

A la recherche des ondes gravitationnelles avec Virgo et LIGO

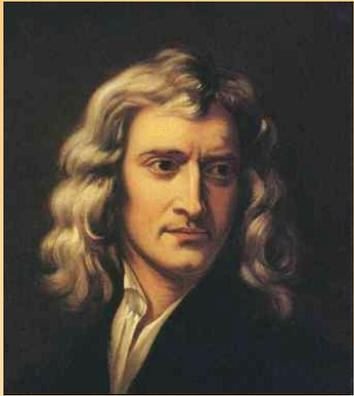


Loïc Rolland

- Les ondes gravitationnelles et leurs sources
- Principe du détecteur, étalonnage et sensibilité
- Résultats astrophysiques
- Vers les premières détections...



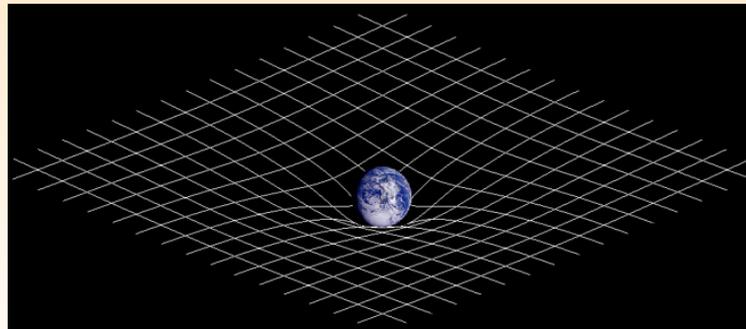
Contexte théorique : la Relativité Générale



Théorie de Newton (1686) :
l'interaction gravitationnelle
a un effet instantané



**Théorie de la Relativité
Générale (Einstein 1915) :**
l'interaction gravitationnelle
se transmet à la vitesse de la
lumière



Les masses courbent
l'espace-temps

Les ondes gravitationnelles (OG)

Origine des OG

Masses en mouvement

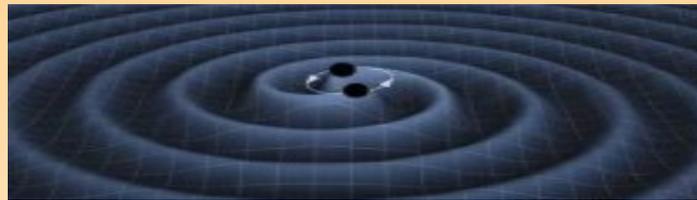


Déformation de l'espace-temps

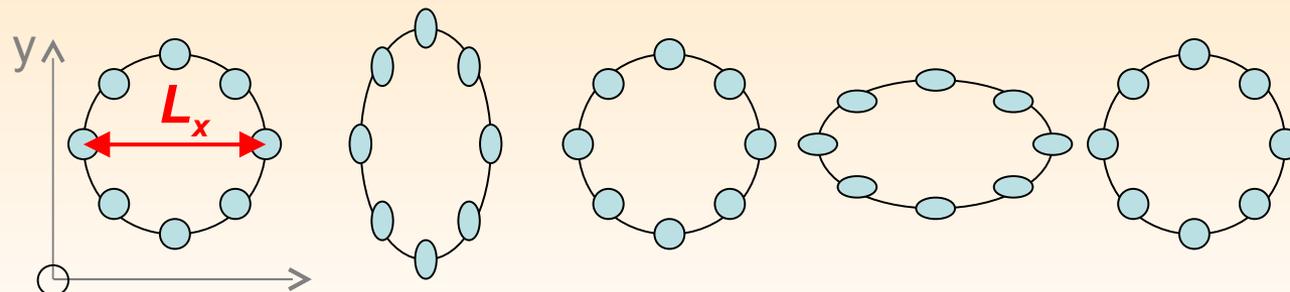
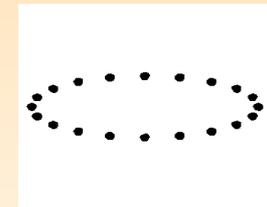
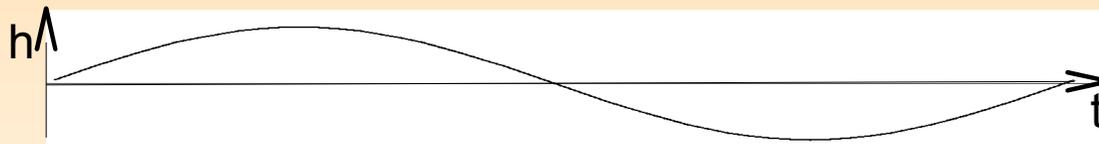


Onde gravitationnelle

- onde plane transverse
- propagation à la vitesse de la lumière
- deux états de polarisation (+ et x)



Effet mesurable sur des masses en chute libre



$$\Delta L_x(t) = 2 h(t) L_x$$

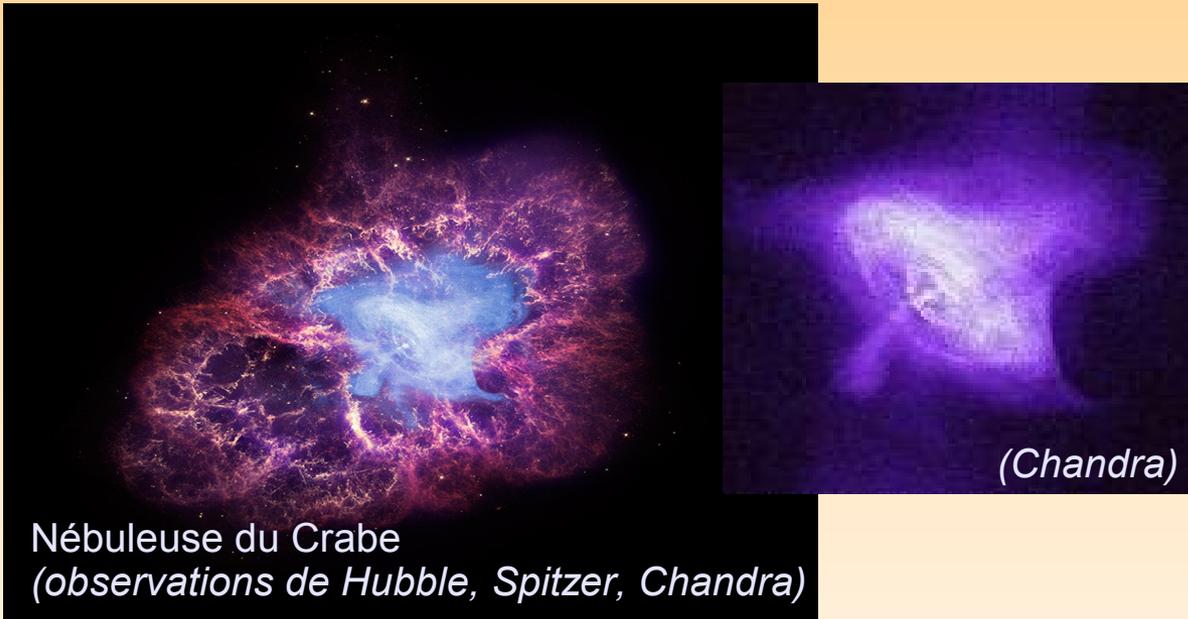
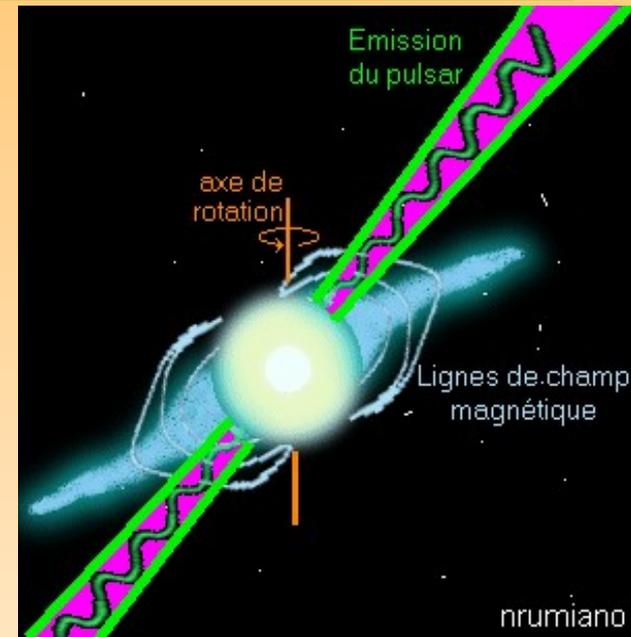
$h(t)$: amplitude de l'OG

Illustration de la variation de la métrique avec des masses libres réparties sur un cercle, pour une OG polarisée + se propageant selon z

Étoiles à neutrons en rotation

Étoiles à neutrons

- rayon : ~ 10 km
- période de rotation : ~ 1 ms à 1 s
- Voie Lactée : 10^9 attendues (1000 pulsars connus)



Nébuleuse du Crabe
(observations de Hubble, Spitzer, Chandra)

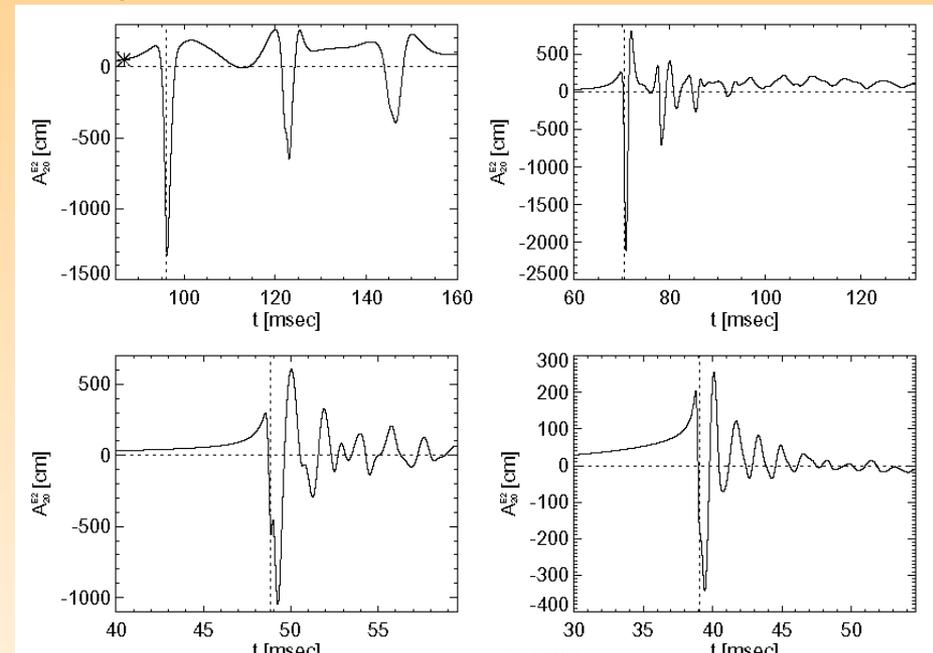
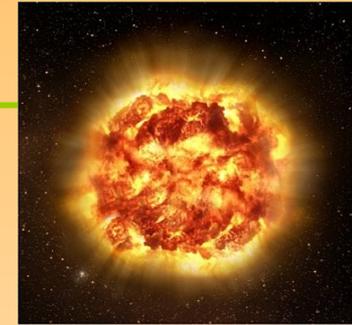
Émission d'OG

- due à la non-sphéricité de l'étoile
- signal périodique
- amplitude faible mais intégrable sur de longues durées

Explosions d'étoiles (« bursts »)

Supernova

- effondrement d'une étoile
- taux attendus : $\sim 1/\text{siècle}$ dans la Voie Lactée
 $\sim 10/\text{an}$ dans l'amas de la Vierge



Zwinger & Müller,
Astron. Astrophys. 320, 209{227 (1997)

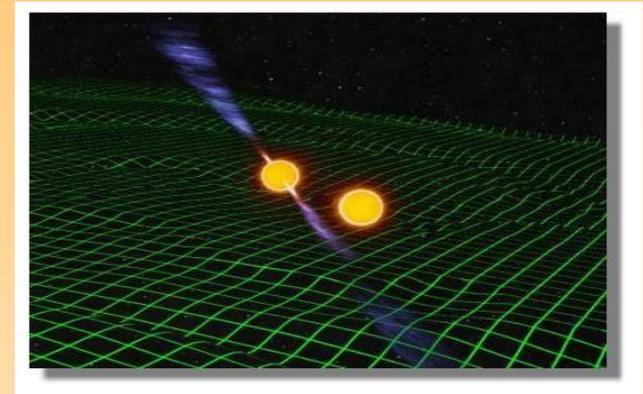
Émission d'OG

- due à la non-sphéricité de l'explosion
- onde émise pendant ~ 1 ms, fréquences ~ 1 kHz
- forme et amplitude difficiles à prédire

Coalescence de binaires compactes (CBC)

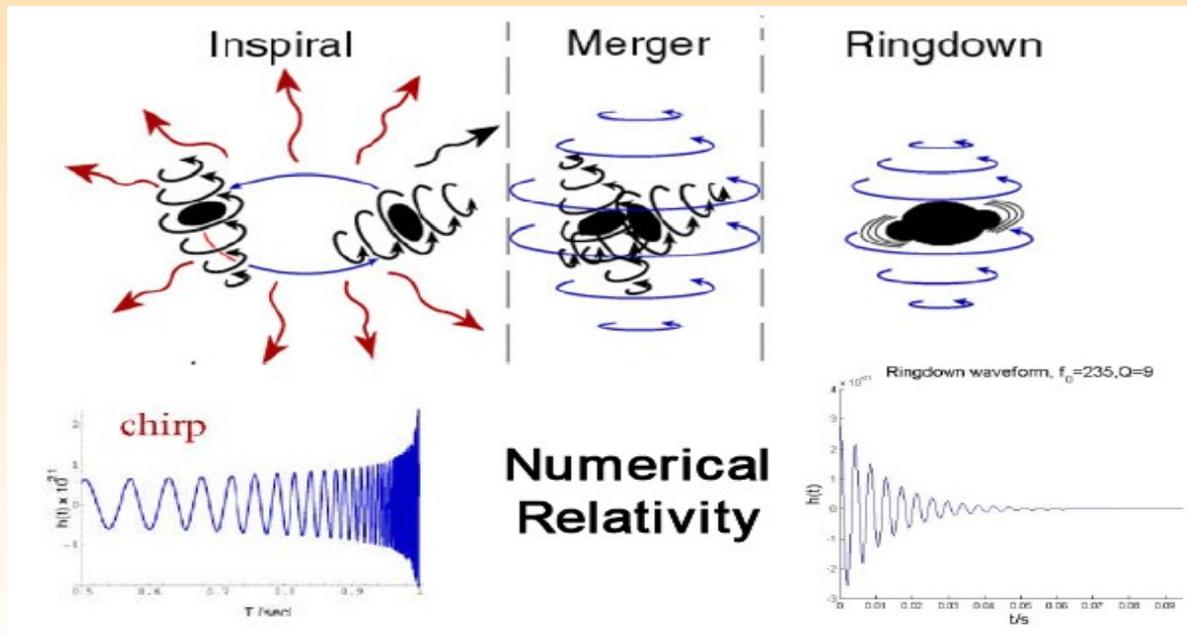
Objets binaires compacts

- systèmes de deux étoiles à neutrons et/ou trous noirs
- fin de vie : coalescence des deux objets
- taux attendus : 10 à 200/an dans rayon de 300 Mpc



Émission d'OG

- onde émise pendant quelques secondes, fréquences < 1 kHz
- forme et amplitude prédictibles ($h \sim 10^{-22}$ à 10 Mpc)



1 pc = 3,3 années-lumière
1 pc ~ dist. interstellaires
10 kpc ~ taille de la Voie Lactée
1 Mpc ~ dist. intergalactiques

NS-BH Chirp

NS-BH Chirp + noise

Détection indirecte d'OG : PSR 1913+16

Système binaire PSR 1913+16 :

