- Reconstruction de la position de la source

Gain d'un facteur 10 par rapport à la génération en cours de construction

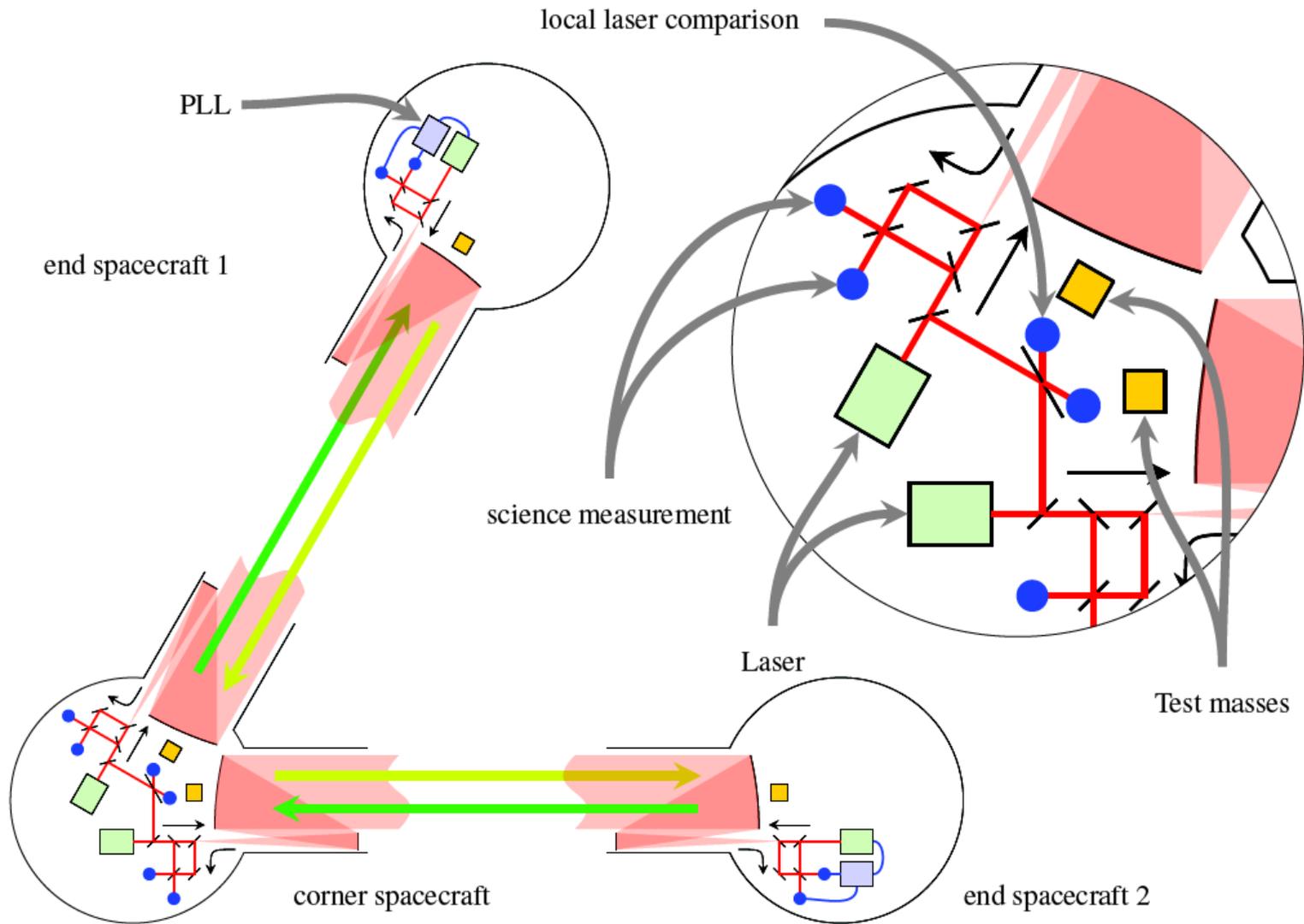


Changeons de taille ...

