

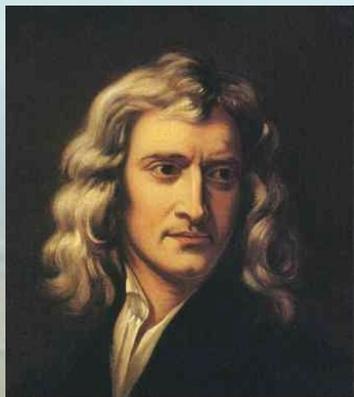
A la recherche des ondes gravitationnelles avec Virgo et LIGO



Loïc Rolland

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

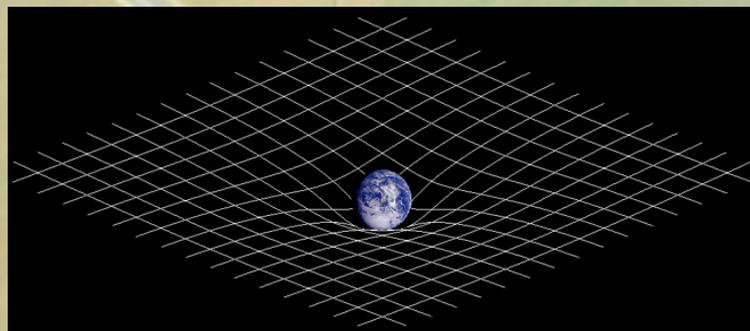
Contexte théorique : la Relativité Générale



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

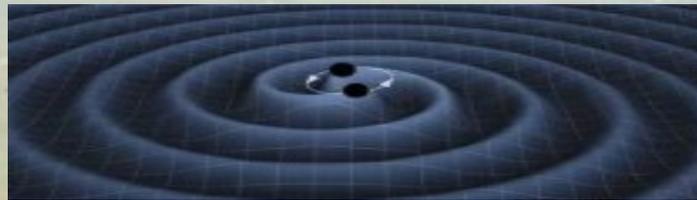


Déformation de l'espace-temps

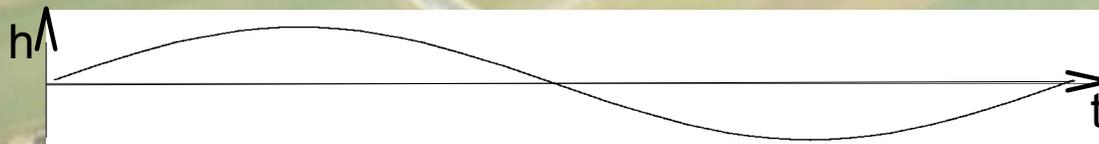


Onde gravitationnelle

- 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

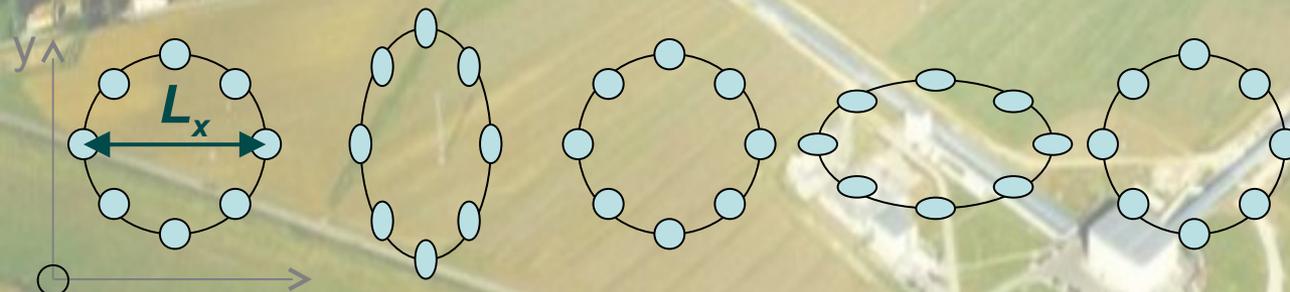
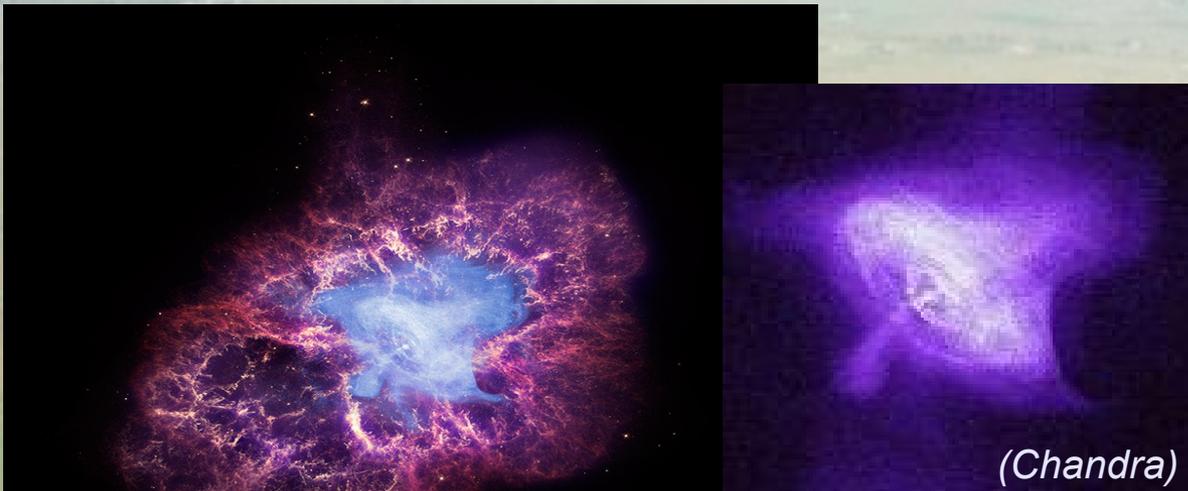
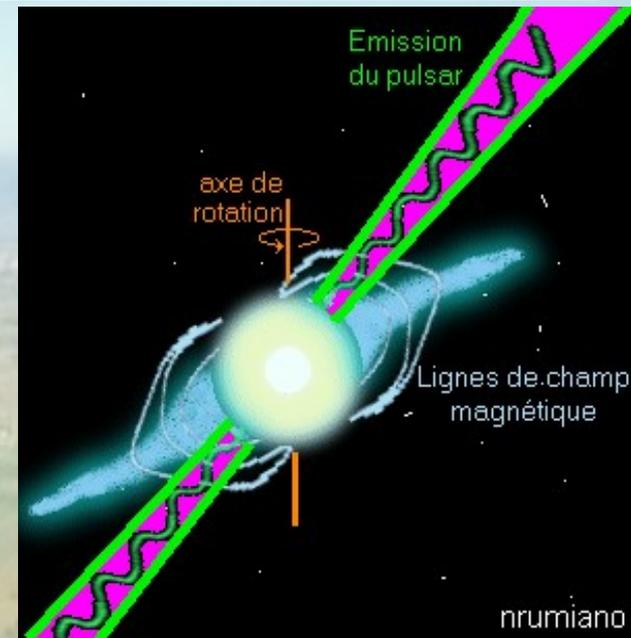


Illustration de la variation de la métrique avec des masses libres réparties sur un cercle, pour une OG polarisée + se propageant selon z

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)

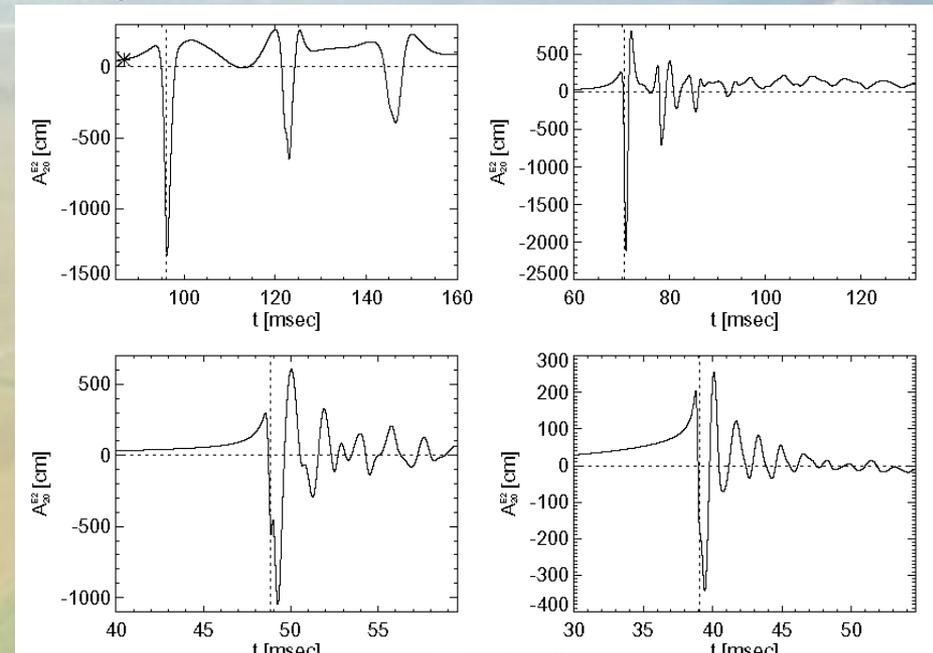
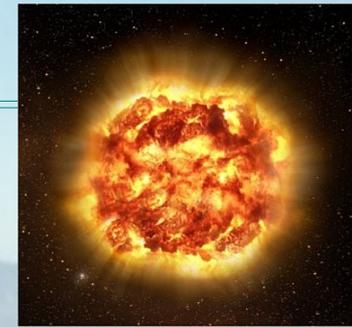
Émission d'OG

- 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)