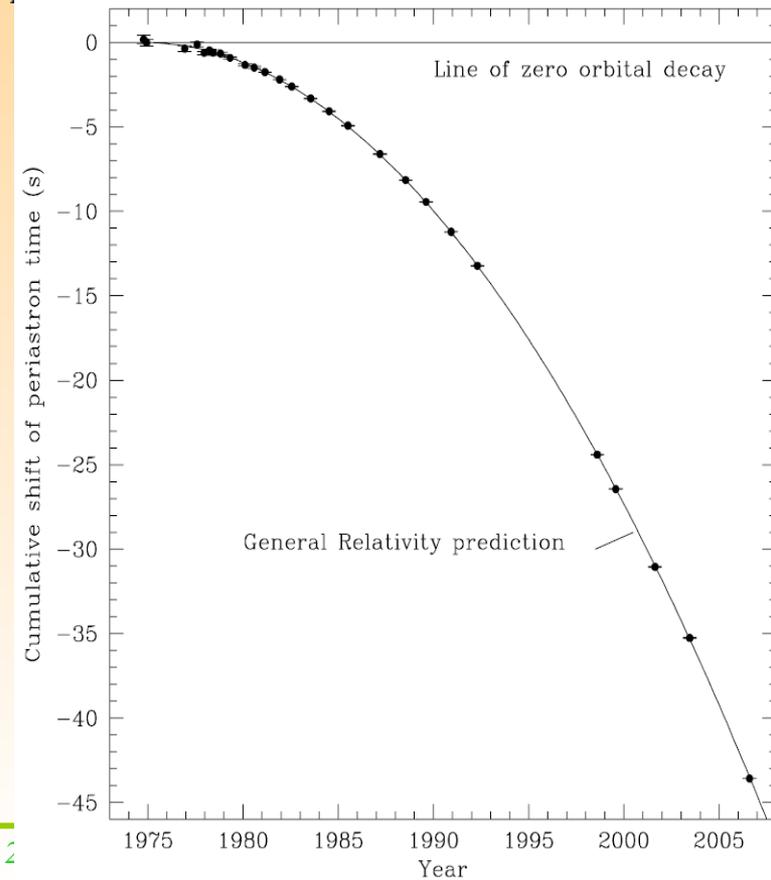
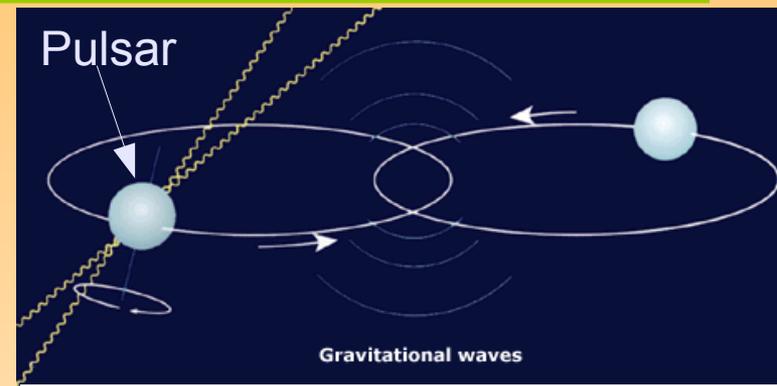
- découvert en 1974 par Hulse et Taylor (prix Nobel en 1993)

Mesure des caractéristiques orbitales :

- masses $\sim 1,44 M_{\odot}$ et $1,39 M_{\odot}$
- période ~ 8 heures

Décroissance de la période T en fonction du temps

→ accord à 0,2% près avec la Relativité Générale



J.M. Weisberg, D.J. Nice and J.H Taylor
The Astrophysical Journal, Volume 722, Issue 2, pp. 1030-1034 (2010)

Pourquoi détecter directement les OG ?

Étude des OG

- propriétés des OG
- test de la Relativité Générale en champ fort

Nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers

- observation de régions denses inaccessibles aux autres messagers
- coïncidence avec les autres messagers
- observation de la formation/collision de trous noirs
- observation de sursauts gamma (GRB)
- mesure de la constante de Hubble (avec les systèmes binaires)
- découvertes inattendues...

La détection des ondes gravitationnelles

Étalonnage et sensibilité des interféromètres

Comment détecter directement les OG ?

Méthodes résonnantes

mesure de la déformation subie par un corps rigide

Barres

Weber (1968), EXPLORER, ALLEGRO, NIOBE, NAUTILUS, AURIGA



Sphères

TIGA, MiniGrail, Schenberg

- $h \sim 10^{-22}$
- bande-passante limitée à quelques Hz autour de $f_{\text{résonance}} (\sim 1 \text{ kHz})$

Techniques interférométriques

mesure du déphasage relatif subi par un laser le long de directions différentes

Premiers prototypes dans les années 1970
Actuellement : GEO, LIGO, Virgo, TAMA

- $h \sim 10^{-23}$
- large bande-passante : 10 Hz – 10 kHz



Projets (2020...)

- terrestre: Einstein Telescope
~1 Hz – 10 kHz
- spatial : LISA
~ 0.03 mHz – 0.1 Hz



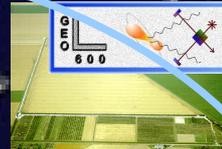
Les interféromètres dans le monde




LIGO Hanford, 4 et 2 km :
2 ITF sur le même site

LIGO Livingston, 4 km





GEO, Hannover, 600 m

Virgo, Cascina, 3 km

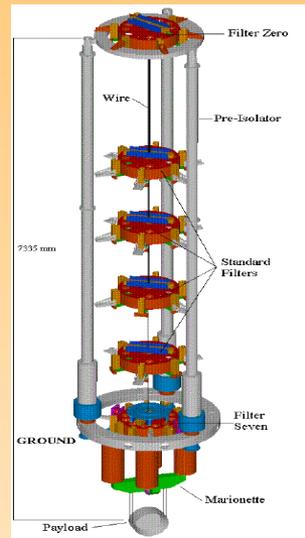




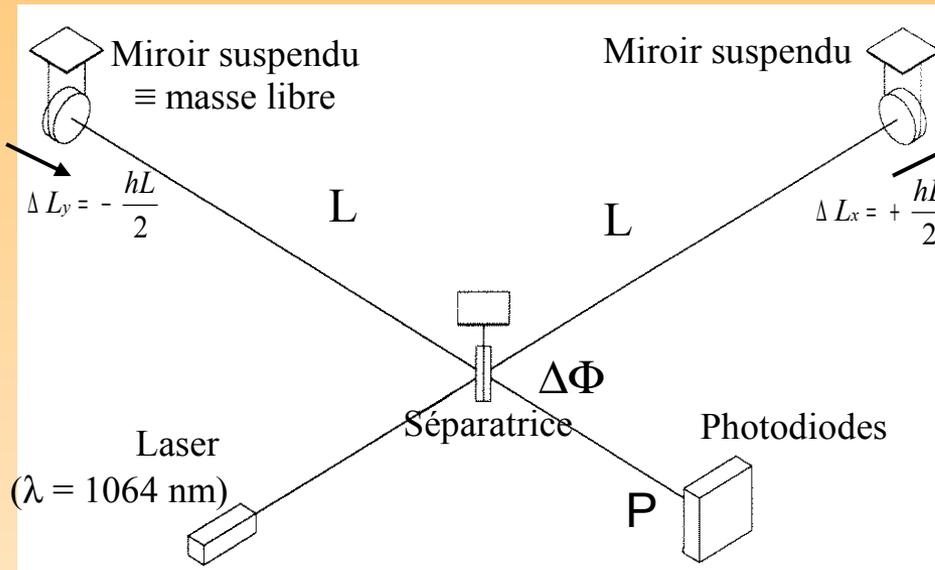
TAMA, Tokyo, 300 m

Mise en commun des
données scientifiques depuis
mai 2007

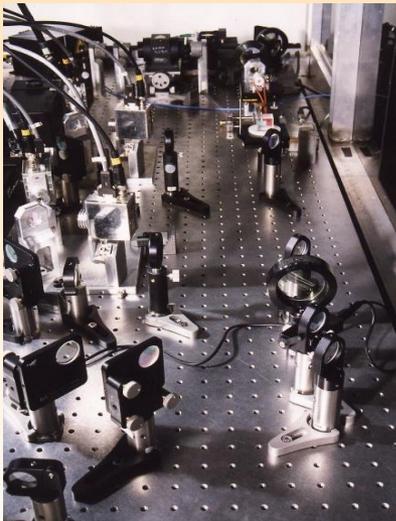
Détection d'OG par interférométrie



Suspension



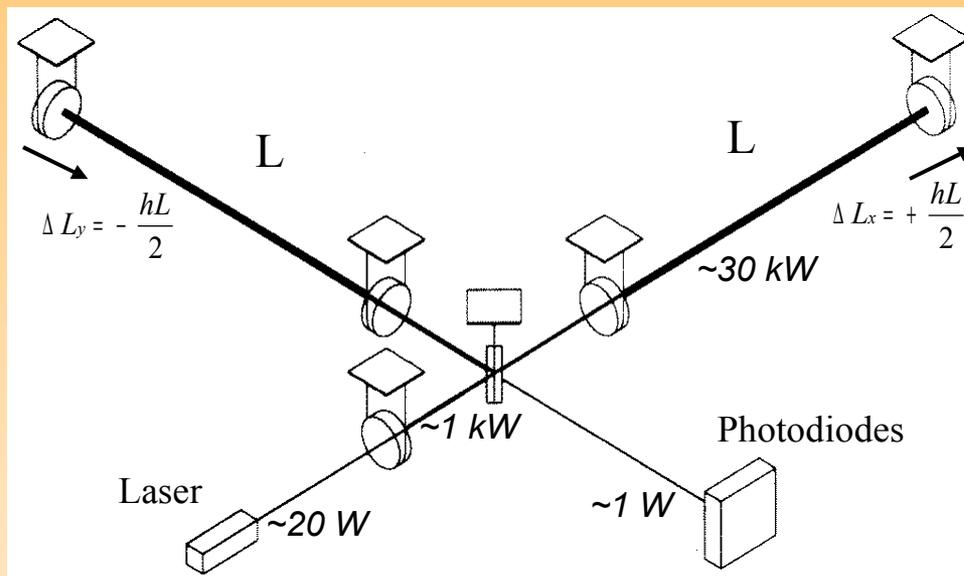
$$\begin{aligned}
 & \text{OG } h(t) \\
 & \downarrow \\
 h(t) &= \frac{\Delta L(t)}{L} \\
 & \downarrow \\
 \Delta\Phi(t) &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L(t) \\
 & \downarrow \\
 P(t) &= \frac{P_{in}}{2} (1 - \cos(\Delta\Phi(t)))
 \end{aligned}$$



Détection de la puissance

- Pour améliorer la sensibilité :
- augmenter la taille de bras
 - augmenter la puissance du laser

Vers un interféromètre plus compliqué...



Cavités Fabry-Perot

- augmenter la longueur effective des bras d'un facteur 32 ($F \sim 50$)

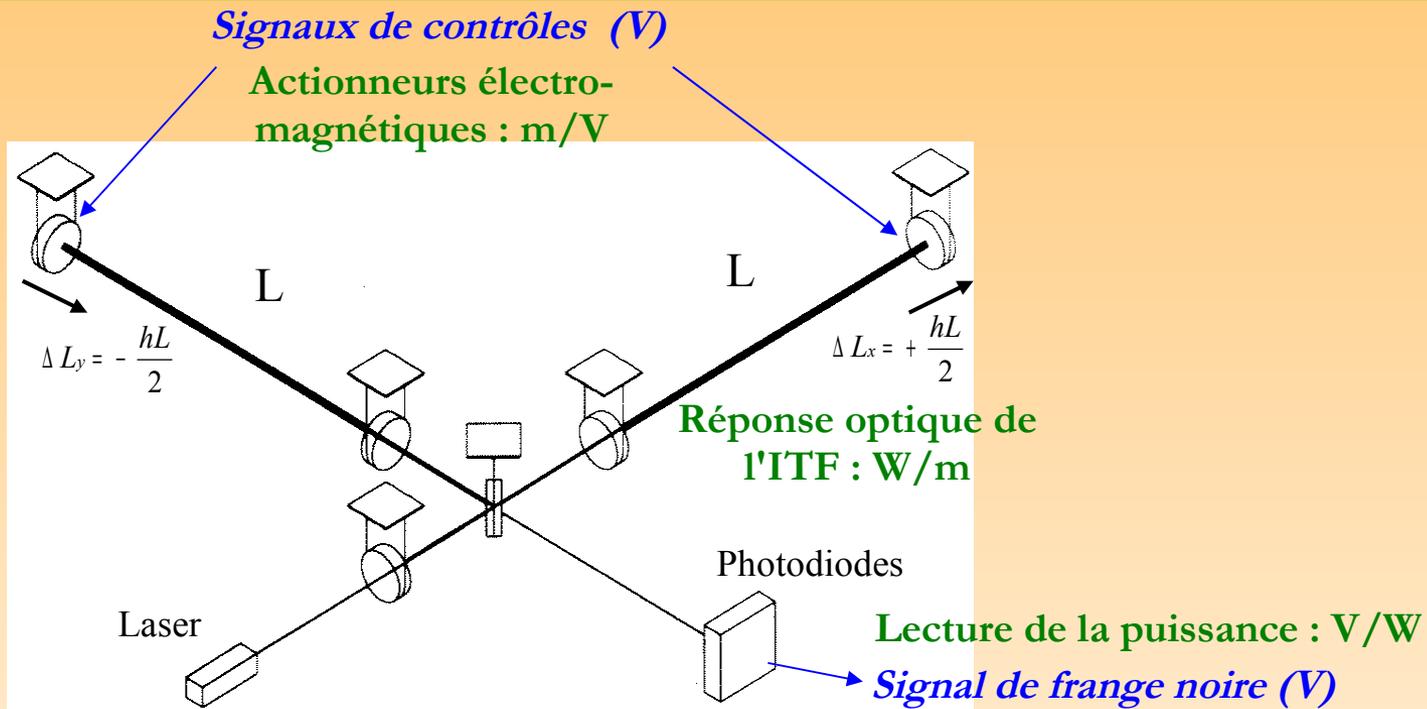
Cavité de recyclage

- gain en puissance ~ 50

Les bruits fondamentaux qui limitent la mesure de $h(t)$:

- bruit sismique
- bruit thermique
- bruit de photon

Asservissement longitudinal du détecteur



Reconstruction du signal d'OG

$$\Delta L = \Delta L_{\text{bruit}} + \Delta L_{\text{contrôles}} + \Delta L_{\text{OG}} + \Delta L_{\text{exc}}$$