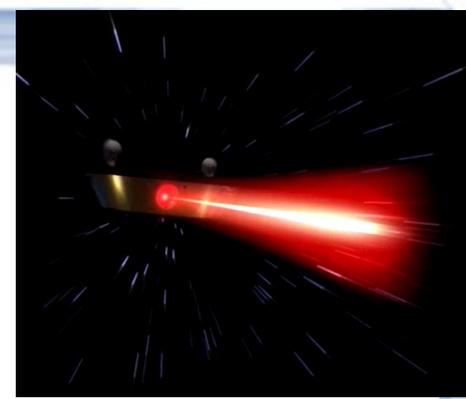
- Essayons-nous au spatial avec eLISA/NGO
- Objectif : observer les OG entre 10^{-4} et 0.1 Hz
 - Trous noirs supermassifs
 - Début de la coalescence des binaires galactiques
- Utiliser des bras de 1 **million** de km avec 3 satellites



Configuration optique



Le principe de base



- Avoir 1 interféromètre
- Toutefois vu les distances et les puissances des lasers (1W)
 - On utilise un système de masse de référence pour la mesure de distance
 - 1 satellite mère récolte la lumière des 2 autres et renvoie un faisceau en phase (comme un miroir)
- Chaque satellite se comportera comme un point suivant une géodésique
 - Le satellite compensera en permanence les mouvements du satellite (vent solaire, perturbations, ...) pour que la masse de référence soit toujours en chute libre

Les « quelques » problèmes à résoudre

- Il faudra être capable de reconstruire avec précision la géométrie du système en permanence
- Chaque satellite va recevoir 10^{-12} W
 - Caractériser entièrement les faisceaux
 - Faire la mesure d'interférométrie
- S'assurer que l'on garde une masse de référence en chute libre
- eLISA sera limitée par des bruits instrumentaux mais aussi (et essentiellement) par des signaux provenant de sources non résolues
- Trouver et sécuriser son financement ...

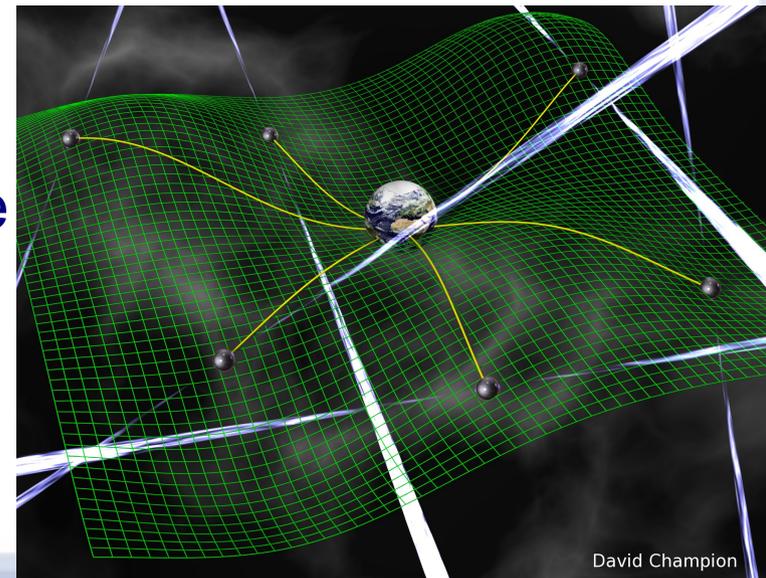
Une première étape

- LISA Pathfinder – décollage prévu en 2015
- Tester une partie des technologies nécessaires pour eLISA
 - Est-on capable d'avoir une masse en chute libre dans l'espace ?
 - Comment va se comporter sur le long terme l'ensemble mécanique + optique ?
 - Quelle précision peut-on avoir sur la position d'un satellite ?
- Idée : réduire un bras de 1 million km à 10 cm
- Passage important pour s'assurer la réussite de eLISA

Encore plus loin : plusieurs (milliers) d'années lumière

- Un laser est à la fois une longueur et une horloge très stable
- Il existe dans notre galaxie (et d'autres) des « horloges » quasi parfaites : les pulsars (émission de pulses)
- Si l'on peut suivre le temps d'arrivée des pulses on pourrait être à même de détecter une variation de l'espace-temps
- Sources observables : les coalescences de trous noir super massifs (ie comme celui du centre de notre galaxie)
- Nécessaire d'avoir une petite dizaine de pulsars avec une bonne chronométrie

Une détection d'ici 2020 ?



Challenges de la recherche des OG

La recherche des OG nous oblige à travailler à la croisée d'un grand nombre de domaines

Relativité générale

- objets relativistes et compacts
- gravitation en champ intense

Détecteurs

- distance kilométrique au sol
- vol en formation dans l'espace
- très haute précision de mesure nécessaire
- limites technologiques
- analyse des données non triviale : beaucoup de non stationnarités, espace des paramètres de recherche important



Cosmologie

- avec la prochaine génération, accès à de grandes distances et estimation de paramètres pour les modèles
- accès aux tous premiers instants après le big bang ?

Astrophysique

- première détection de trous noirs ?
- impact important dans différents domaines : matière des étoiles à neutrons, origines des sursauts gamma
- accès à des régions uniques des objets compacts

Merci de votre attention !