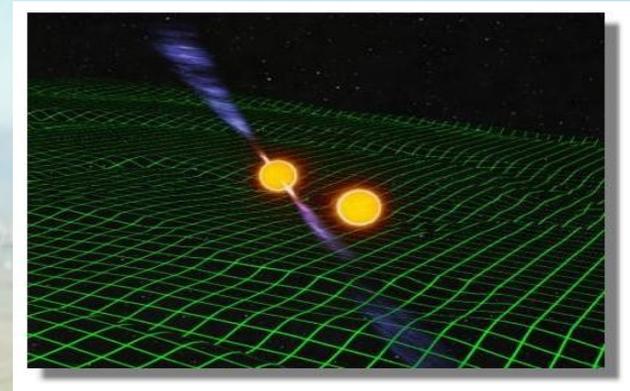
Émission d'OG

- 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)

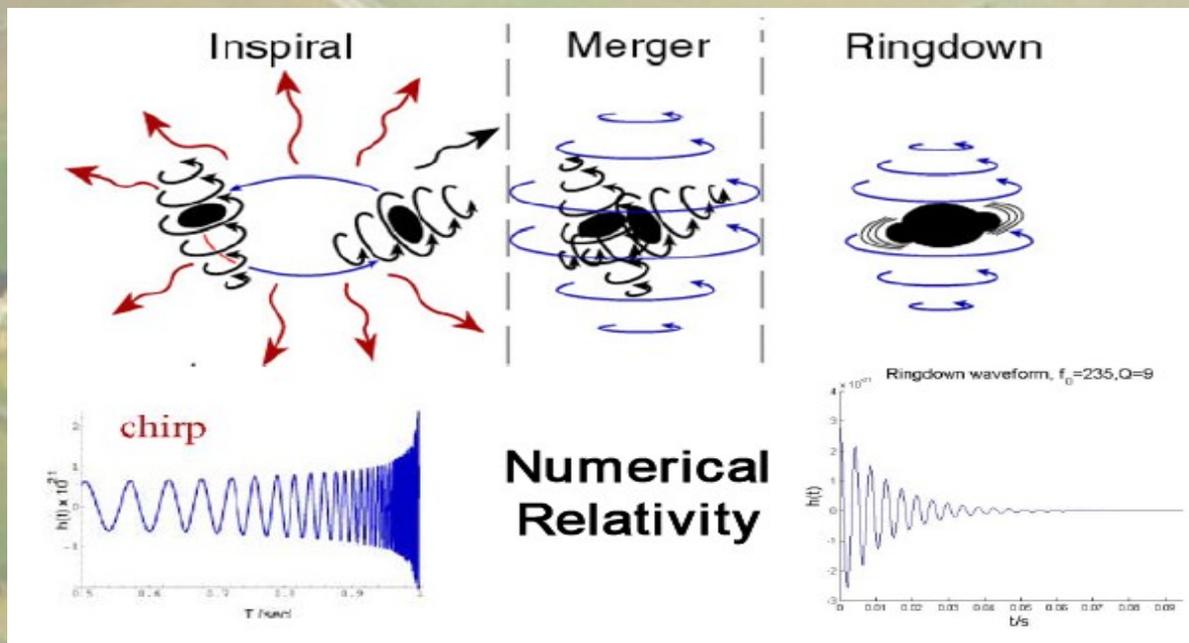
Objets binaires compacts

- 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 :

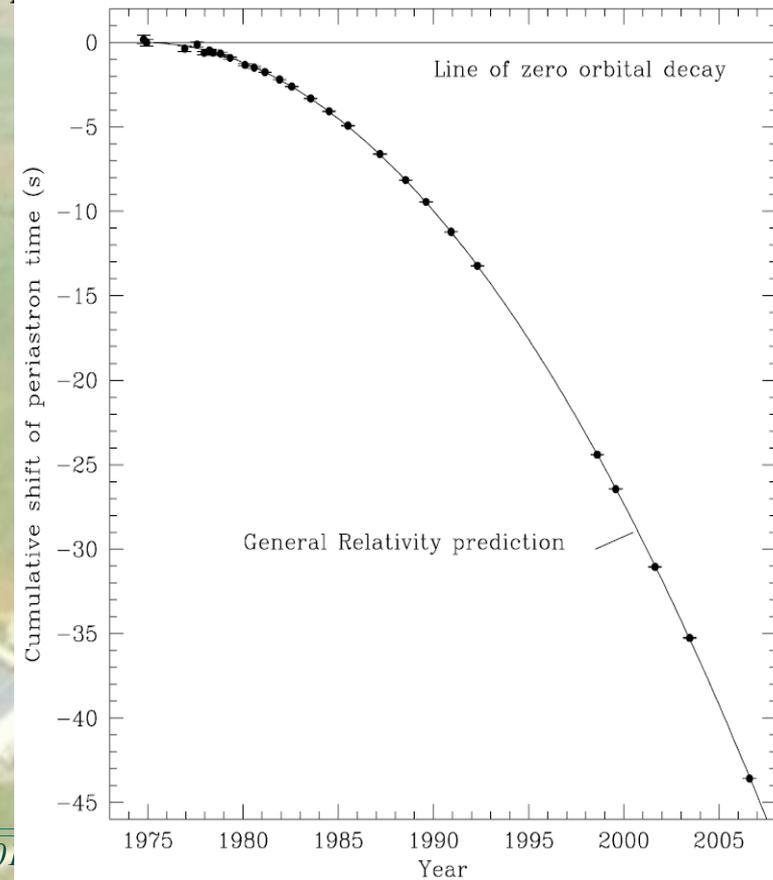
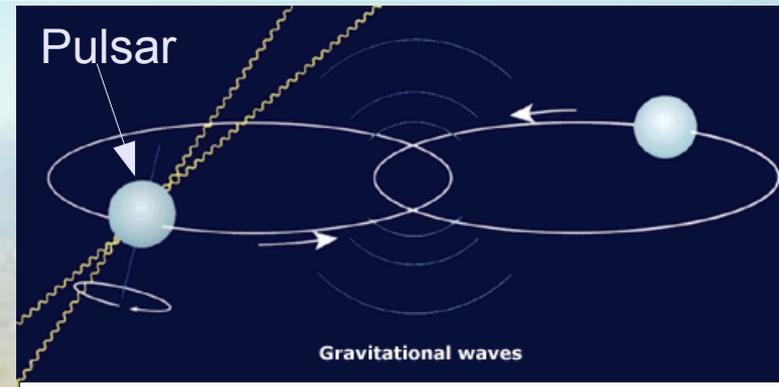
- découvert en 1974 par Hulse et Taylor (prix Nobel en 1993)

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
 $\sim 1 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$
- spatial : LISA
 $\sim 0.03 \text{ mHz} - 0.1 \text{ Hz}$



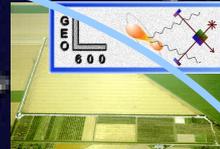
Les interféromètres dans le monde




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

LIGO Livingston, 4 km





GEO, Hannover, 600 m

Virgo, Cascina, 3 km



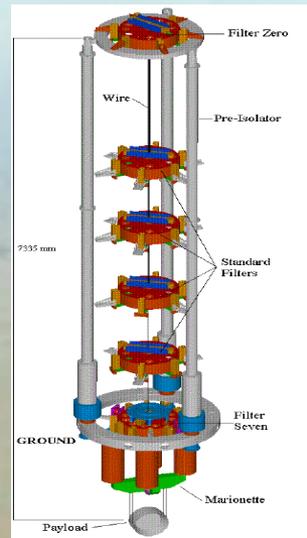


TAMA, Tokyo, 300 m

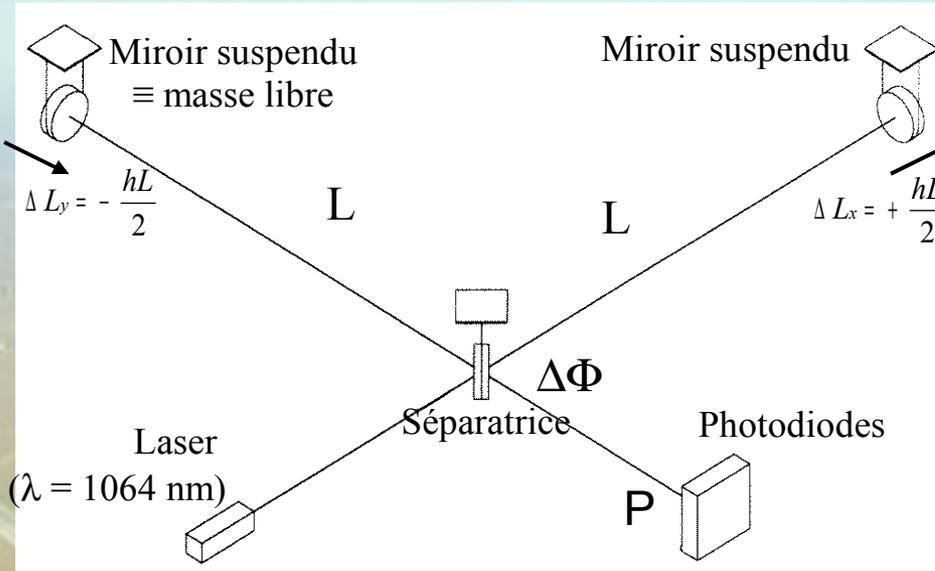
Mise en commun des
données scientifiques depuis
mai 2007