Soustraction des contrôles

$$\Delta L_{\text{rec}} = \Delta L_{\text{bruit}} + \Delta L_{\text{OG}} + \Delta L_{\text{exc}}$$

arXiv:1009.5190v1

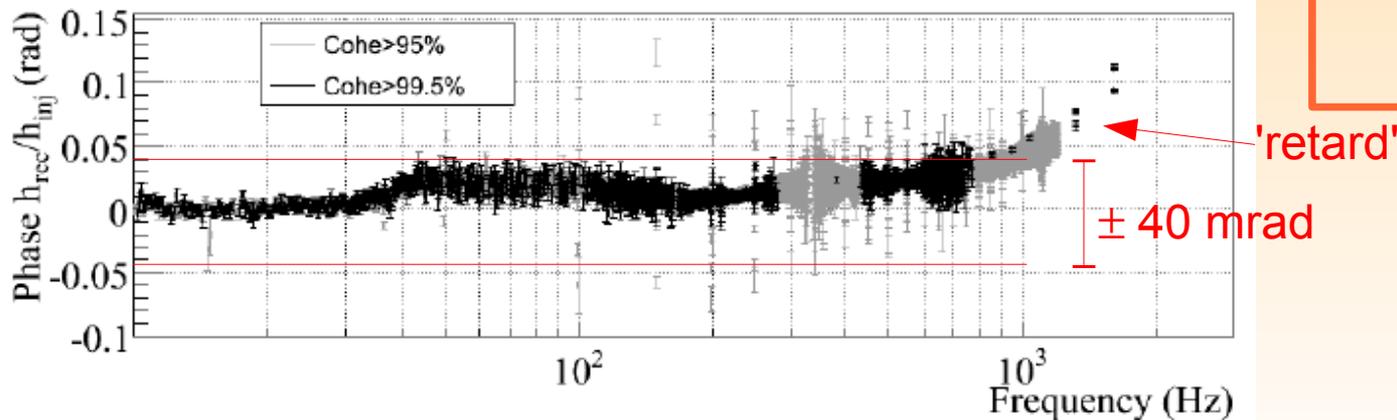
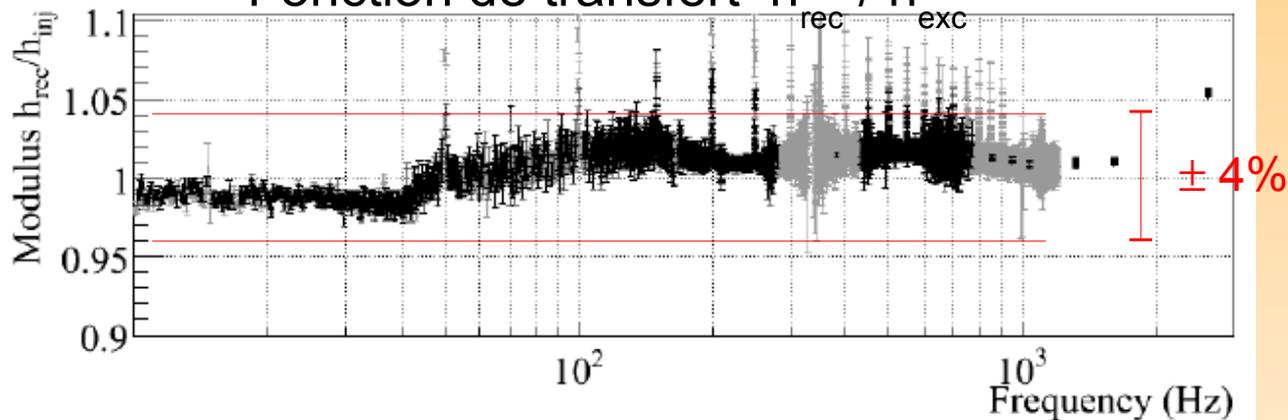
Estimation des erreurs de $h(t)$: h_{rec} vs h_{exc}

- Excitation d'un miroir d'amplitude connue

$$h = h_{bruit} + h_{exc} \sim h_{exc}$$

- Comparaison du $h(t)$ reconstruit avec le déplacement induit h_{exc}

Fonction de transfert h_{rec} / h_{exc}



→ Erreurs de $h(t)$

Amplitude

➤ 5.5%

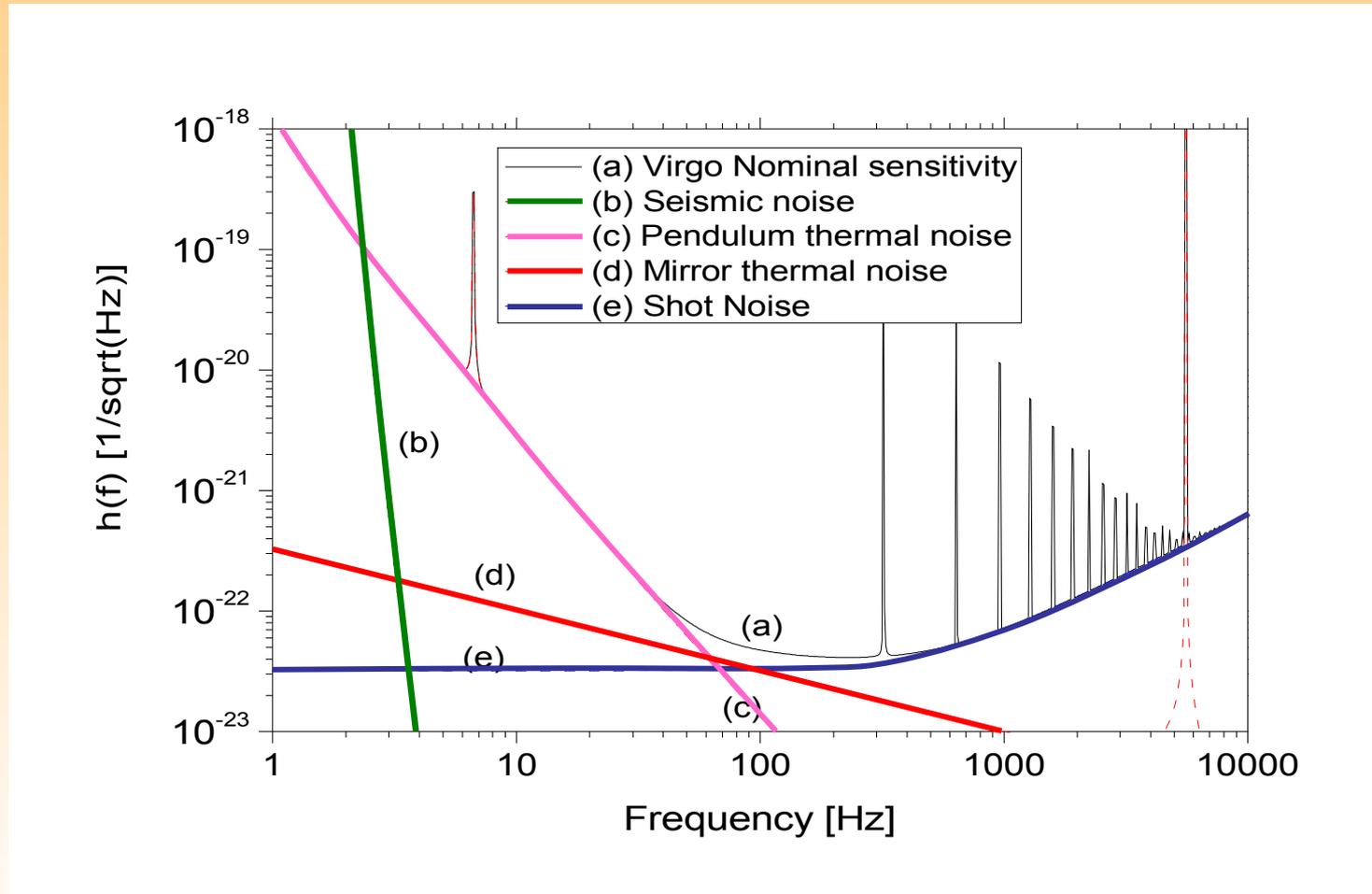
Phase

➤ $f < 1\text{kHz}$: 50 mrad

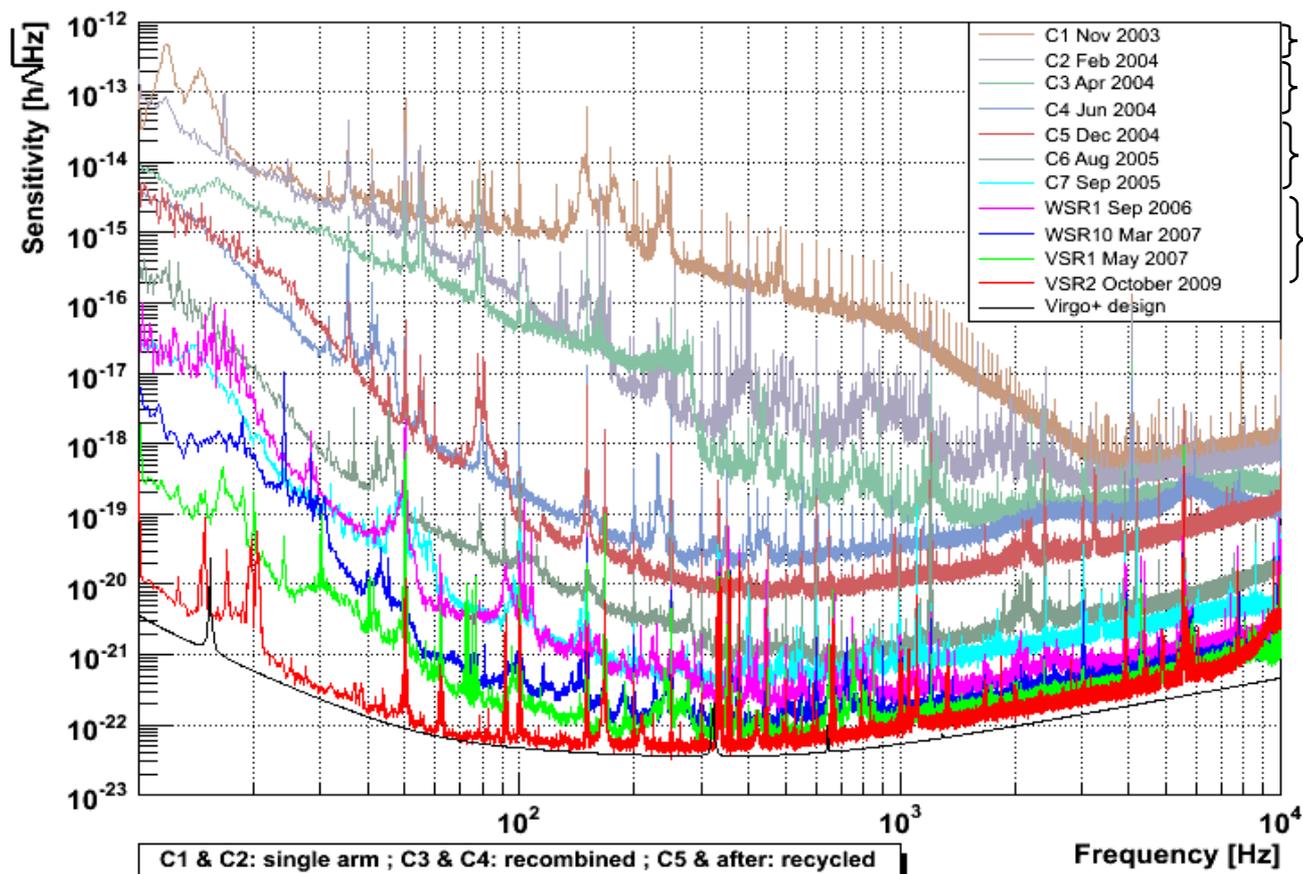
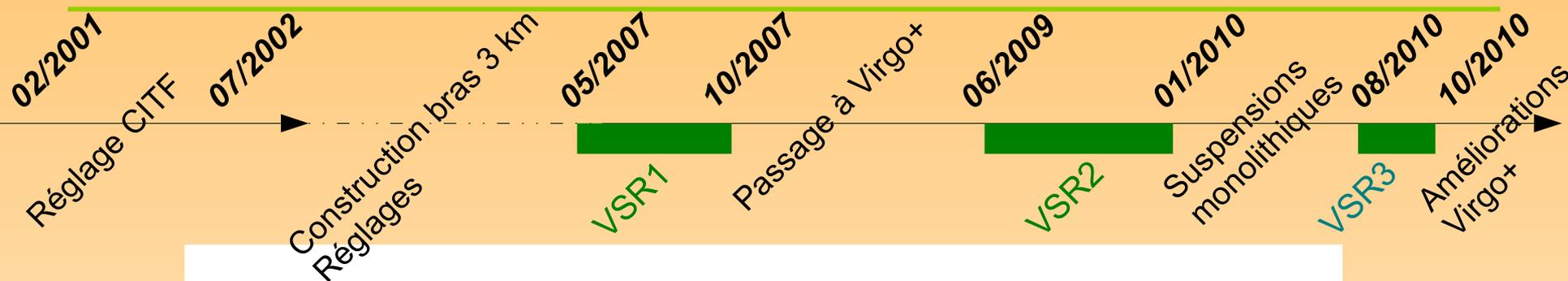
➤ $f > 1\text{kHz}$: 8 μs

Sensibilité et bruits fondamentaux

Sensibilité $h(f)$: amplitude minimale d'une OG pour être détectable



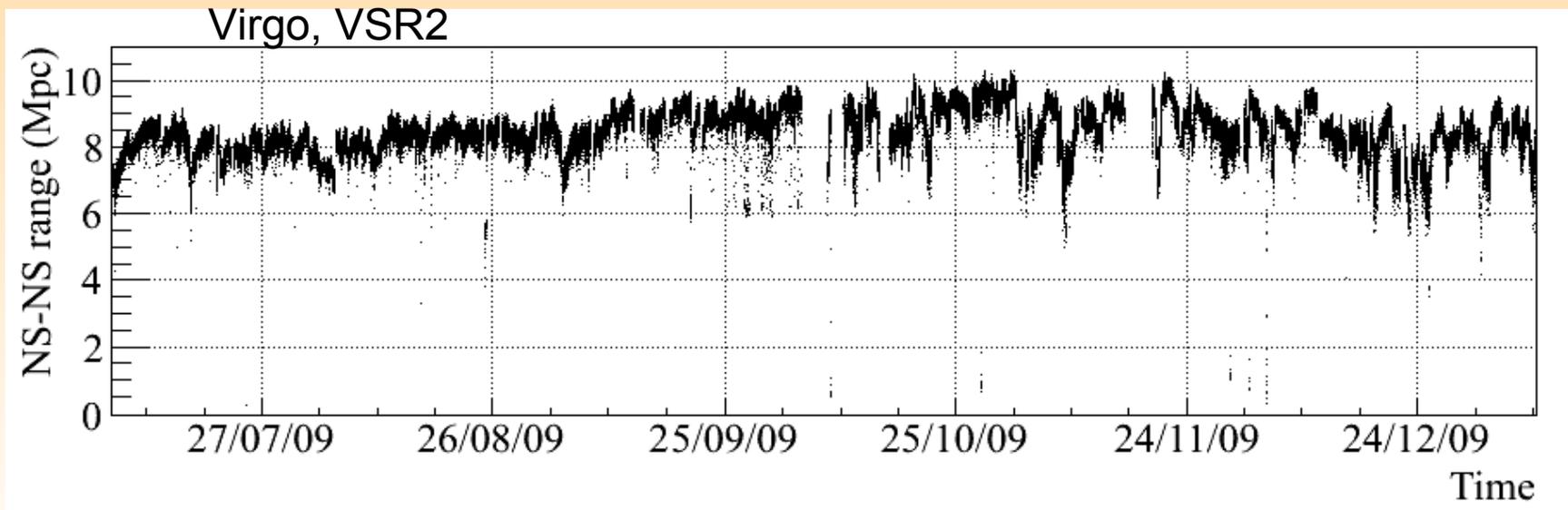
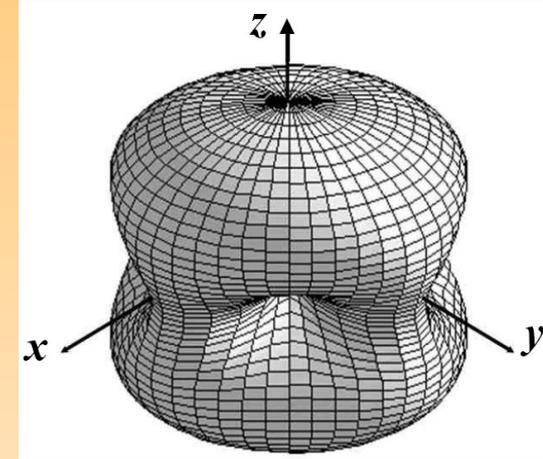
La sensibilité de Virgo



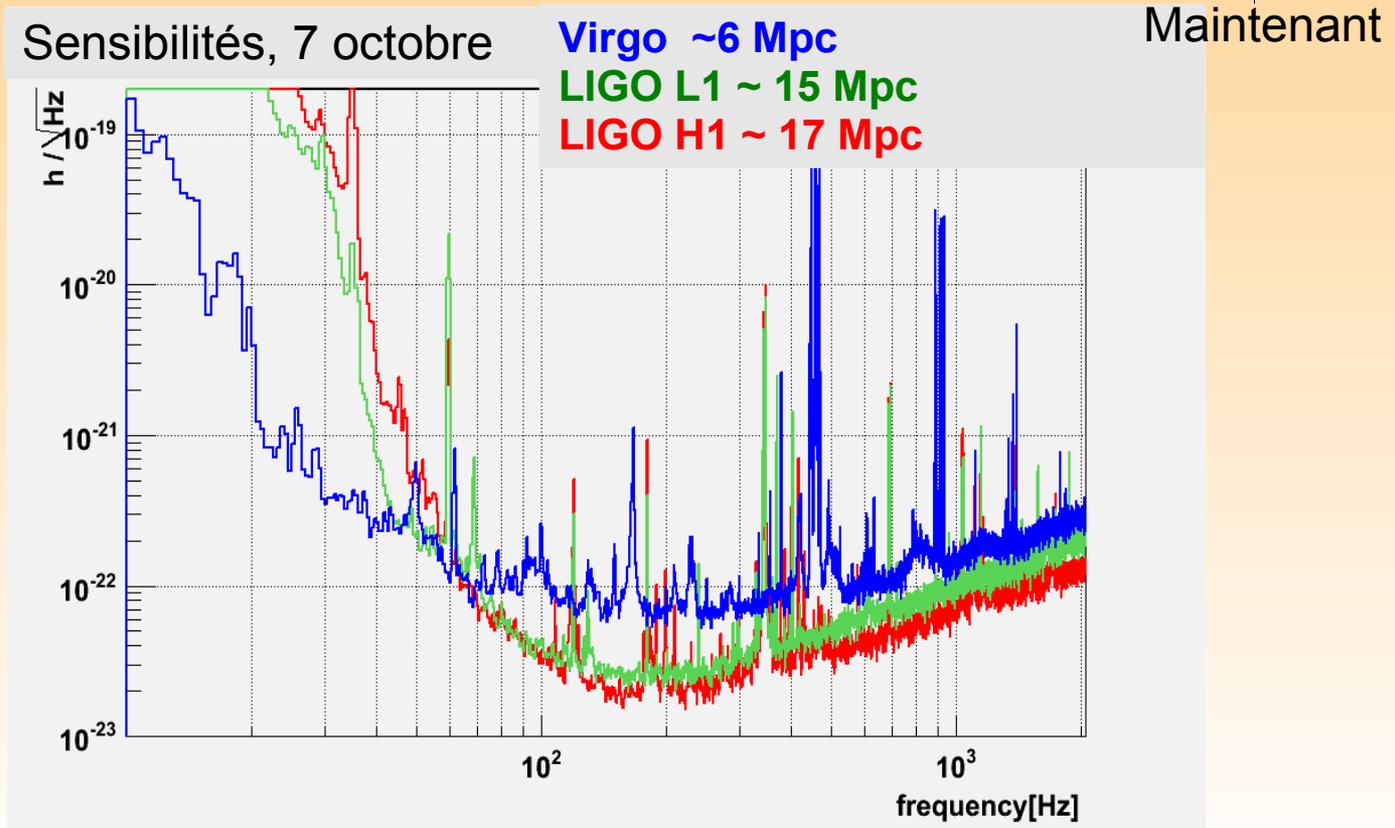
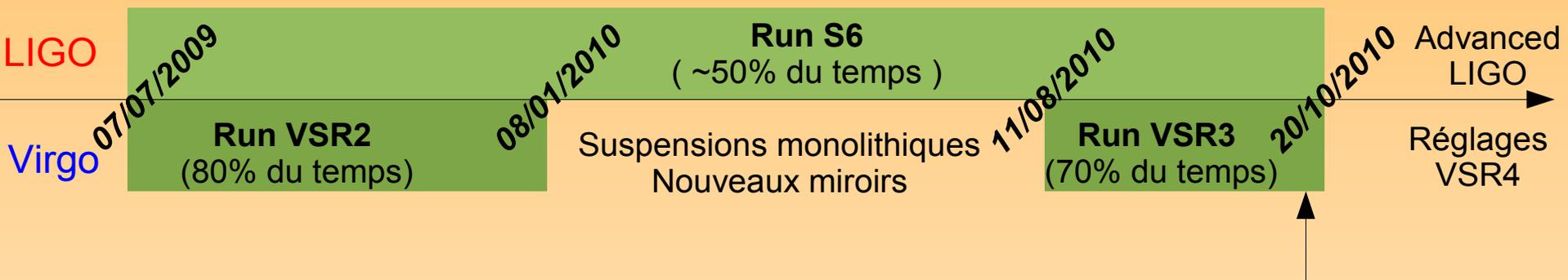
1 cavité FP
 2 FP+ Michelson
 Virgo, P=0.7 W
 Virgo, P=8 W

L' « horizon »

→ distance à laquelle une coalescence de deux étoiles à neutrons serait vue avec un rapport signal/bruit de 8, moyennée sur l'orientation et la direction de la source

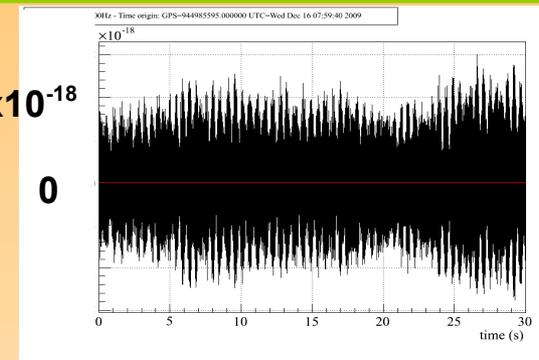
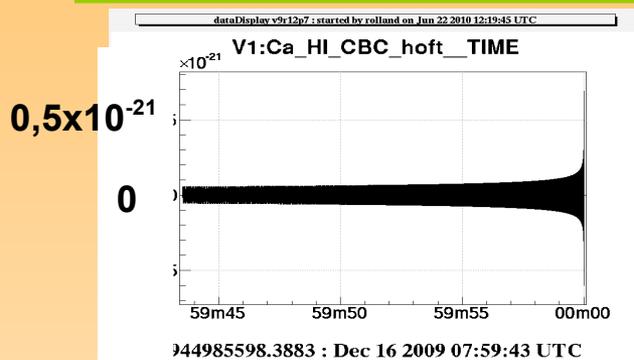


Etat actuel des détecteurs



Prises de données scientifiques : des résultats astrophysiques

Recherche de coalescences de binaires



Filtrage adapté

corrélation des données $h(t)$ avec une grille de patrons d'onde

Liste d'événements par détecteur

Élimination de faux événements

- vétos (qualité des données)
- coïncidences entre détecteurs

Étude détaillée de candidats

- état des détecteurs

- concordance signal mesuré/signal recherché

Limites

Recherches « en aveugle » dans tout le ciel

- recherche dans toutes les directions et dans toutes les données
- risque de coïncidences fortuites élevé

LIGO : S5

Virgo : VSR1

4 nov. 2005

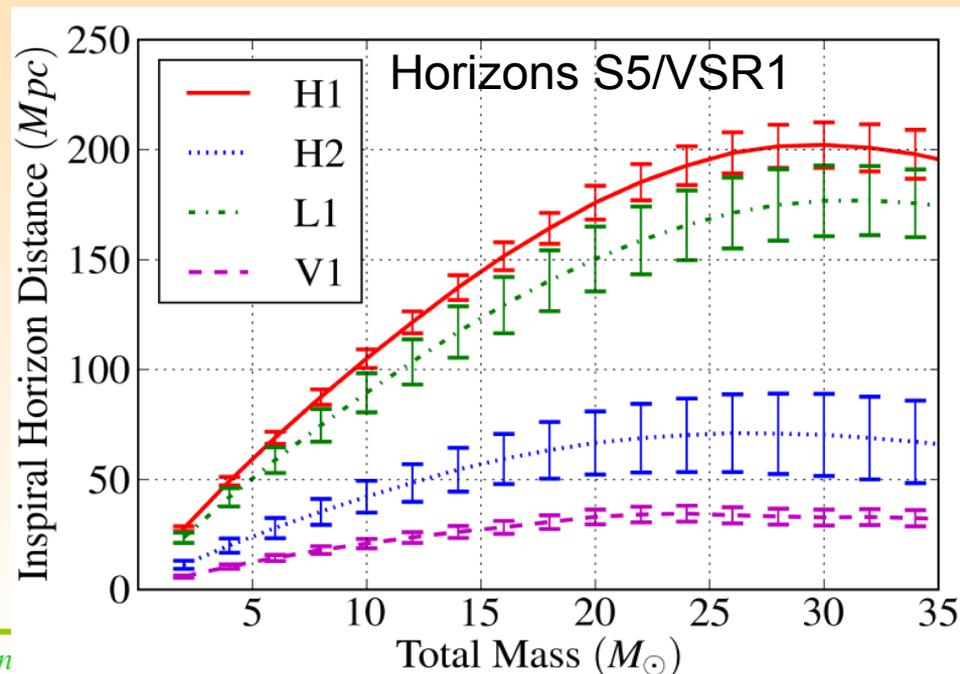
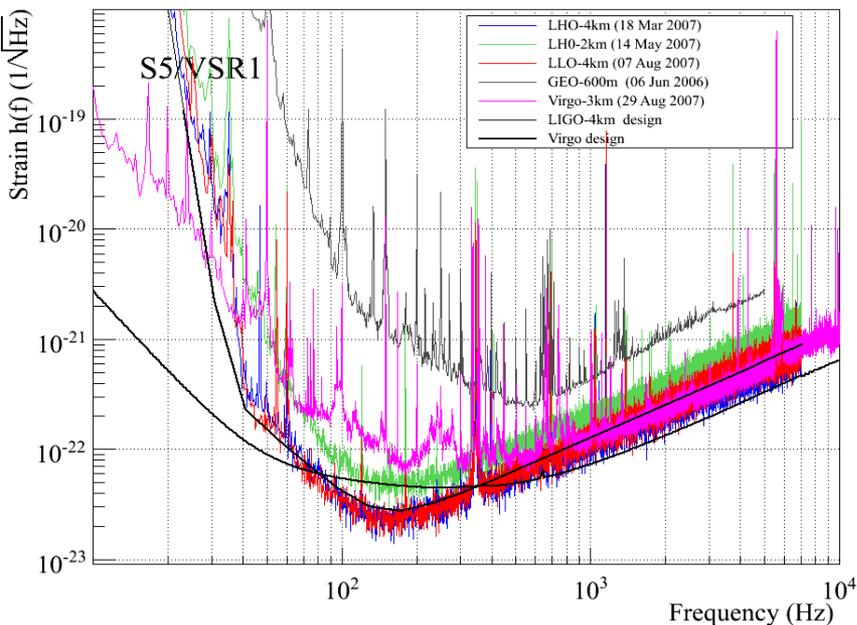
 PRD 79, 122001 (2009)
 PRD 80, 047101 (2009)

18 mai 2007

30 sept. 2007

Analyse combinée des données
 CBC de masse totale 2 à 35 M_{\odot}

Sensibilités S5/VSR1



Recherches « en aveugle » dans tout le ciel

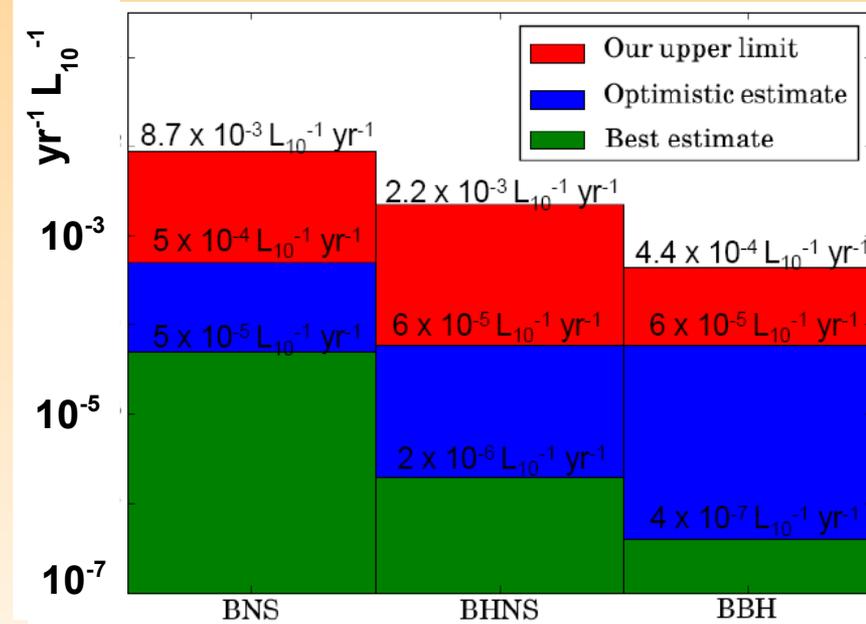
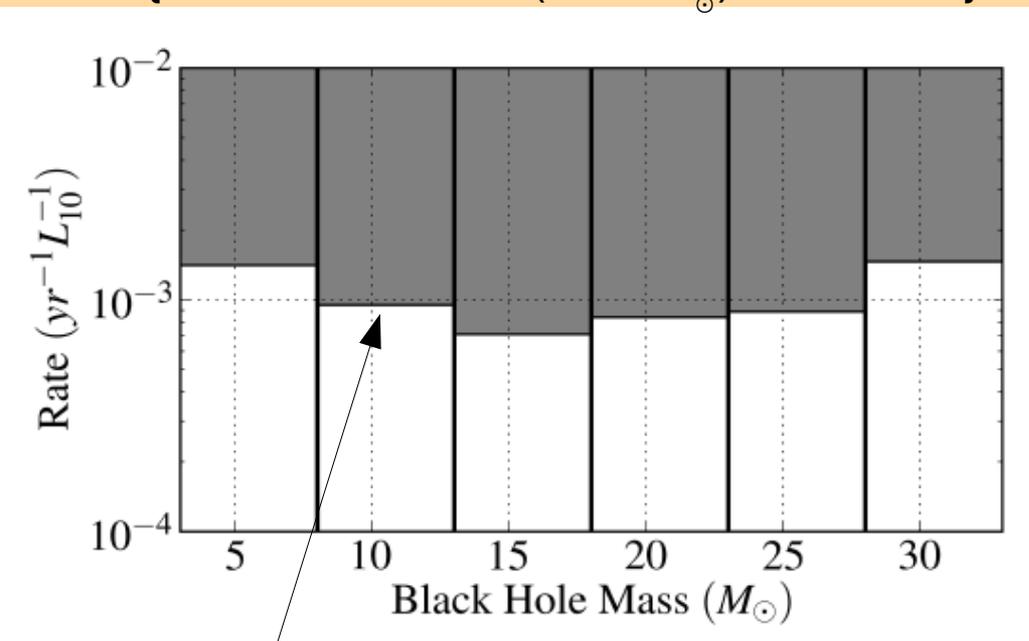


Pas de détection



Limites supérieures sur le taux de coalescences de systèmes binaires {étoile à neutrons ($1.35 M_{\odot}$) + trou noir}

Comparaison avec les taux attendus



Moins de 1 système binaire de $1.4 M_{\odot} \times 10 M_{\odot}$ fusionne par millénaire dans une galaxie telle que la Voie Lactée...

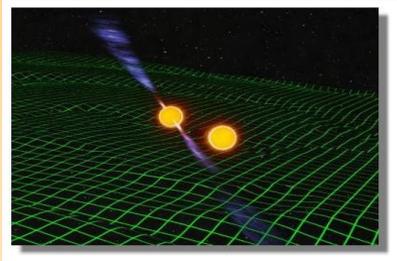
arXiv: 1005.4655.