<http://www.carte-du-monde.net/>

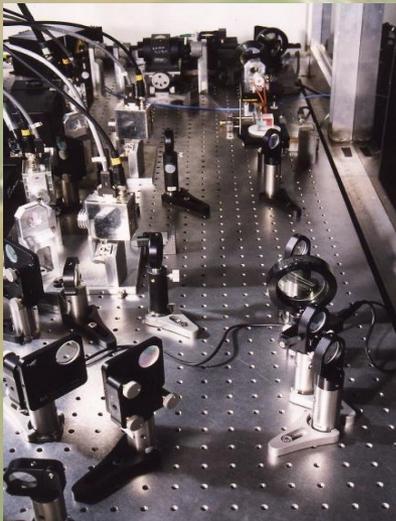
Détection d'OG par interférométrie



Suspension



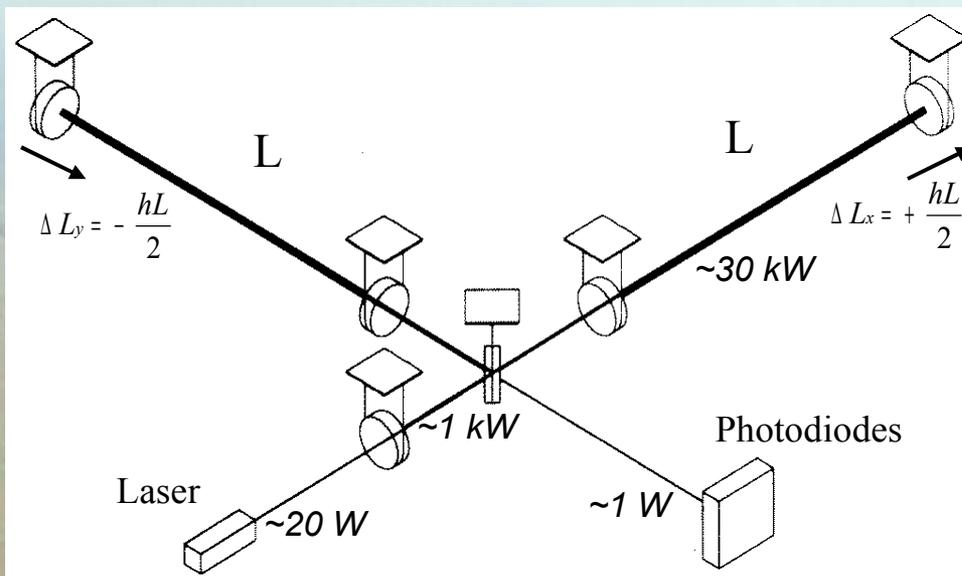
$$\begin{aligned}
 & \text{OG } h(t) \\
 & \downarrow \\
 h(t) &= \frac{\Delta L(t)}{L} \\
 & \downarrow \\
 \Delta\Phi(t) &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L(t) \\
 & \downarrow \\
 P(t) &= \frac{P_{in}}{2} (1 - \cos(\Delta\Phi(t)))
 \end{aligned}$$



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 ($F \sim 50$)

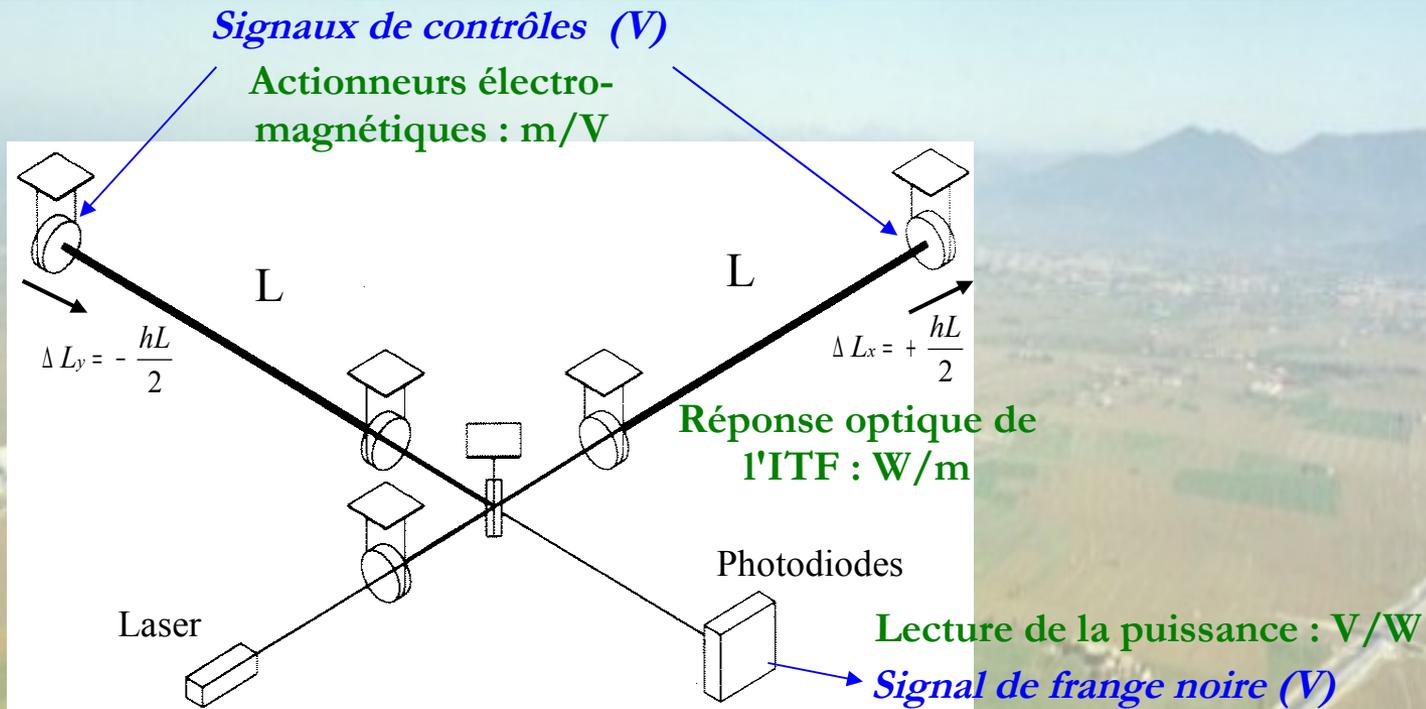
Cavité de recyclage

- 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

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

Class. Quantum Grav. 28 (2011) 025005
arXiv:1009.5190

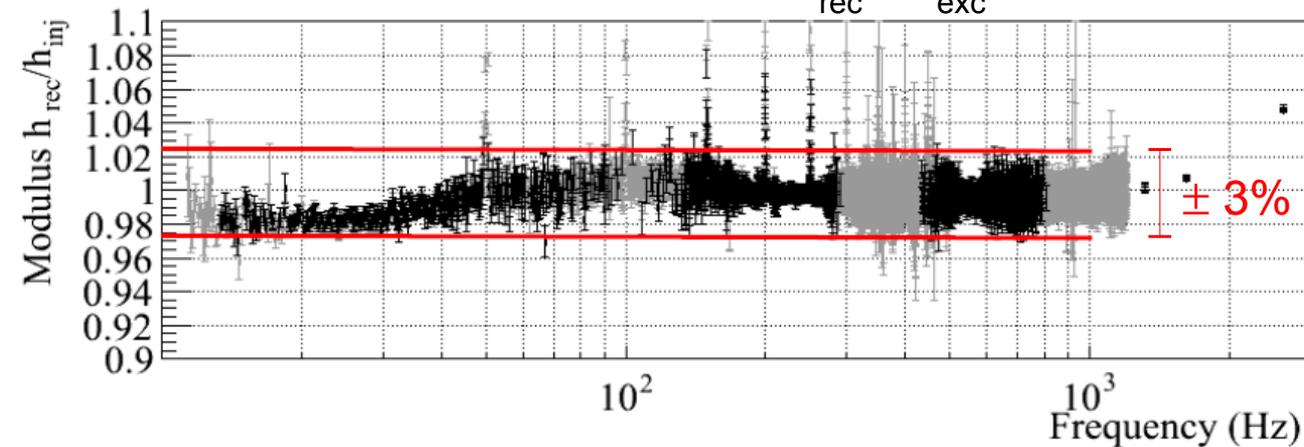
Estimation des erreurs de $h(t)$: h_{rec} vs h_{exc}