→ 1 à 2 ordres de grandeur au-dessus des prédictions

Les sursauts gamma (GRB : gamma-ray burst)

Court (<2s)
Spectre 'dur'

→ coalescences de systèmes binaires
(étoiles à neutrons, trous noirs)



Long (>2s)
Spectre 'mou'

→ explosions de supernovae



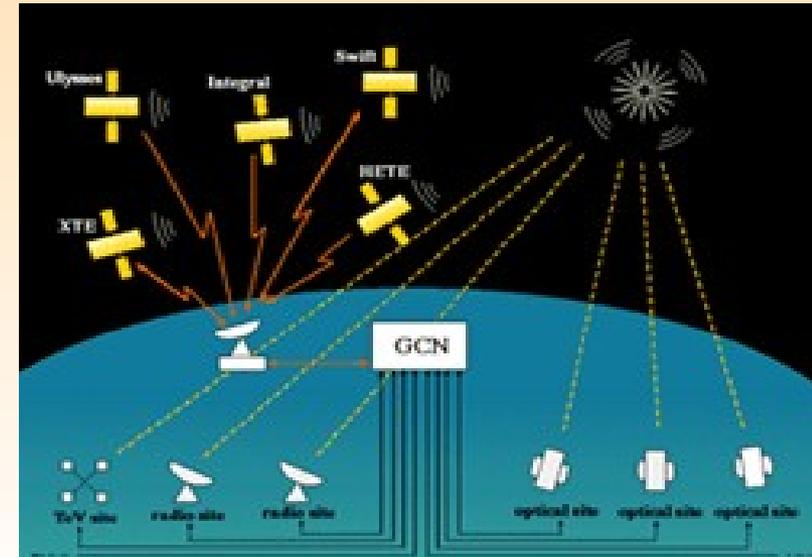
Credit: NASA/Swift/Cruz deWilde

GCN : Gamma-ray bursts Coordinates Network

→ date, direction des GRB
→ distance

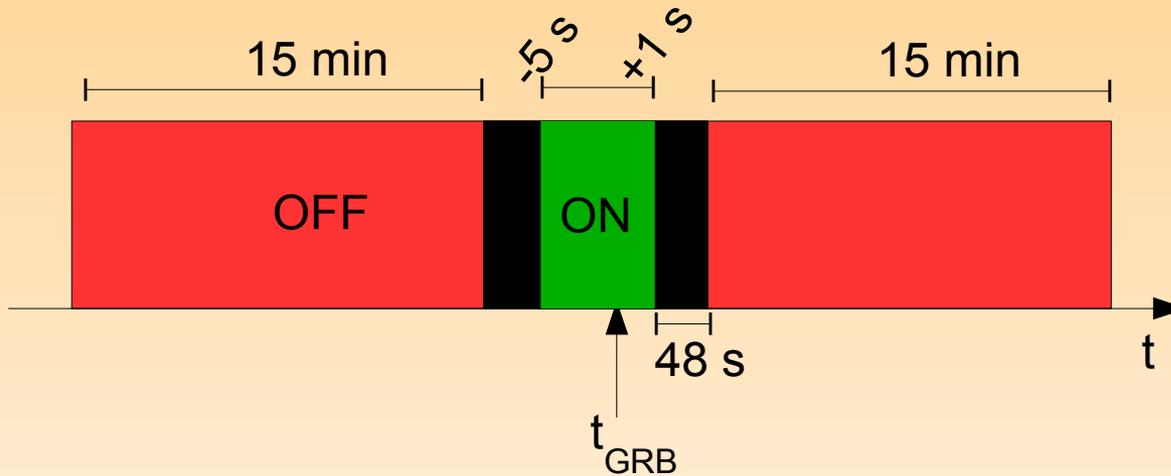
$\langle D \rangle \sim 1 \text{ Gpc}$

GRB 980425 : $D = 36 \text{ Mpc}$



GRBs courts et sélection des données

- région ON limitée : moins d'événements fortuits → seuils de détection plus faibles
- région OFF rapprochée : estimation précise du fond



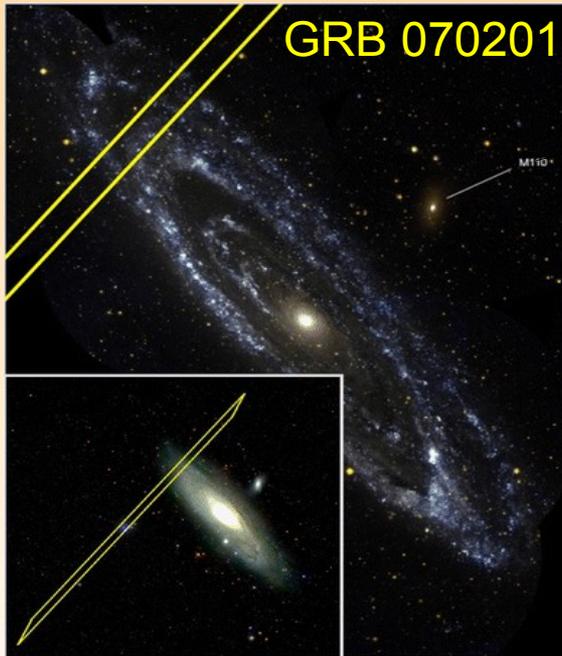
Runs S5/VSR1 : 22 GRBs avec 2 détecteurs d'OG en fonctionnement

GRB courts : limites inférieures sur leur distance

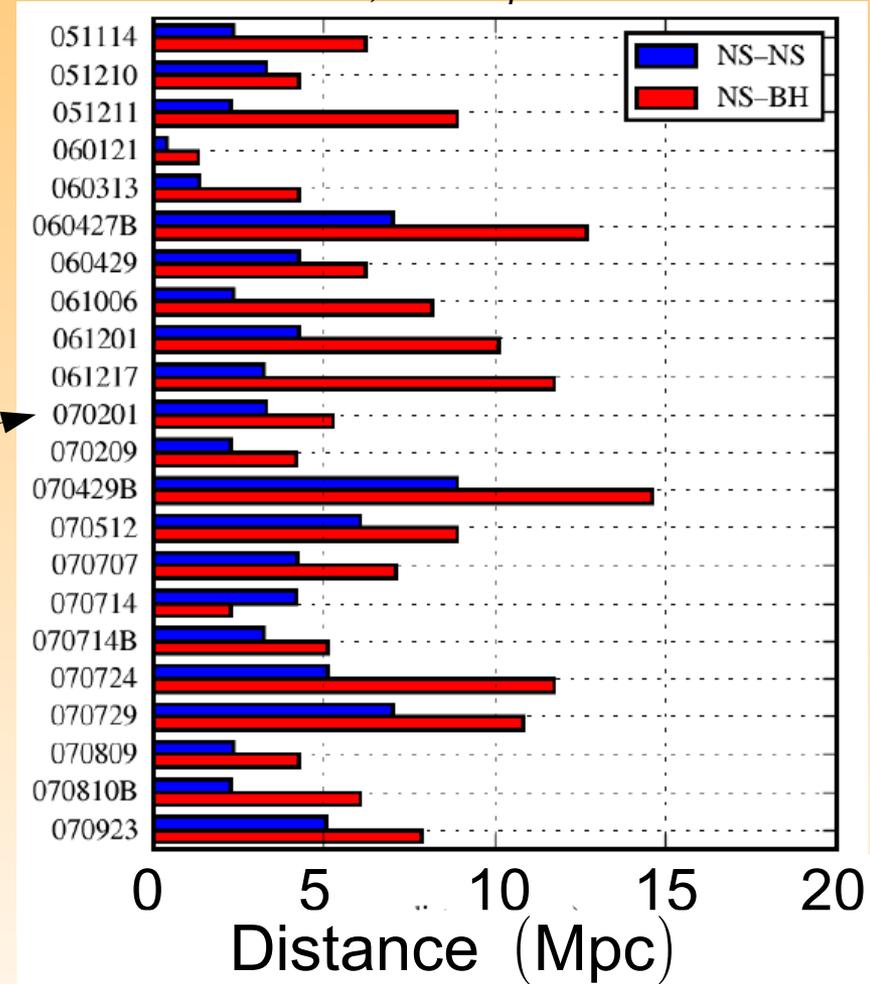
Distance minimale (90% CL) des GRBs

- 2 étoiles à neutrons : $D_{\text{median}} \sim 3.3 \text{ Mpc}$

- étoile à neutron + trou noir : $D_{\text{median}} \sim 6.7 \text{ Mpc}$



J. Abadie et al, 2010 ApJ 715 1453



$D > 3.5 \text{ Mpc} \rightarrow$ ce GRB n'était pas une coalescence dans la galaxie d'Andromède !

B. Abbott et al, ApJ 681 (2008) 1419

Extensions de la recherche de coalescences

Recherche de systèmes plus massifs

➤ 25 à 100 M_{\odot}

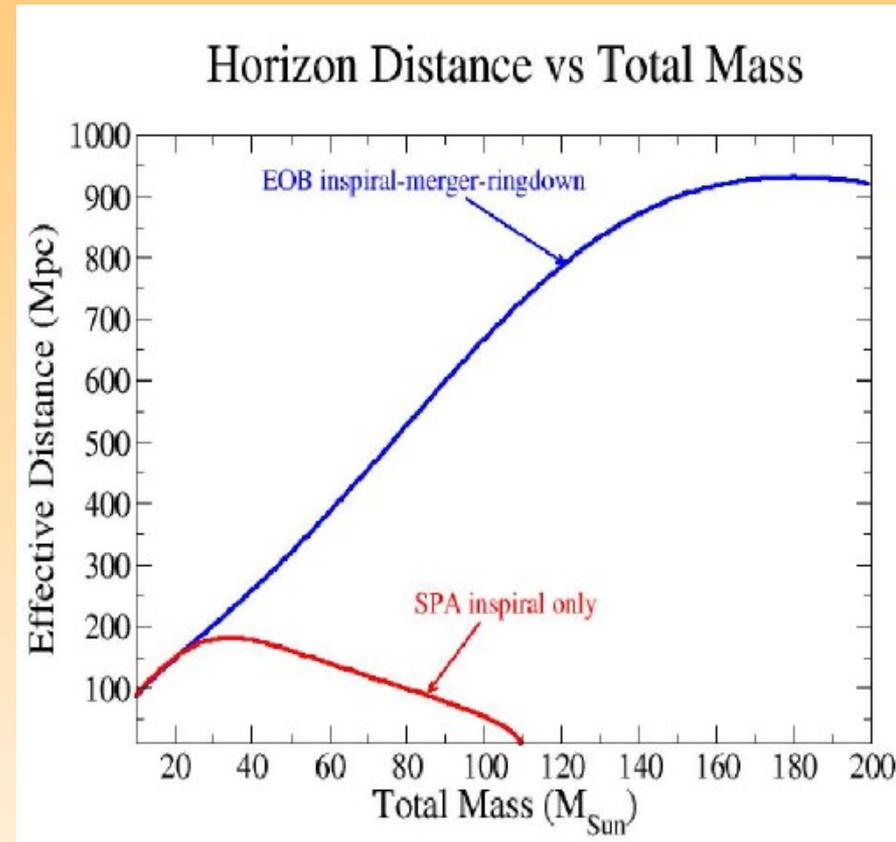
Recherche de relaxation de trous noirs

➤ 10 à 500 M_{\odot}

LIGO S4 : PRD 80, 062001 (2009)

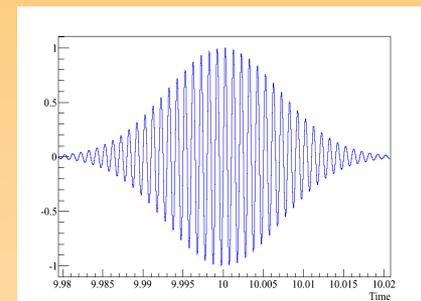
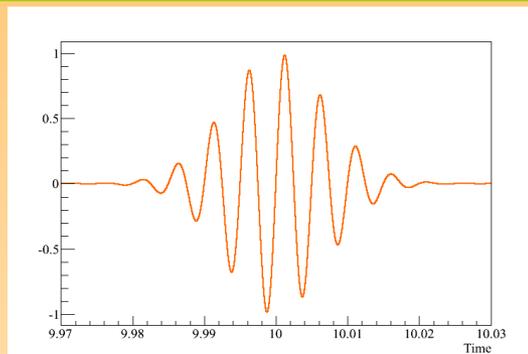
Prise en compte de la rotation des objets

➤ en cours de développement

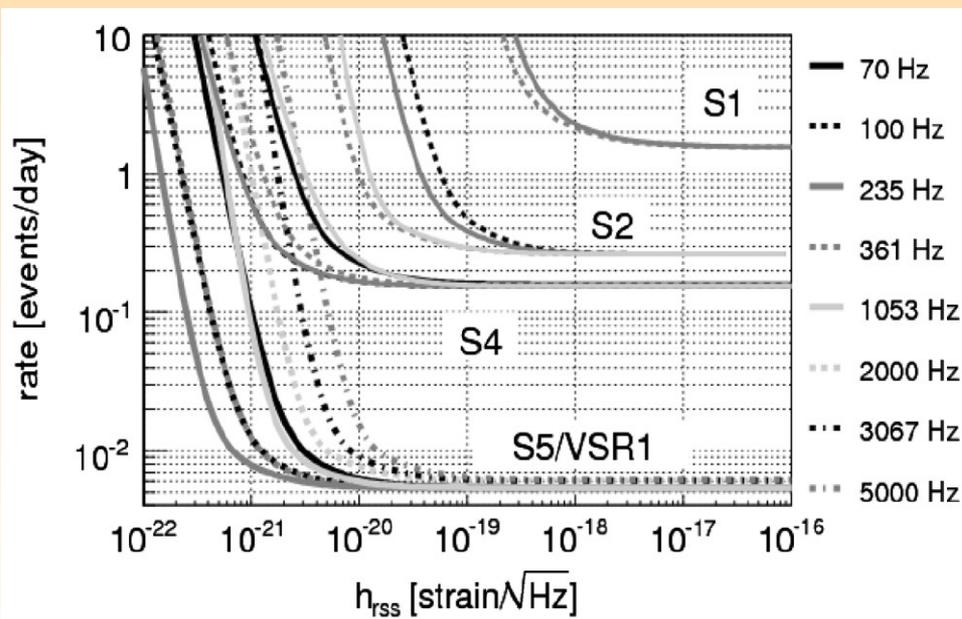


Les autres signaux impulsionnels (bursts)

Exemples de signaux recherchés



Limites obtenues : taux d'événements en fonction de l'amplitude et de la fréquence de l'OG



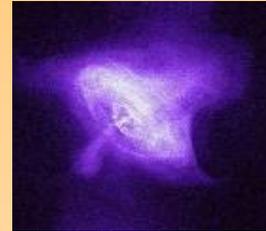
Explosions de supernovae
détectables jusqu'à 1 – 20 kpc
(Voie Lactée)

J. Abadie et al, PRD 81, 102001 (2010)

Et les étoiles à neutrons ?

Pulsar du Crabe

- ralentissement de sa période de rotation (obs. radio) → perte d'énergie
- pas de détection d'OG

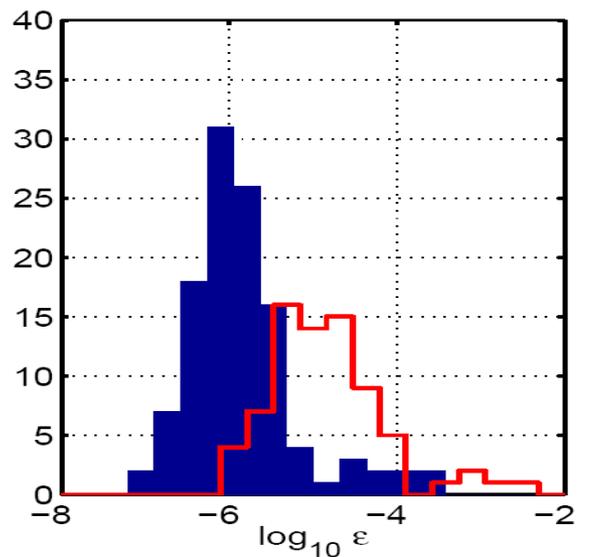


→ moins de 2% de cette énergie est émise sous forme d'OG

ApJ 683(2008) L45-L49

Recherche sur 116 pulsars connus ($d < \sim 500$ pc)

- pas de détection d'OG → ellipticités des étoiles à neutrons $< \sim 10^{-6}$



→ l'écart à la sphéricité des étoiles à neutrons ($r \sim 10$ km) est inférieur à ~ 1 cm !

ApJ 713 (2010) 671-685

Participation aux réseaux multi-messagers

Alertes astrophysiques



GCN (GRBs)

Swift, Fermi, INTEGRAL, ...

SNEWS (supernova)

IceCube, Super-K, SNO, LVD



Alertes en salles de contrôle LIGO-Virgo

Analyses spécifiques (en-ligne et plus tard)

Candidats OG en-ligne (LIGO-Virgo)

+ vérification opérateurs/scientifiques sur sites



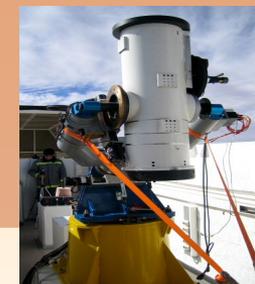
Alertes pour les observatoires

Télescopes en radio et optique

ROTSE, TAROT, SkyMapper, QUEST,
Pi of the Sky, Zadko, Liverpool Telescope,
LOFAR

Satellite X

Swift/XRT

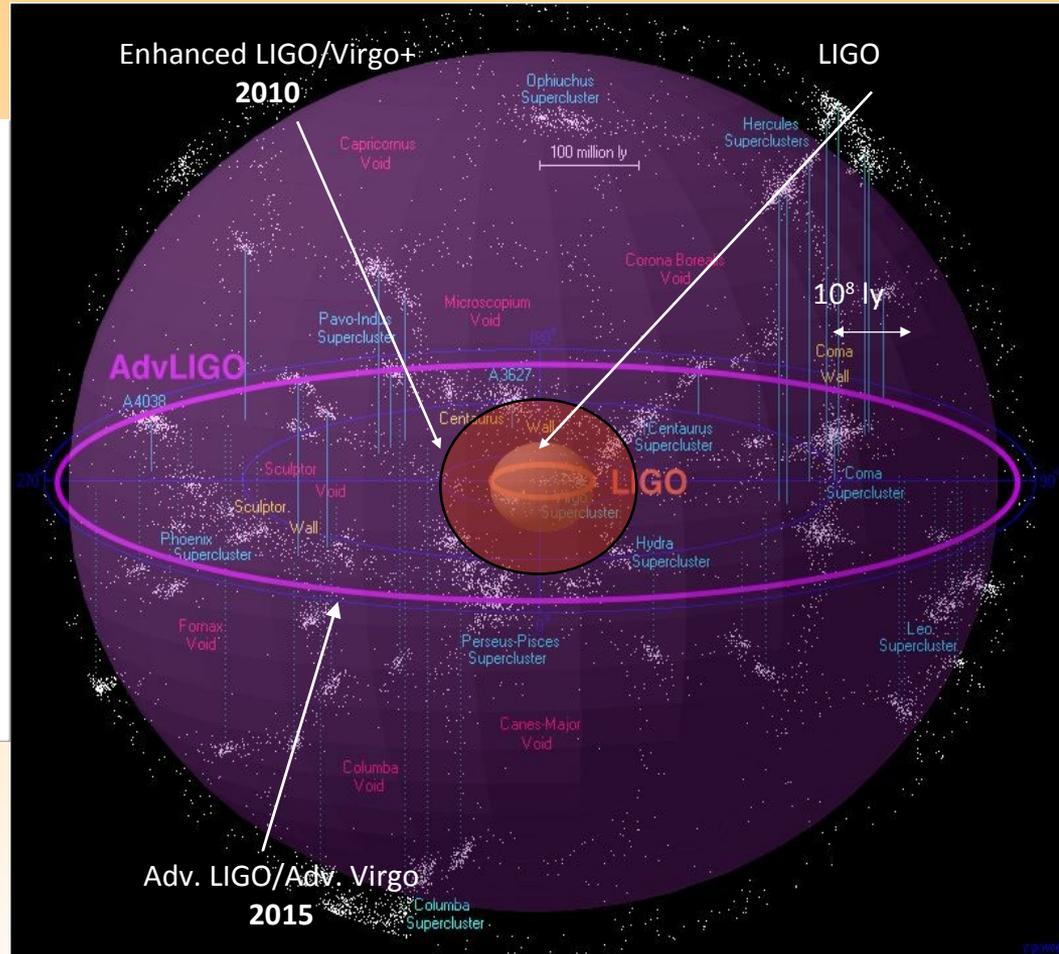
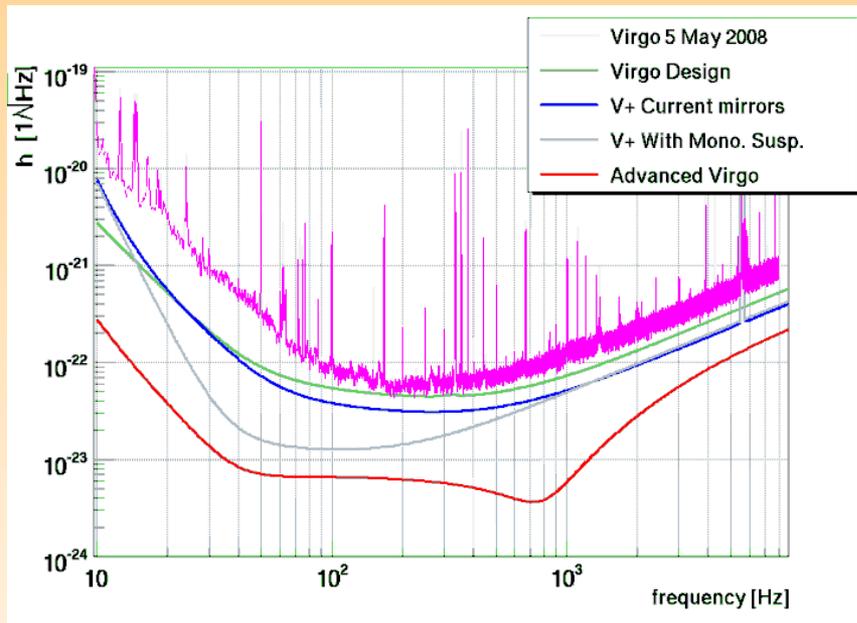


- Augmenter la significativité des événements
- Mieux comprendre les phénomènes physiques

En route vers le futur....

Les détecteurs de 2ème génération

AdvancedVirgo, AdvancedLIGO : construction 2011-2014



Credit: R.Powell, B.Berger

Taux de détection prédits (CBC)

Estimation réaliste

	Taux (1/an)			Horizon (Mpc)		
	NS-NS	BH-NS	BH-BH	NS-NS	BH-NS	BH-BH
Initial	0,015	0,004	0,01	32	67	160
Advanced	20	5,7	16	364	767	1850

Estimation optimiste

	Taux (1/an)		
	NS-NS	BH-NS	BH-BH
Initial	0,15	0,13	1,7
Advanced	200	190	2700

→ Détections très probables :
début de l'astrophysique gravitationnelle
en 2015 – 2020 !

Comment y parvenir ?

Réduction des bruits

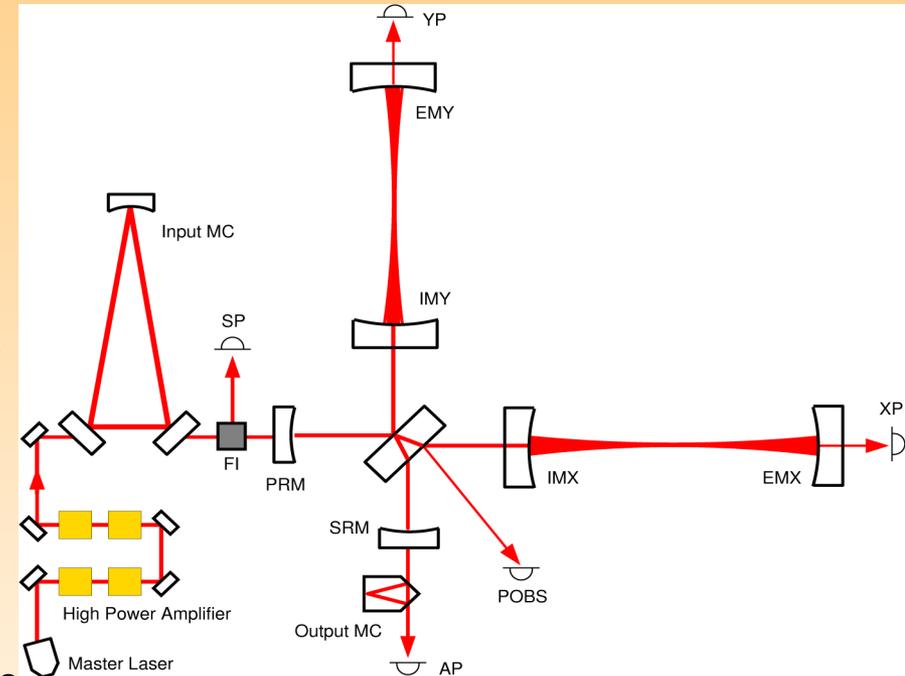
- Haute fréquence : bruit de photon
- Basse et moyenne fréquences : bruit thermique

Projet :

- ITF avec recyclage de signal
- Laser de 200 W
- Compensation thermique
- « Détection DC »
- Faisceau gaussien, waist au milieu des cavités F-P
- Miroirs de 42 kg, traitement de surface amélioré
- Suspensions monolithiques

Options :

- Laser et IMC fibrés, miroirs plus lourds,
- Faisceau non gaussien, « squeezing » de la lumière

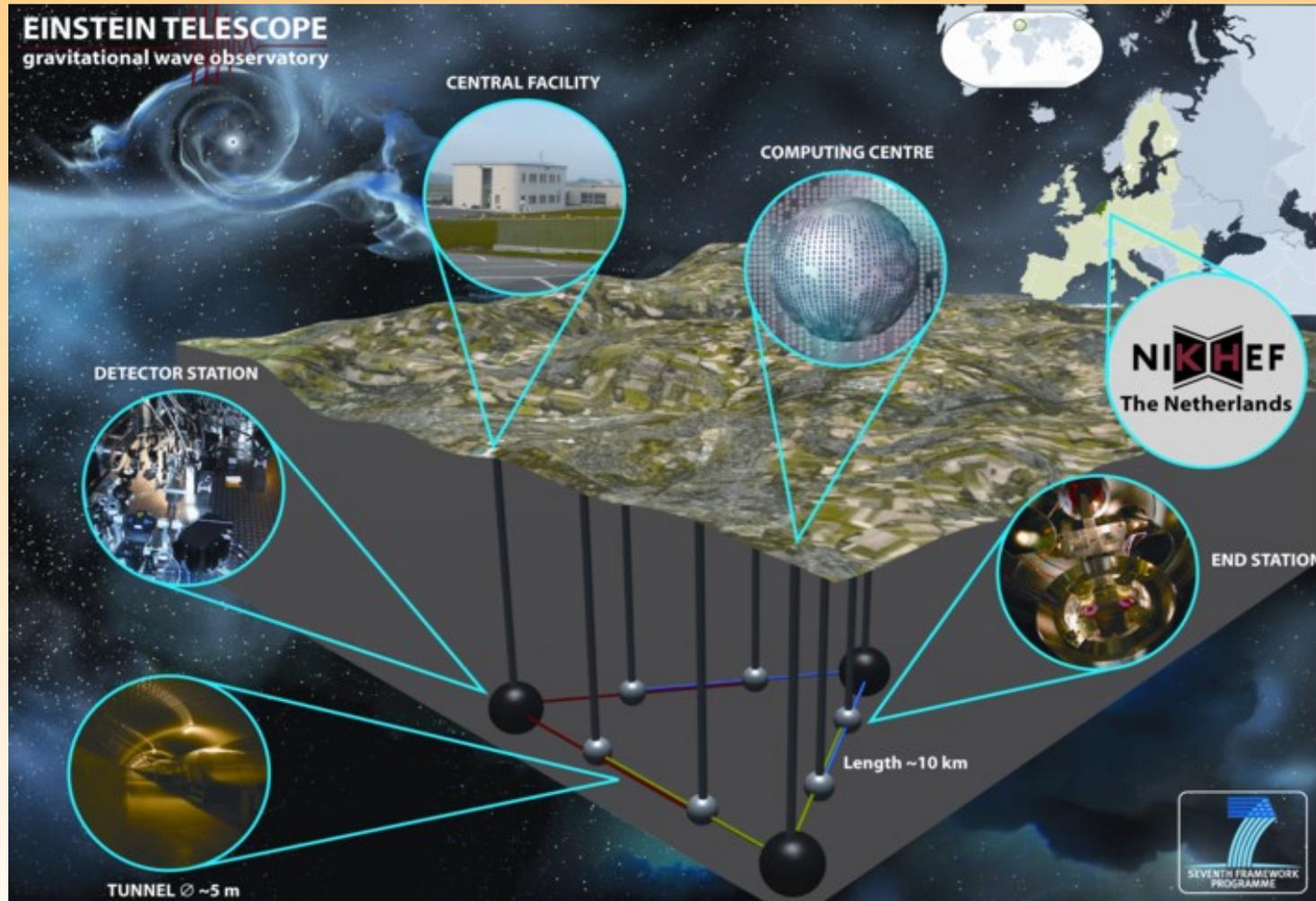


Planning :

- Construction en 2011-2013
- Mise au point en 2013-2015, sans recyclage de puissance
- Prise de données en 2015, avec LIGO
- Mise au point avec recyclage de signal et prise de données

Vers la 3ème génération : Einstein Telescope

→ améliorer la sensibilité des détecteurs terrestres (1 Hz – 10 kHz)



LISA : un projet de détecteur spatial

→ élargir la bande-passante : 0,1 mHz à 1 Hz

Projet ESA/NASA

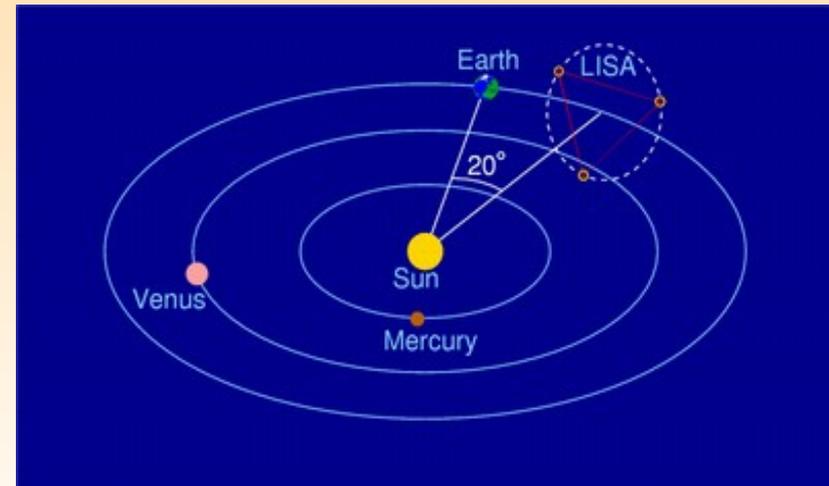
- asservissement en fréquence
- vol en formation, asservissement en position
- contraintes spatiales

Étape préliminaire : LISA Pathfinder

- lancement mi-2011

Lancement de LISA en 2020 au plus tôt

- durée de vie ~5 ans



Credit: Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute)/Einstein Online

Pour conclure...