- 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}

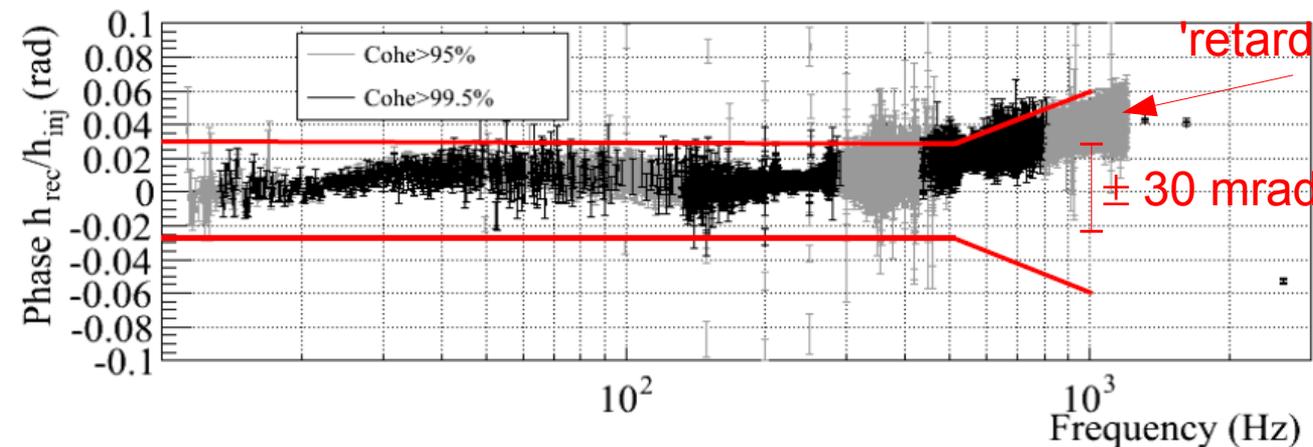


→ Erreurs de $h(t)$
Amplitude

- ~6%

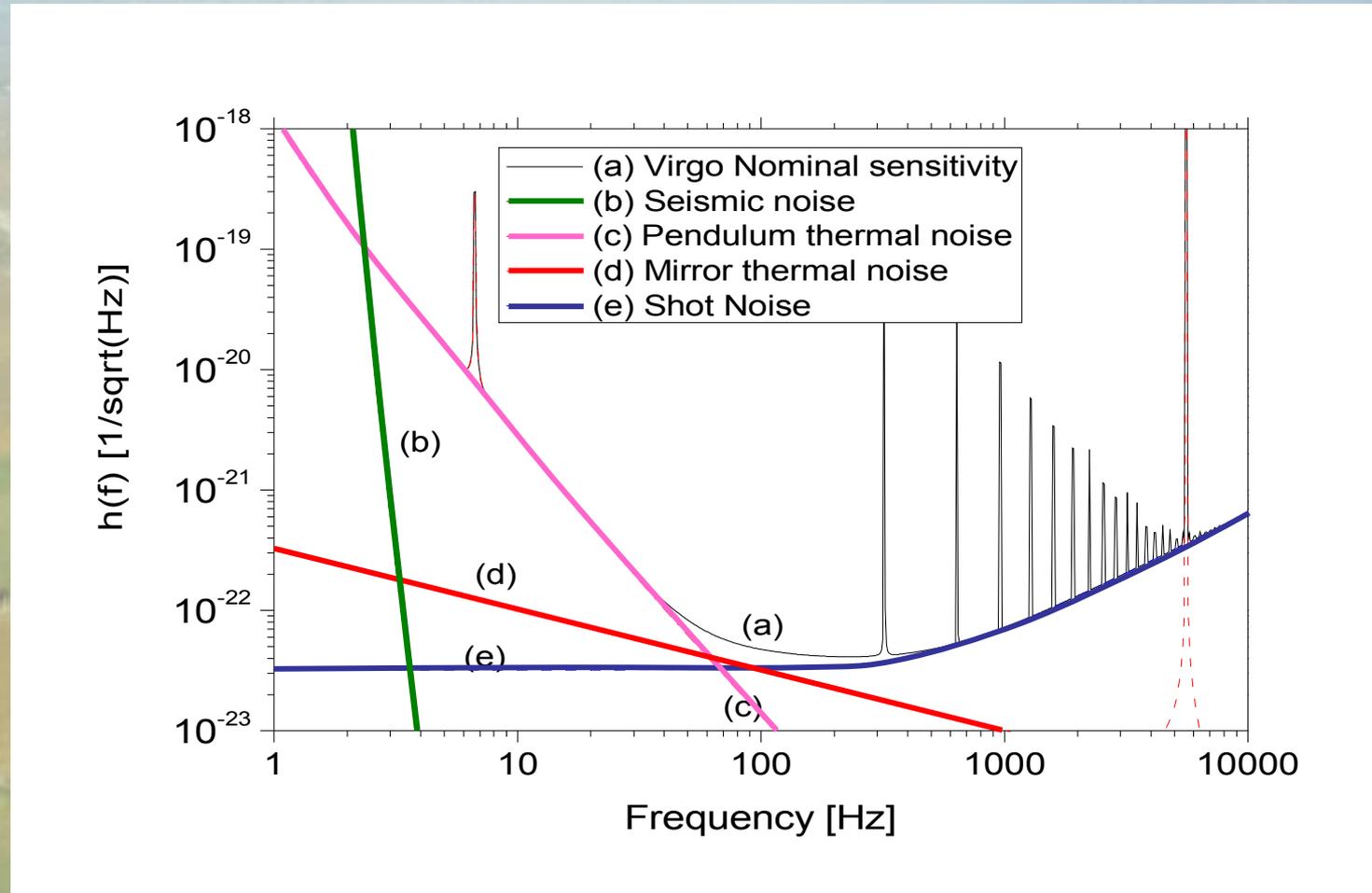
Phase

- $f < 500\text{kHz}$: ~50 mrad
- $f > 3\text{kHz}$: 7 μs

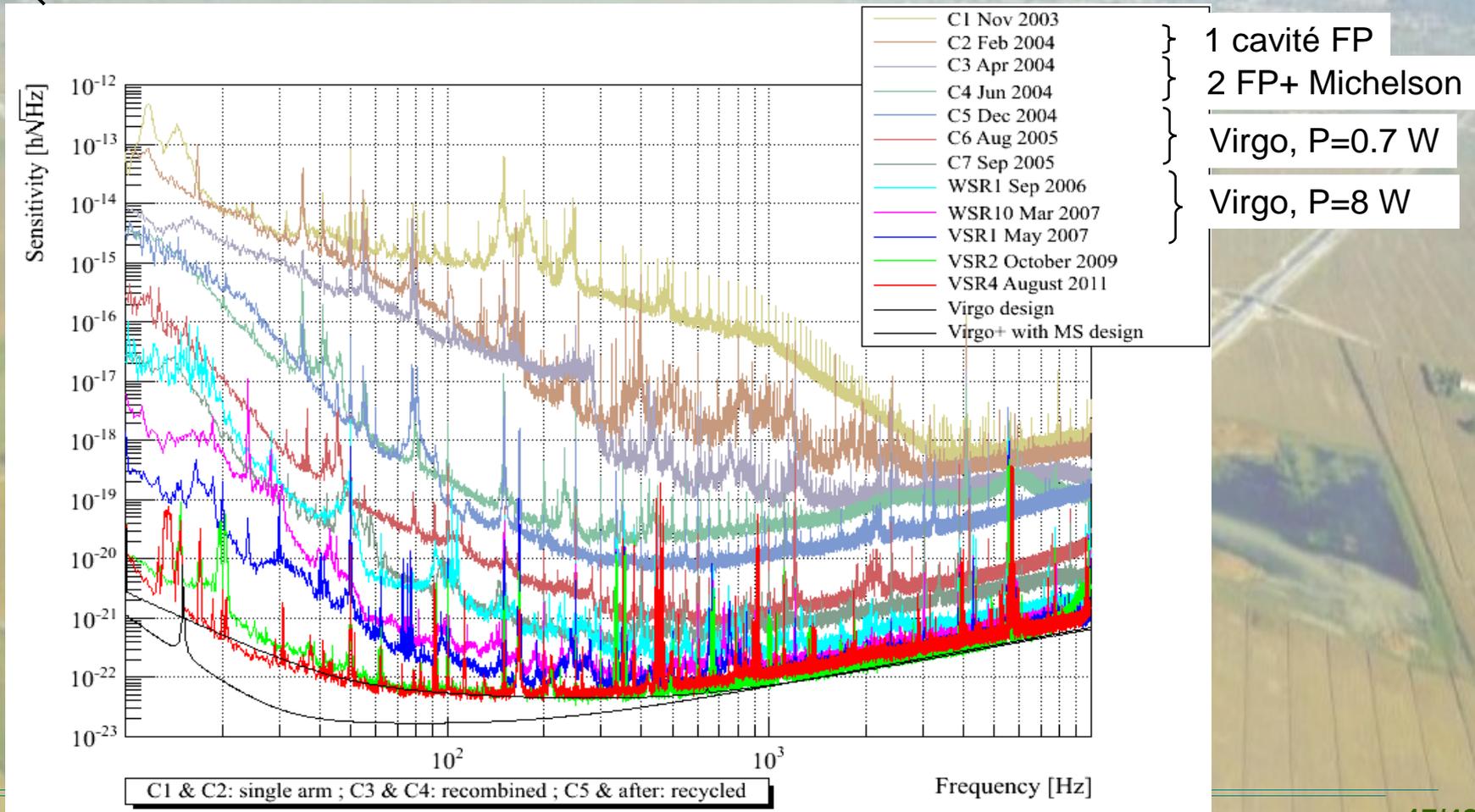
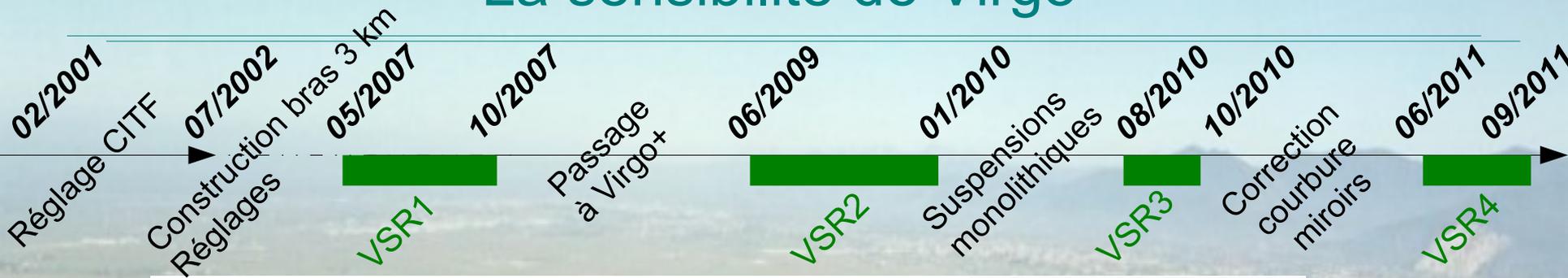