1ère génération

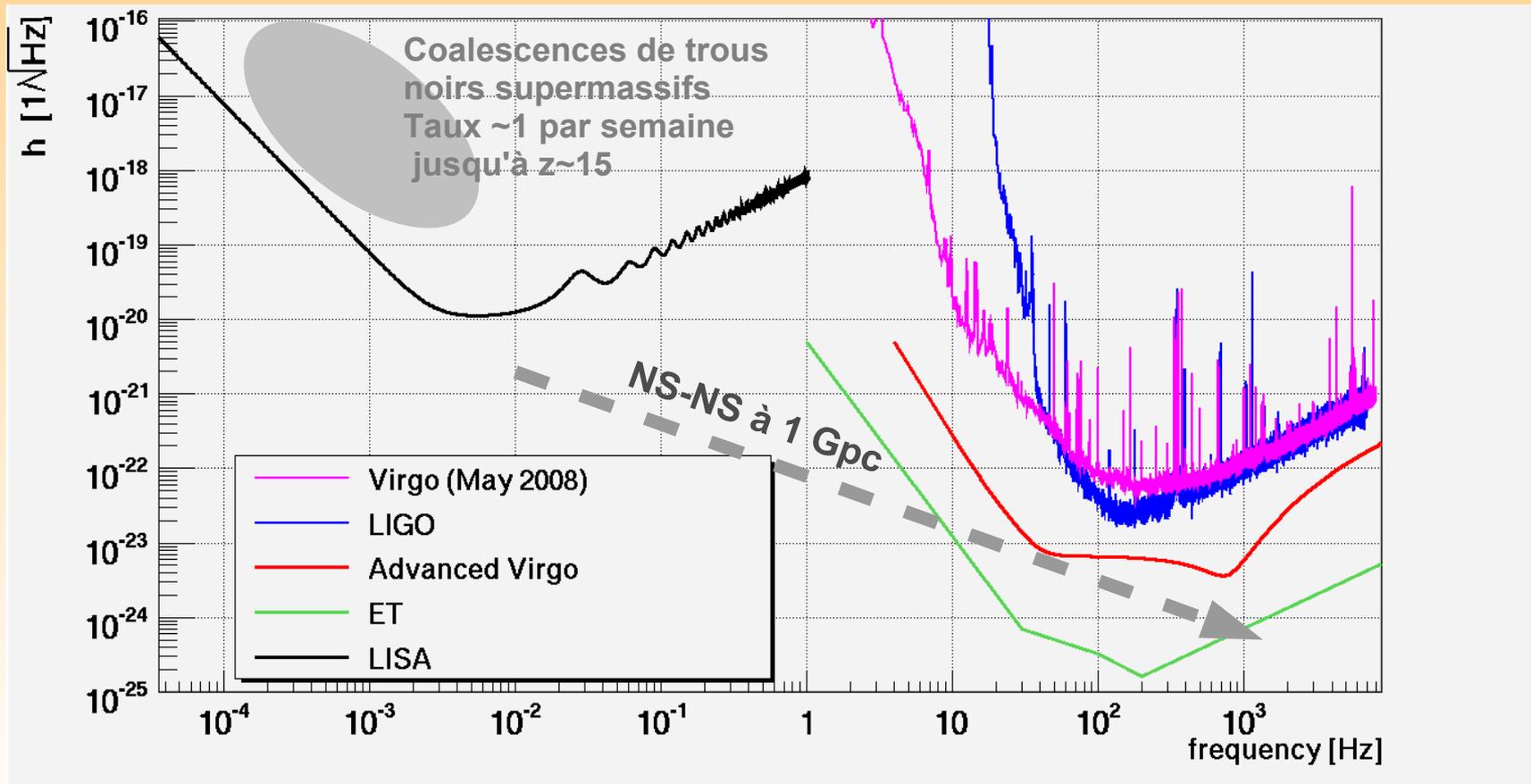
2ème génération

3ème génération

Prises de données en cours

Début de l'astronomie gravitationnelle

Des détections quotidiennes ?



F.F.N



Les suspensions des miroirs

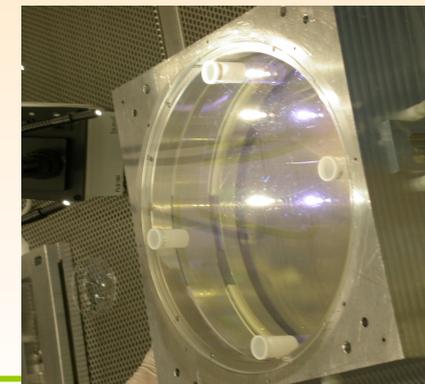
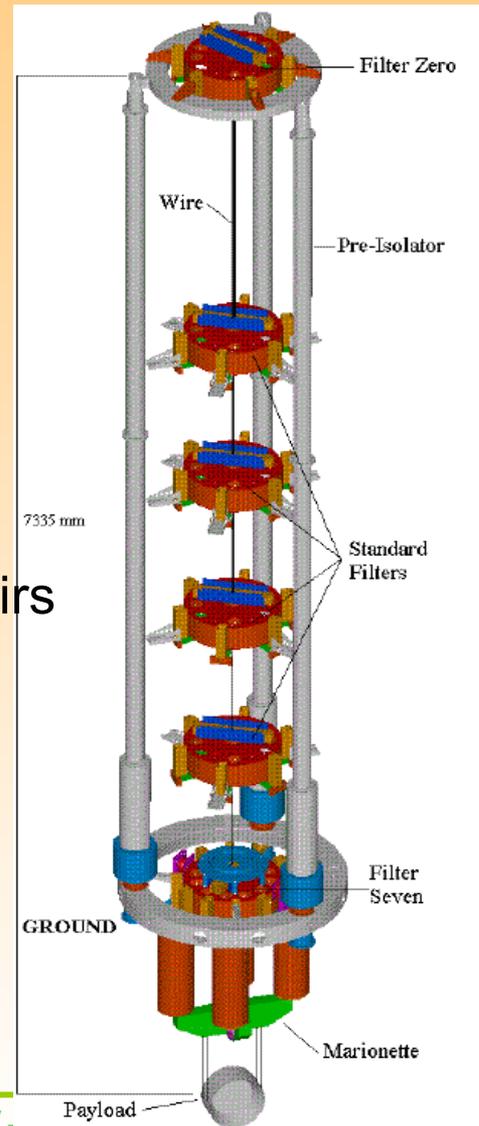
Bruit sismique $\sim 10^{-9}$ à 10 Hz \gg déplacement max. des miroirs $\sim 10^{-18}$ m à 10 Hz

→ Atténuation passive ($f > 1$ Hz)

- suspension des miroirs
- série de 7 pendules en cascade
- atténuation en f^{-14}

→ Contrôle actif de la position des miroirs

- accéléromètres, interféromètre
- actionneurs électromagnétiques
- boucles d'asservissement



Les miroirs

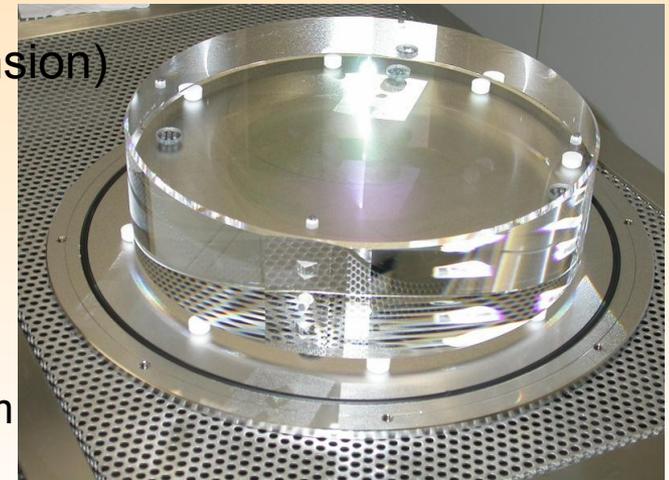
Effets thermiques :

- vibrations du miroir et de sa suspension
- lentilles thermiques



- Faibles pertes par absorption et par diffusion : <math><10\text{ ppm}</math>
 - miroirs cylindriques de silice, recouvert d'un traitement de surface (LMA: Laboratoire des Matériaux Avancés, Lyon)
 - uniformité sur de larges surfaces : défauts de planéité $\sim 1\text{ nm}$

- Caractéristiques mécaniques (miroirs, fils de suspension)
 - résonances à hautes fréquences
 - grands facteurs de qualité



Diamètre 35 cm
Épaisseur 10 cm
Masse 20 kg

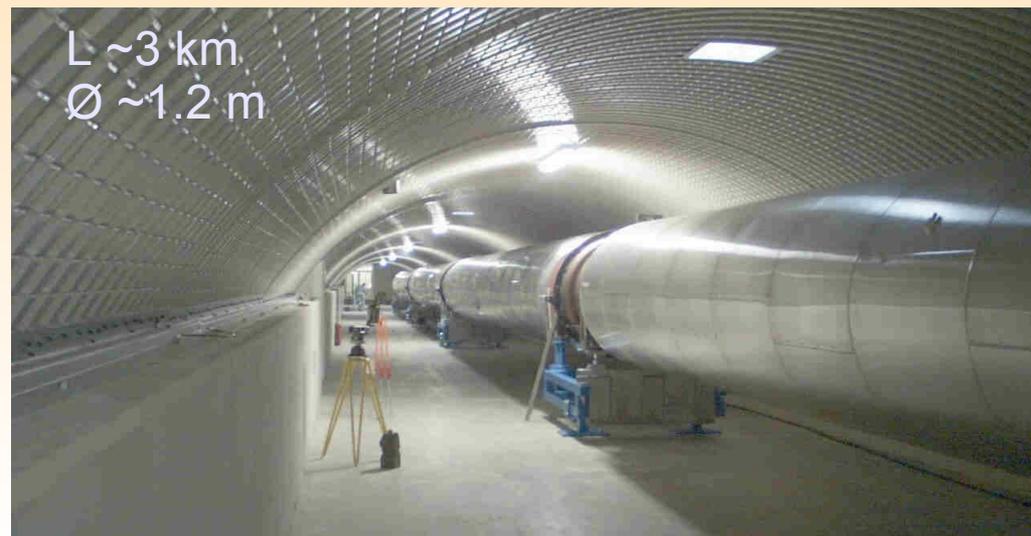
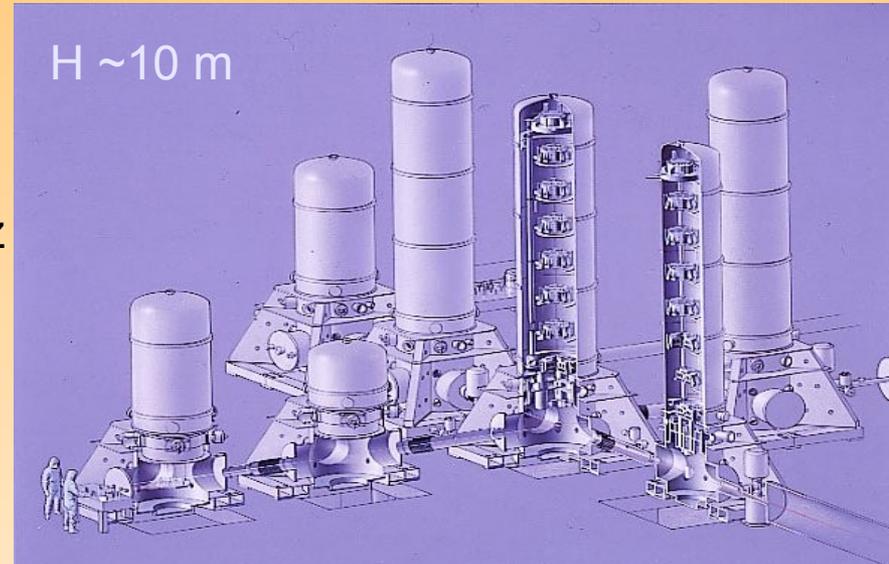
Les enceintes à vide

Effets de l'air environnant :

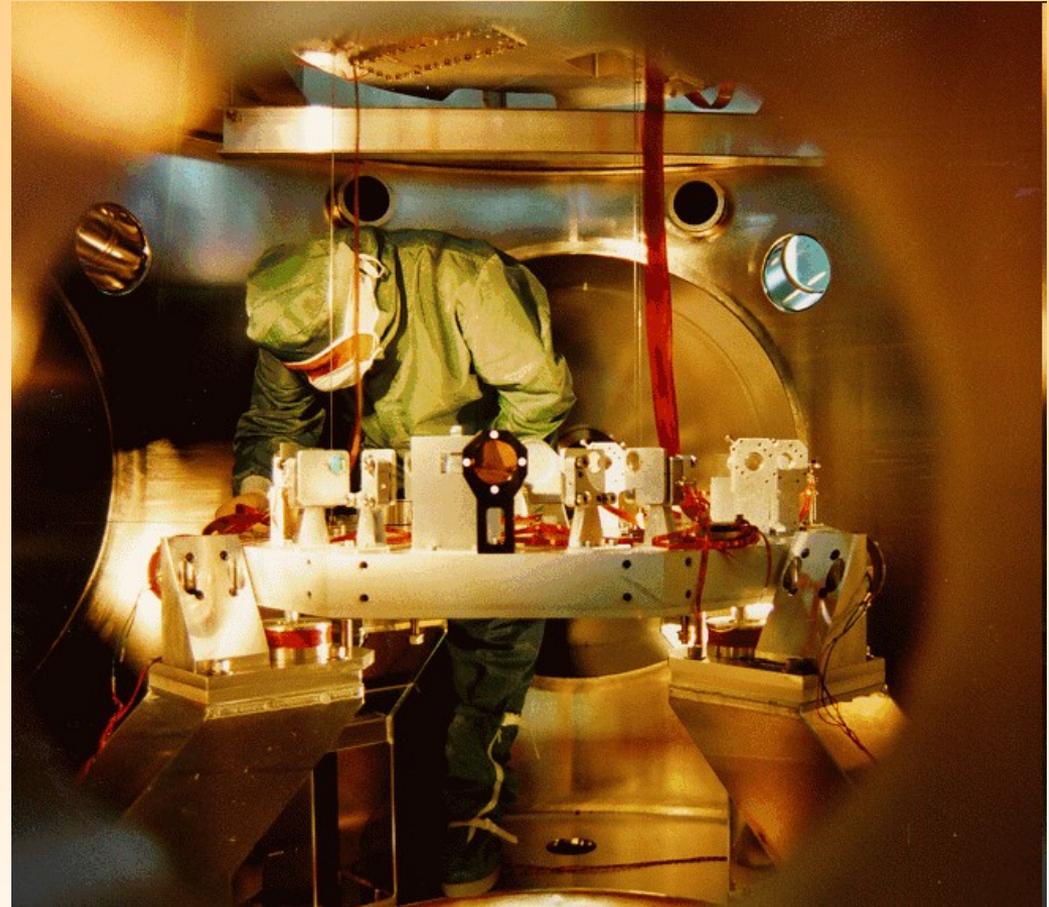
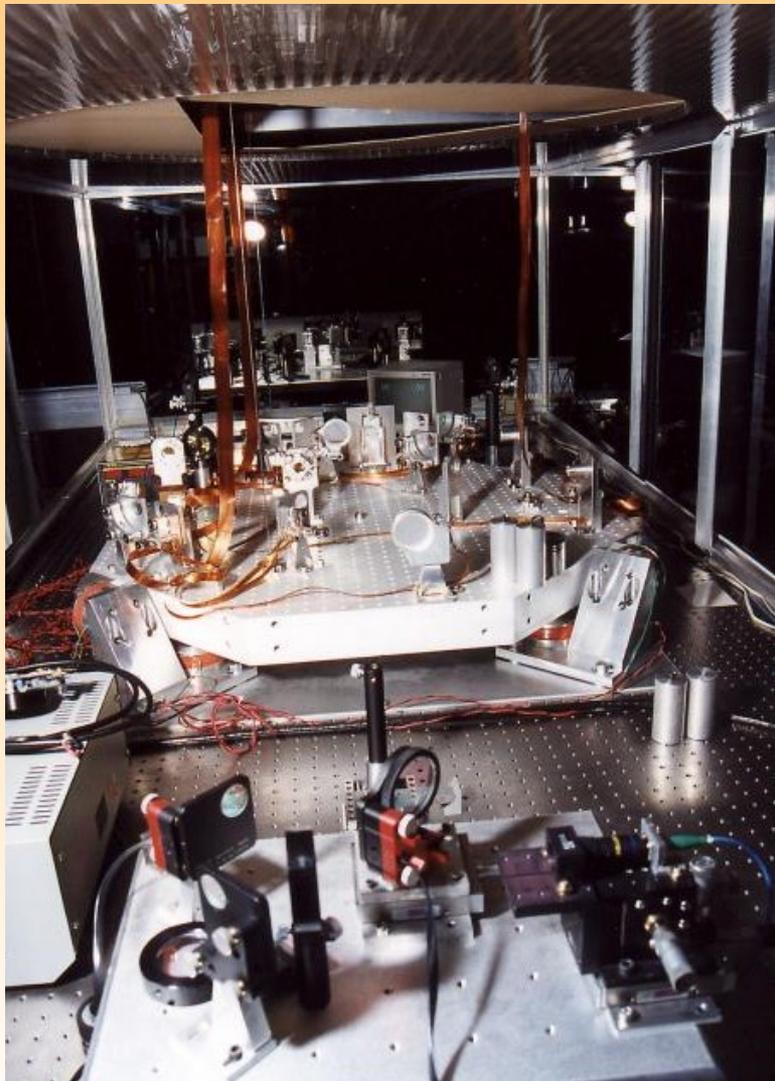
- Bruits acoustiques
- Variation d'indice
- Impacts des molécules de gaz sur les miroirs
- Diffusion du faisceau sur les molécules du gaz

→ Ultra-vide : 10^{-7} mbar pour H_2O

→ Pièges à lumière dans le tube



Système de détection de Virgo



Systèmes binaires : ordres de grandeur

Système Soleil-Jupiter

puissance émise en OG : 5×10^3 J/s

puissance lumineuse du soleil : $L_{\odot} \sim 3.8 \times 10^{26}$ J/s

Système binaire PSR 1913+16

puissance émise en OG : $7,35 \times 10^{24}$ J/s

Émission d'OG à 100 Hz par un système $1,4 M_{\odot} \times 1,4 M_{\odot}$ à 10 Mpc :

$$h \sim 10^{-22}$$

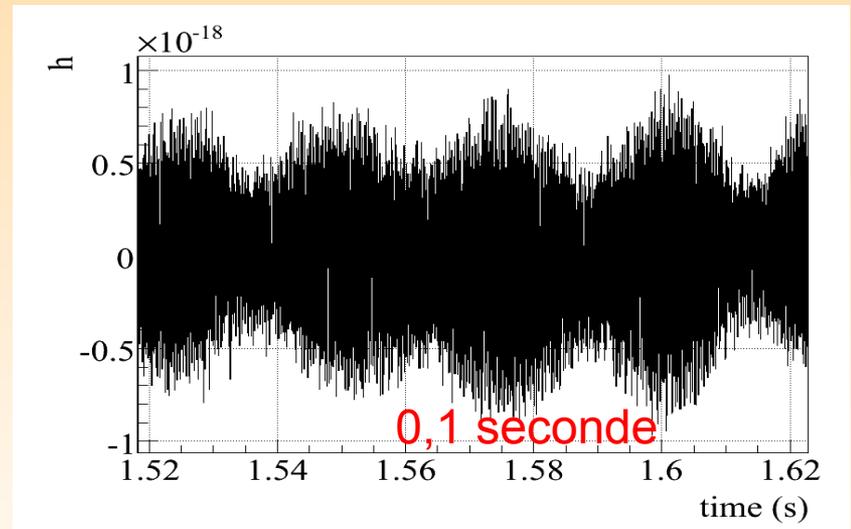
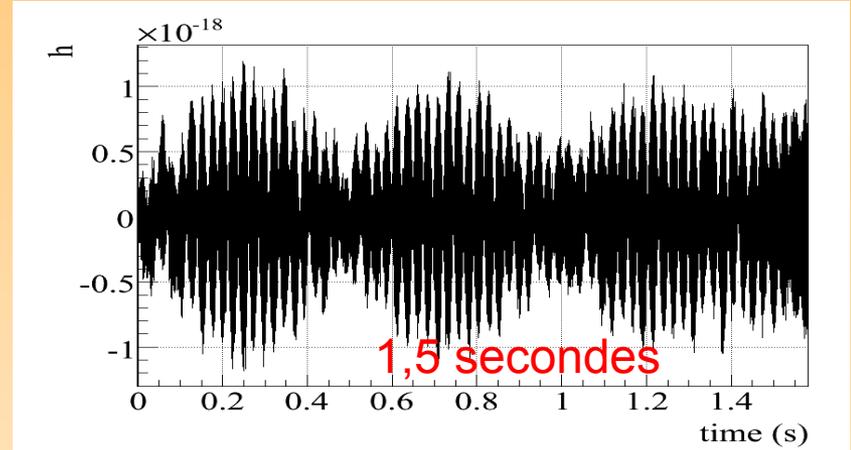
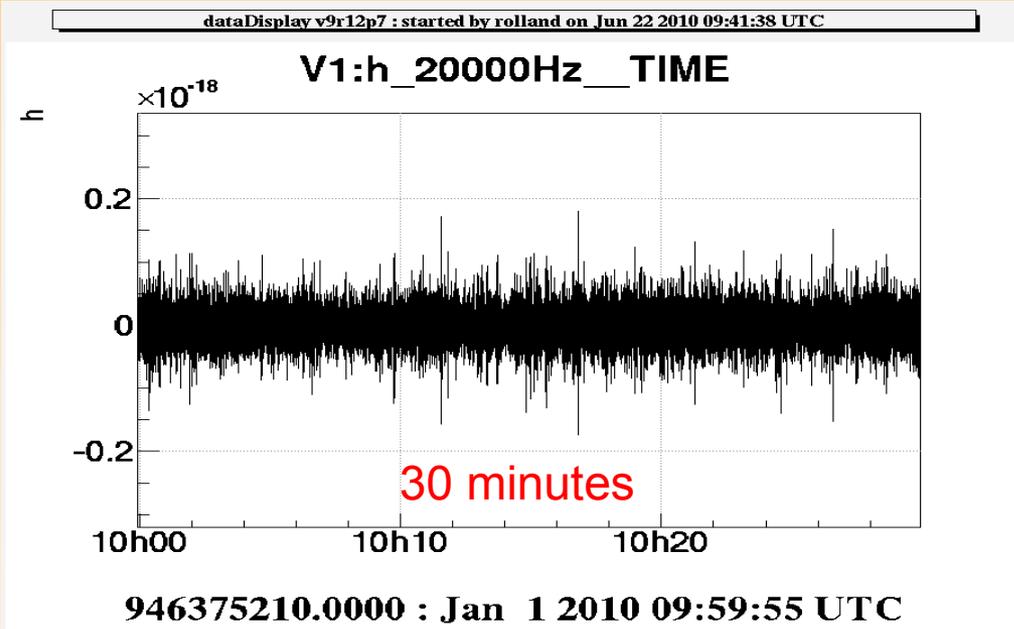
$$\Delta L \sim h L \sim 3 \times 10^{-19} \text{ m} \quad \text{pour } L = 3 \text{ km}$$

$h \sim 10^{-21}$: variation de la distance Terre-Soleil de la taille d'un atome !

EM vs OG

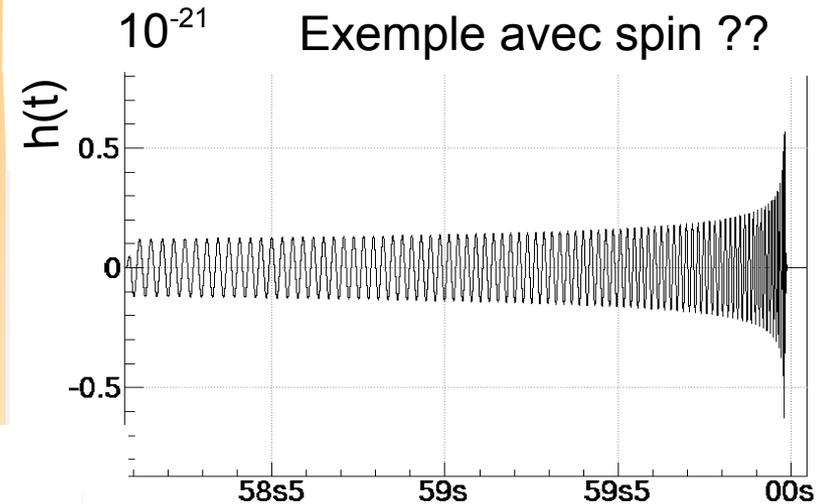
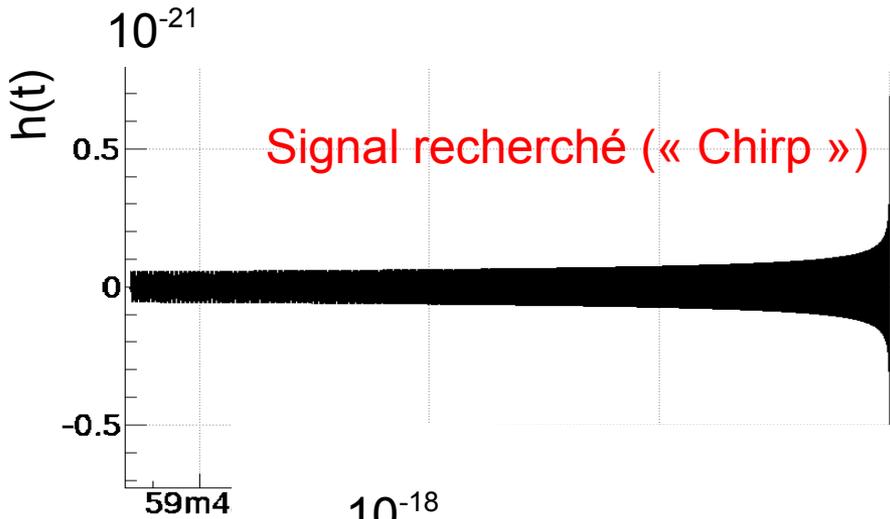
EM	OG
Ondes qui se propagent à travers l'espace-temps	Ondes dans la métrique de l'espace-temps
Sont produites de façon incohérentes par des atomes	Sont produites de façon cohérente par des objets massifs
Ont une longueur d'onde petite par rapport à la taille de leur source	Ont une longueur d'onde grande par rapport à la taille de leur source
Utilise la force EM, relativement forte	Utilise la force gravitationnelle, faible
Ont des fréquences $> 10^6$ Hz	Ont des fréquences $< 10^3$ Hz
Sont mesurées par leur énergie $L(r) \sim 1/r^2$	Sont mesurées par leur amplitude $L(r) \sim 1/r$

Quel signal $h(t)$ mesure-t-on ?

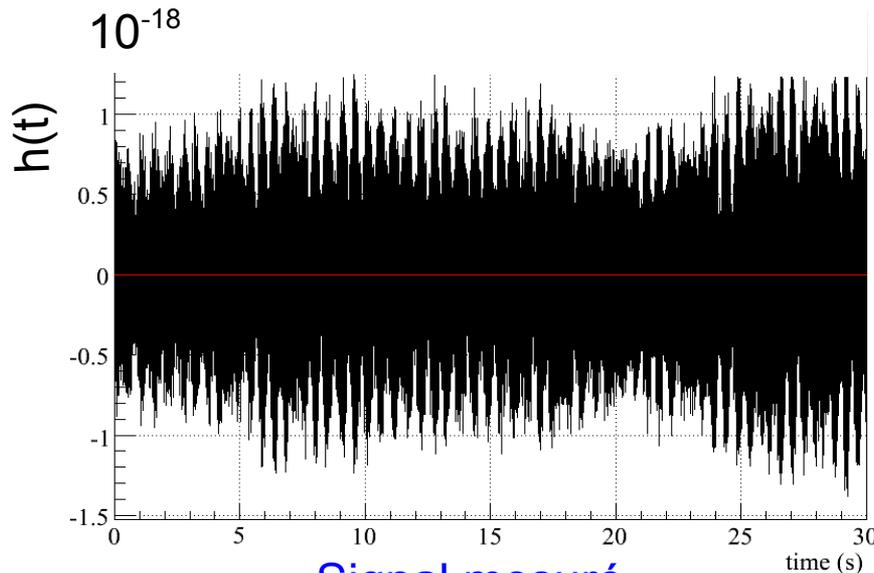


Quel signal cherche-t-on ?

Pour une coalescence d'un système de 2 étoiles à neutrons...



944985:



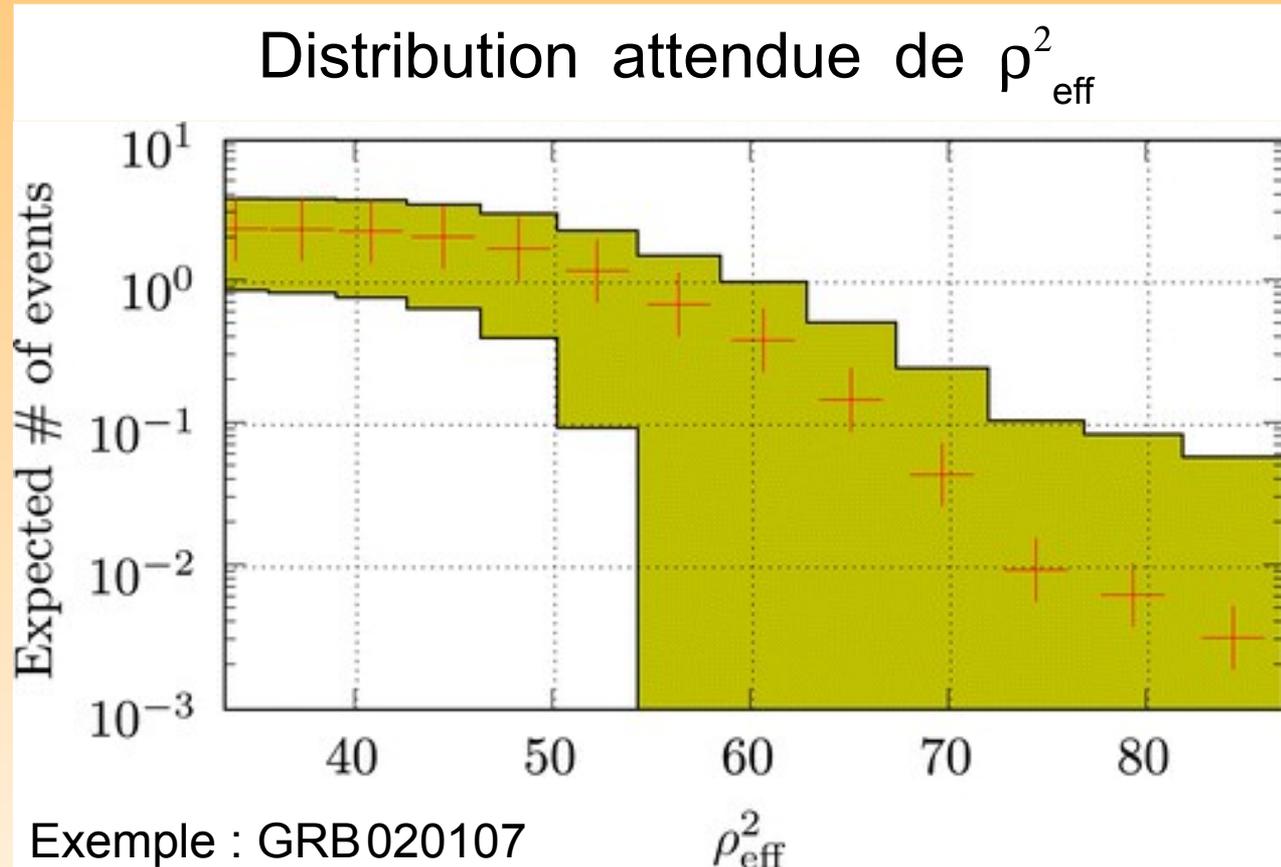
Signal mesuré

46396813.0748 : Jan 1 2010 15:59:58 UTC

→ filtrage adapté :
 ~corrélation entre le signal
 attendu et le signal mesuré

GRBs courts : recherche d'une détection

Région OFF
+
décalages temporels



Région ON : compatible
→ pas de détection



Conclusion

Détecteurs de 1ère génération, Virgo et LIGO

- sensibilité nominale atteinte
- fonctionnement en réseau et recherches multi-messagers

Prise de données en cours

- détection plausible
- limites astrophysiques intéressantes



Construction des détecteurs de 2ème génération, 'Advanced'

- aboutissement des projets Virgo et LIGO
- début de l'astrophysique gravitationnelle dans quelques années !

Projets de 3ème génération

- vers des détections quotidiennes...