Sensibilité et bruits fondamentaux

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

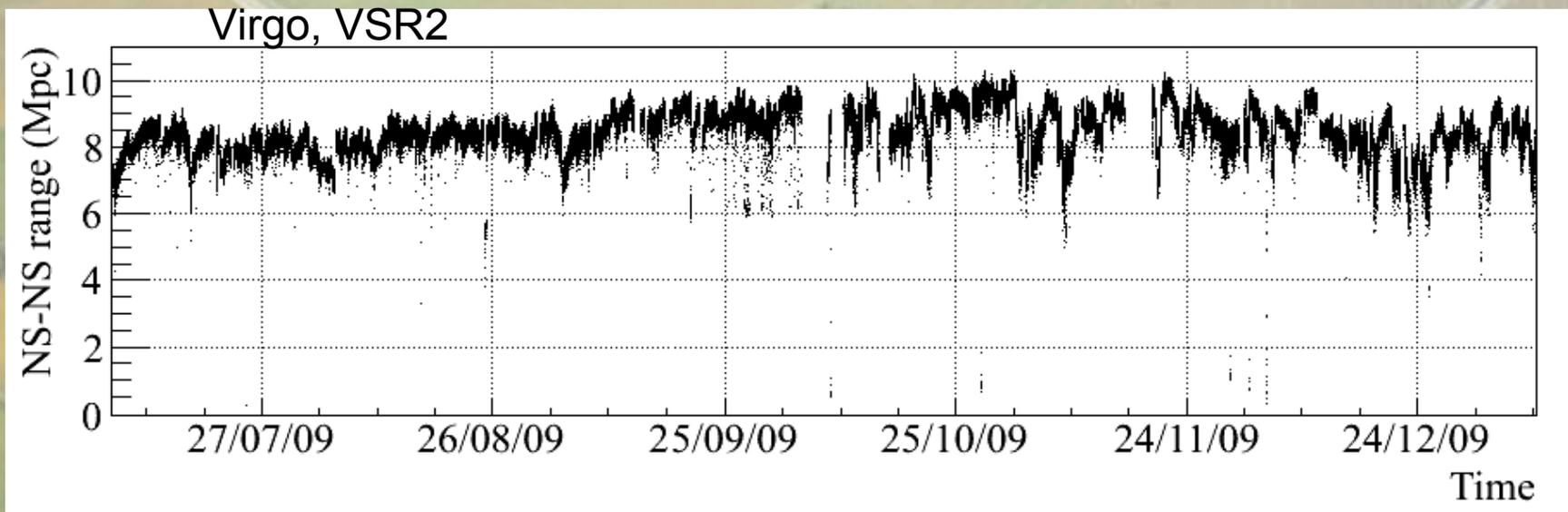
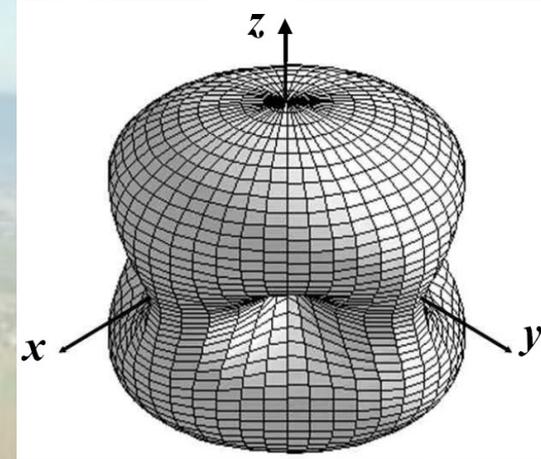


La sensibilité de Virgo

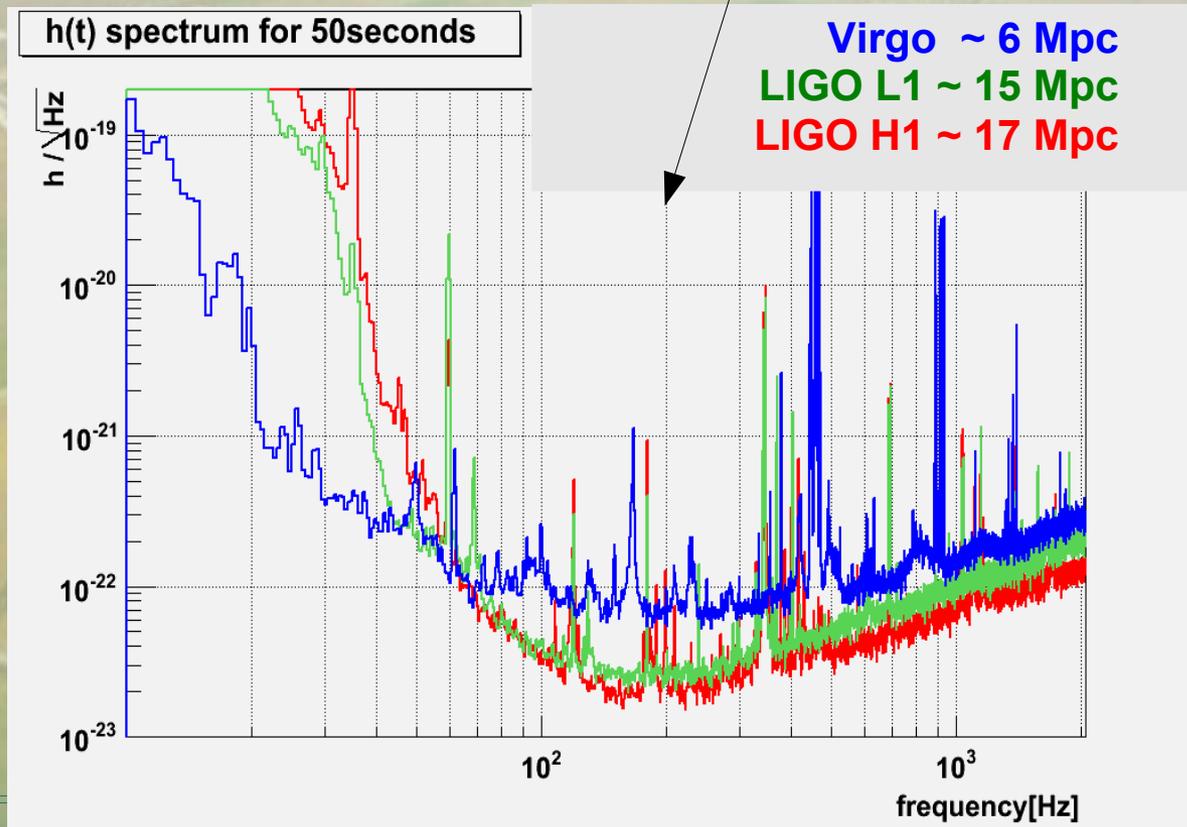
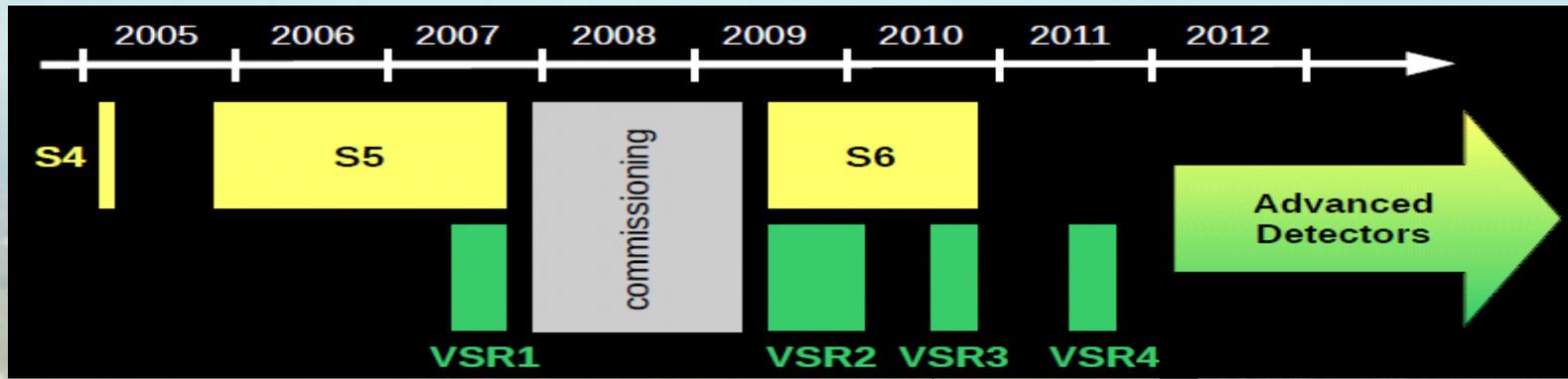


L' « horizon »

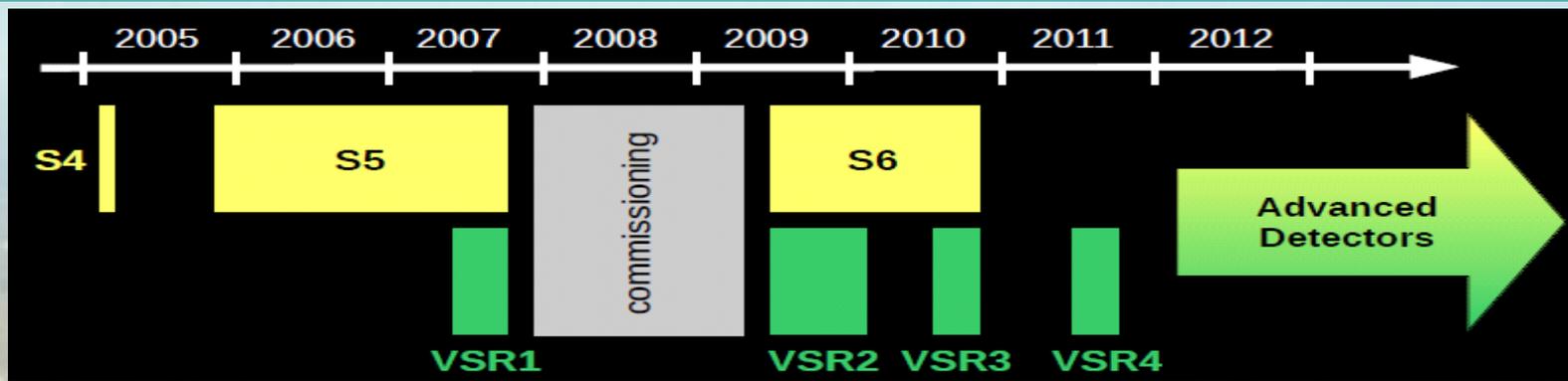
→ distance à laquelle une coalescence de deux étoiles à neutrons serait vue avec un rapport signal/bruit de 8, moyennée sur l'orientation et la direction de la source



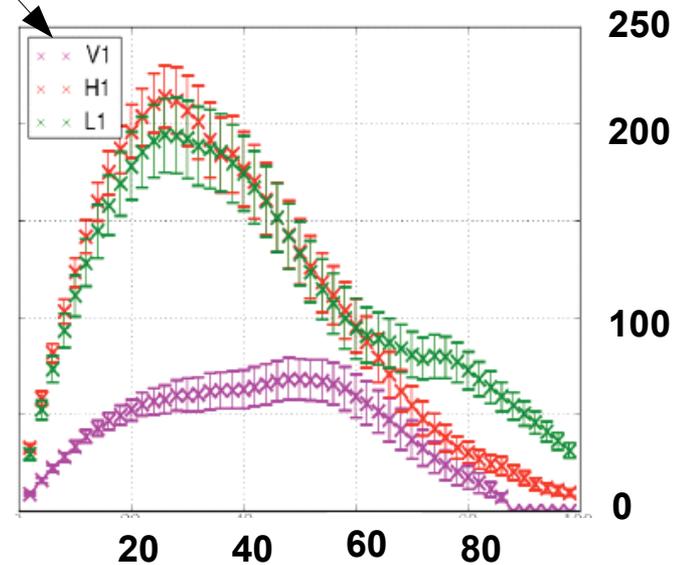
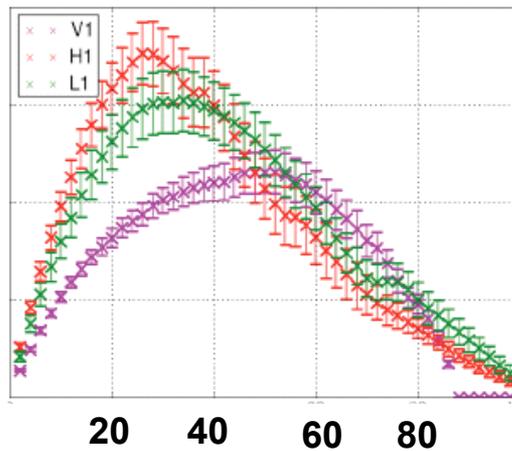
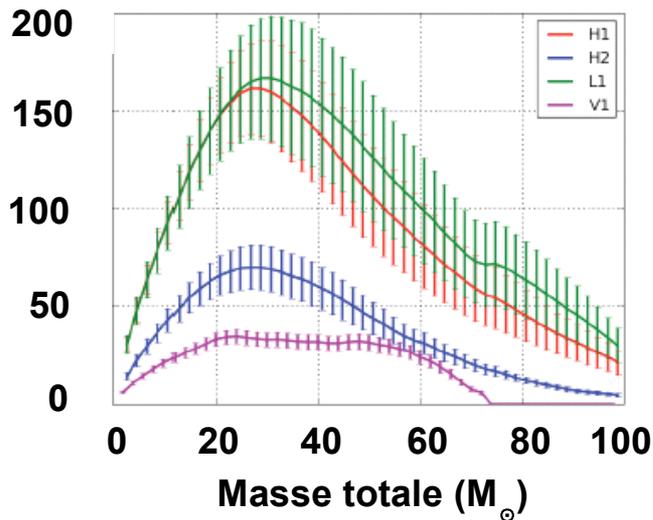
Les prises de données LIGO-Virgo



Les prises de données LIGO-Virgo



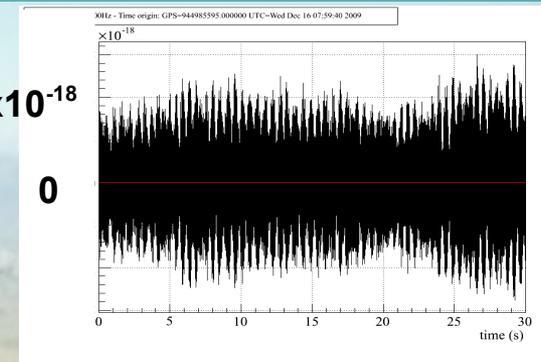
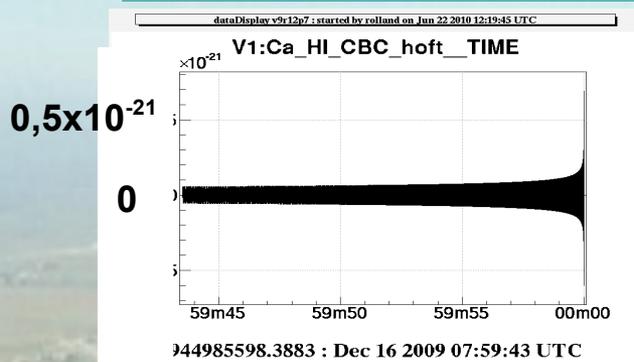
Horizon pour les systèmes binaires (Mpc)





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

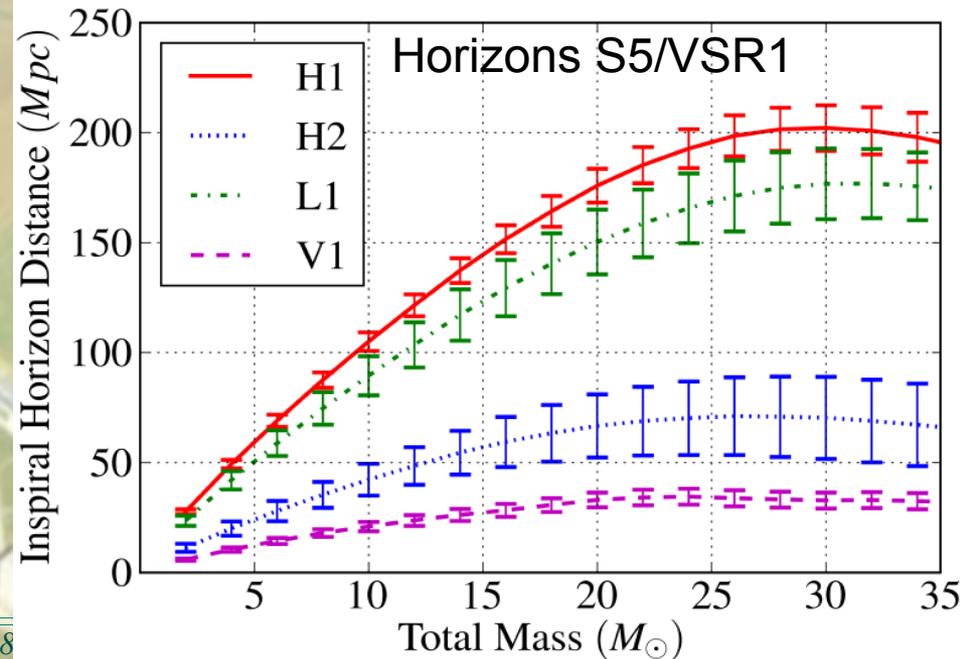
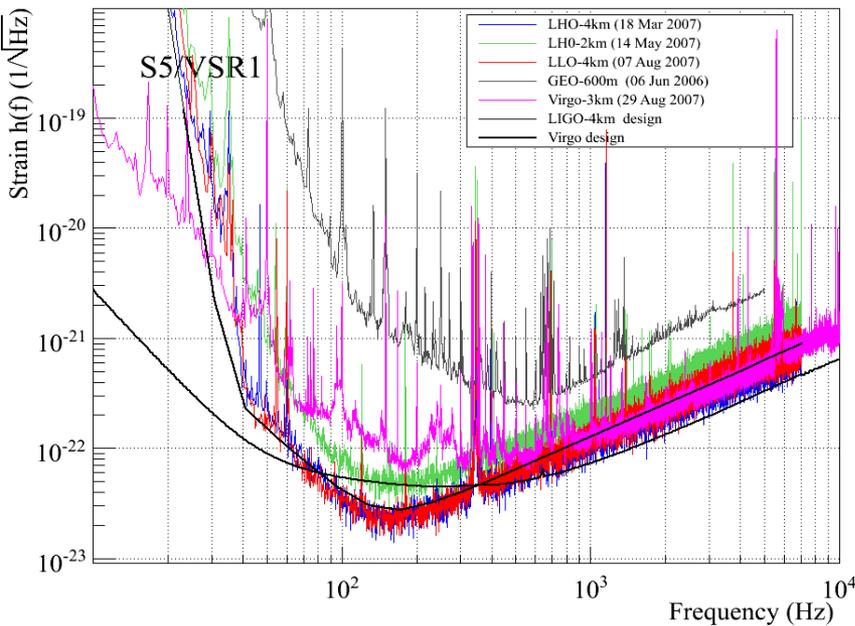
PRD 79, 122001 (2009)
PRD 80, 047101 (2009)

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



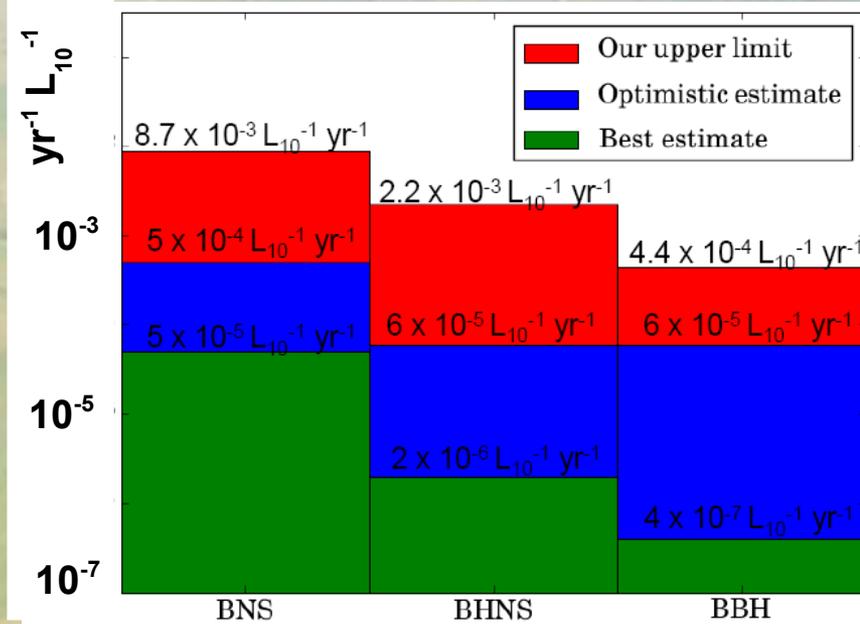
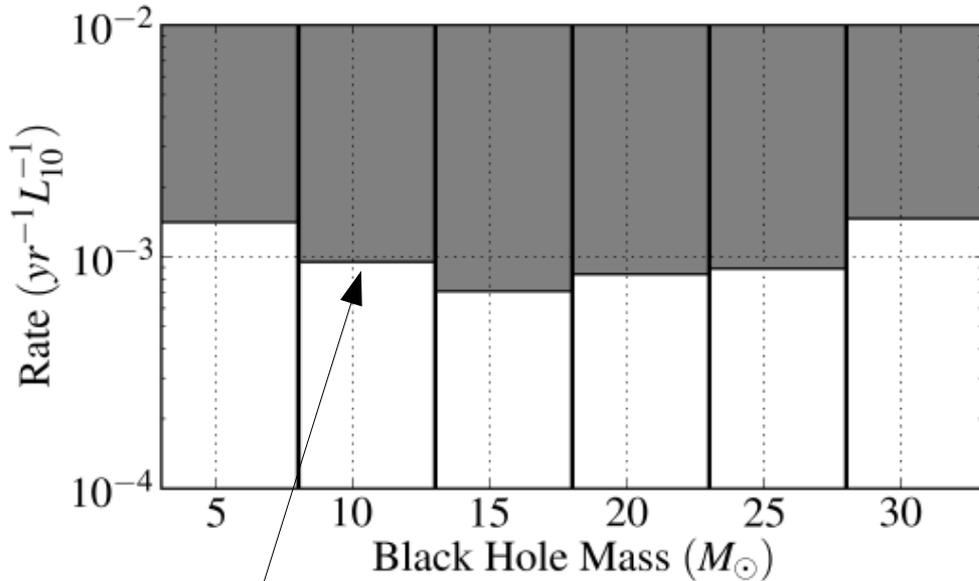
Pas de détection



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

S6/VSR2,3: pas de détection
Publication en préparation

Comparaison avec les taux attendus



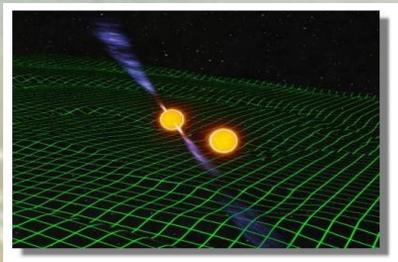
Moins de 1 système binaire de $1.4 M_{\odot} \times 10 M_{\odot}$ fusionne par millénaire dans une galaxie telle que la Voie Lactée... *Phys.Rev.D 82:102001 (2010)*

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

Les sursauts gamma (GRB : gamma-ray burst)

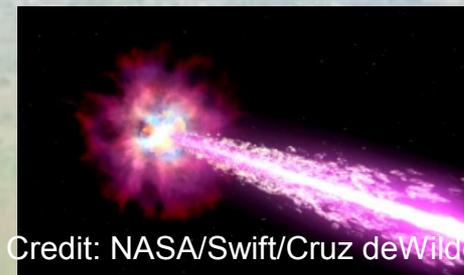
Court (<2s)
Spectre 'dur'

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



Long (>2s)
Spectre 'mou'

→ explosions de supernovae



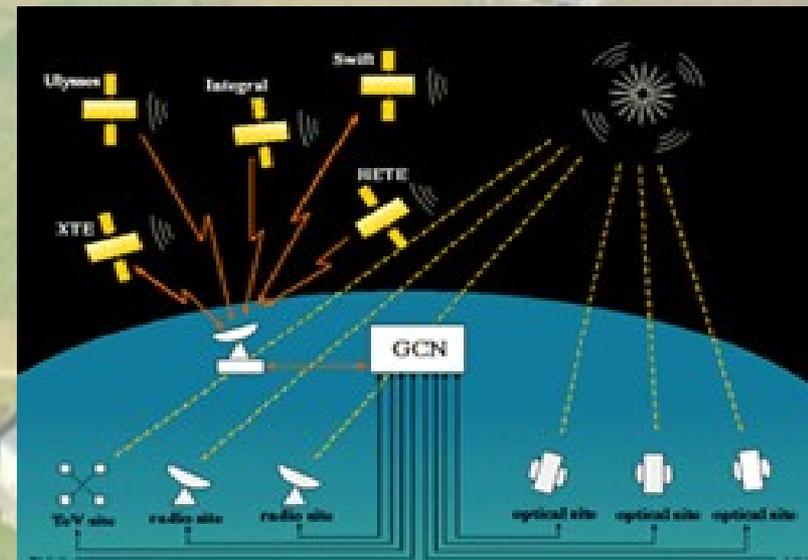
Credit: NASA/Swift/Cruz deWilde

GCN : Gamma-ray bursts Coordinates Network

→ date, direction des GRB
→ distance

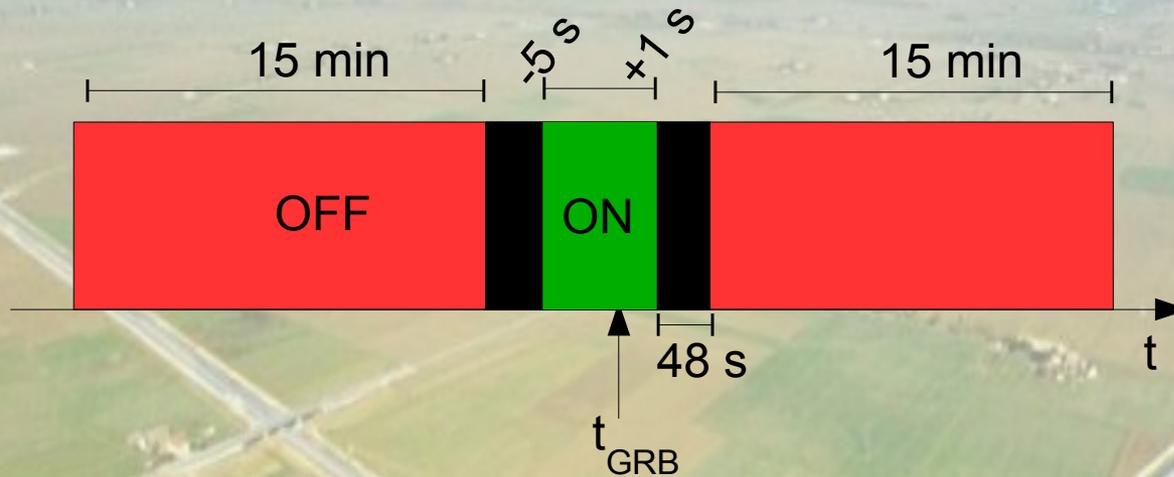
$\langle D \rangle \sim 1 \text{ Gpc}$

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

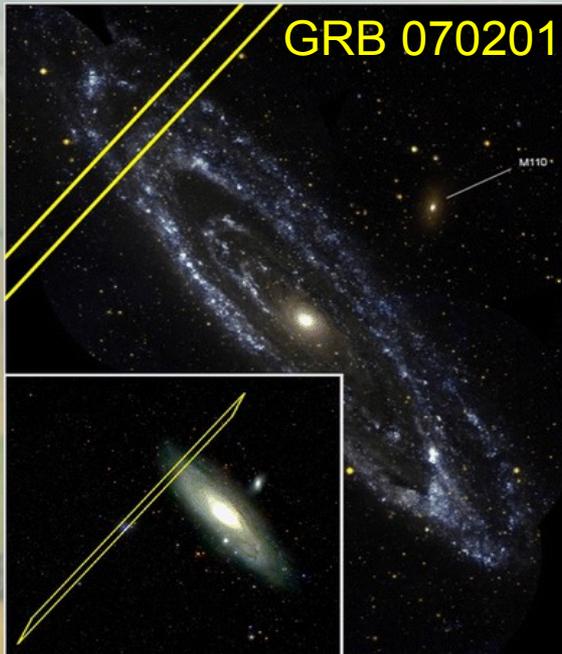


Runs S5/VSR1 : 22 GRBs avec 2 détecteurs d'OG en fonctionnement

GRB courts : limites inférieures sur leur distance

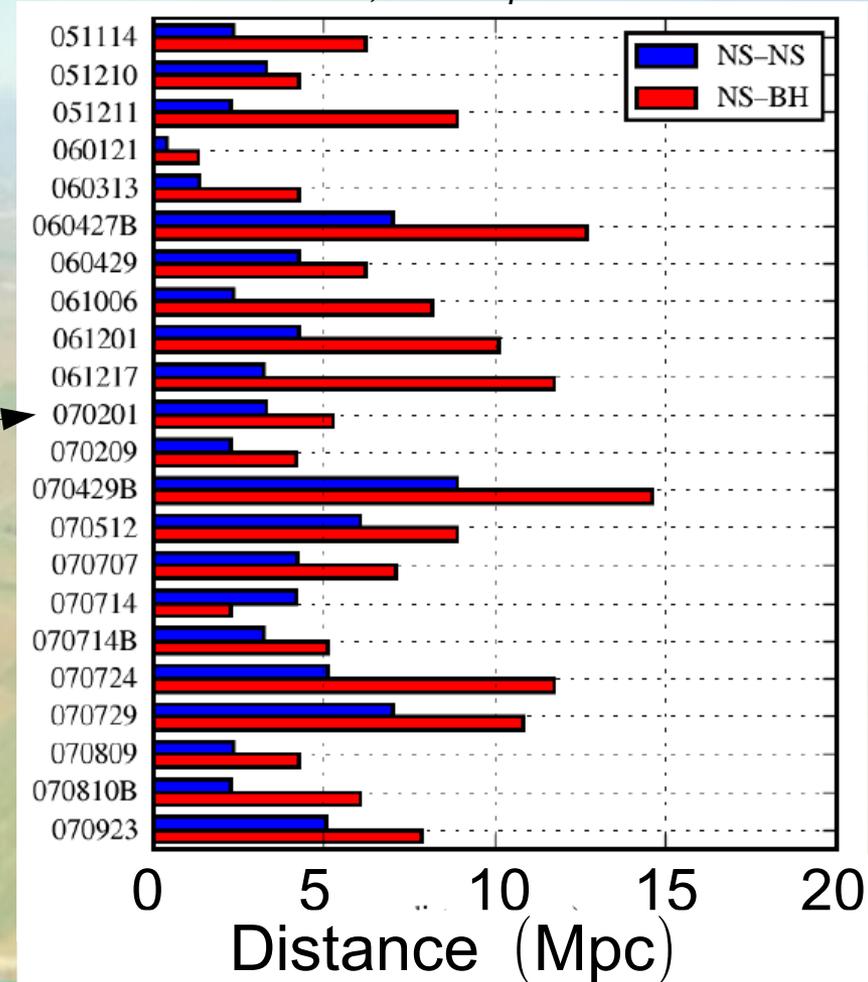
Distance minimale (90% CL) des GRBs

- 2 étoiles à neutrons : $D_{\text{median}} \sim 3.3 \text{ Mpc}$
- étoile à neutron + trou noir : $D_{\text{median}} \sim 6.7 \text{ Mpc}$



$D > 3,5 \text{ Mpc}$

J. Abadie et al, 2010 ApJ 715 1453

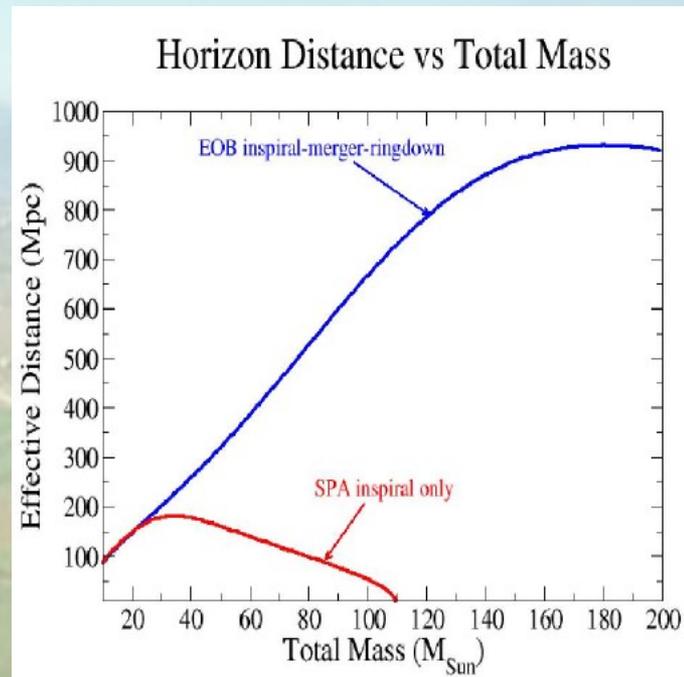
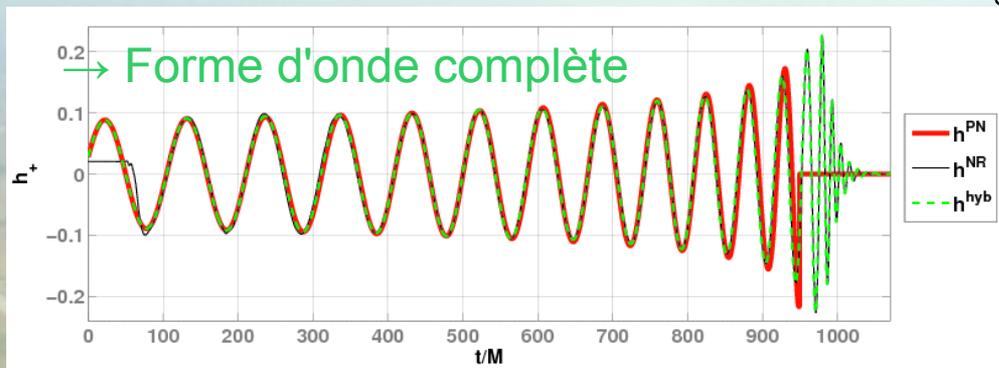


$D > 3.5 \text{ Mpc} \rightarrow$ ce GRB n'était pas une coalescence dans la galaxie d'Andromède !

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

Autres recherches de coalescences

Recherche de systèmes plus massifs : 25 à 100 M_{\odot}



Pas de détection

→ taux de coalescences de trous noirs $< 2 \text{ Mpc}^{-3} \text{ Man}^{-3}$

Phys. Rev. D 83, 122005 (2011)



Recherche de relaxation de trous noirs

➤ 10 à 500 M_{\odot}

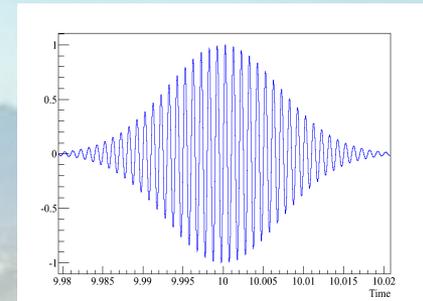
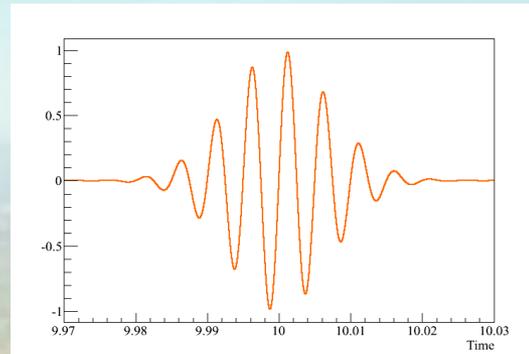
Phys. Rev D 80, 062001 (2009)

Prise en compte du **spin des objets**

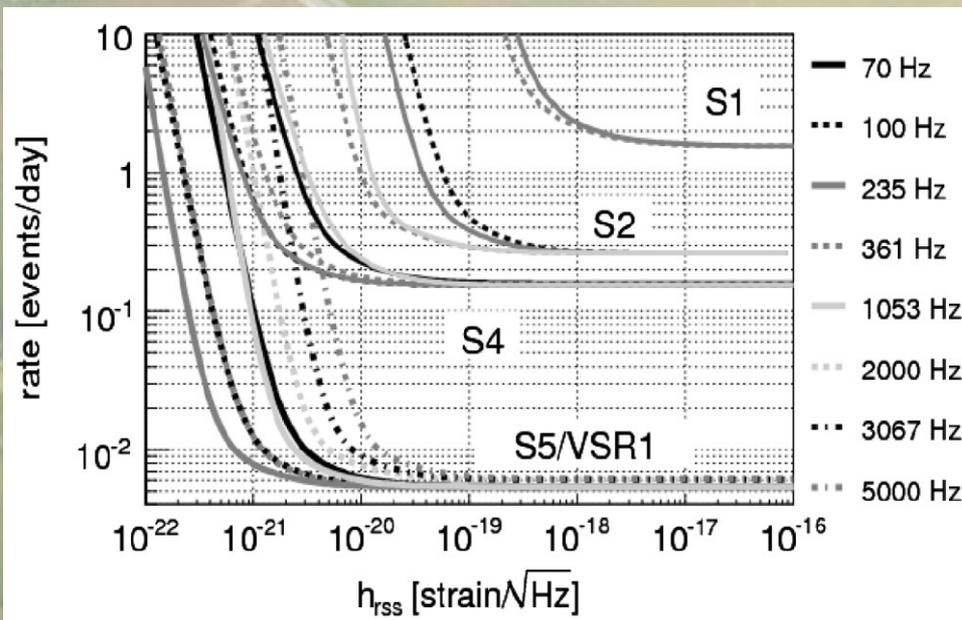
➤ en cours de développement

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)

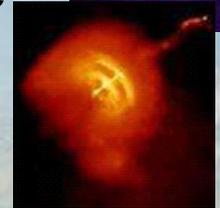
J. Abadie et al, PRD 81, 102001 (2010)

Et les étoiles à neutrons ?

Pulsars du Crabe (~30 Hz) et de Vela (~12 Hz)

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

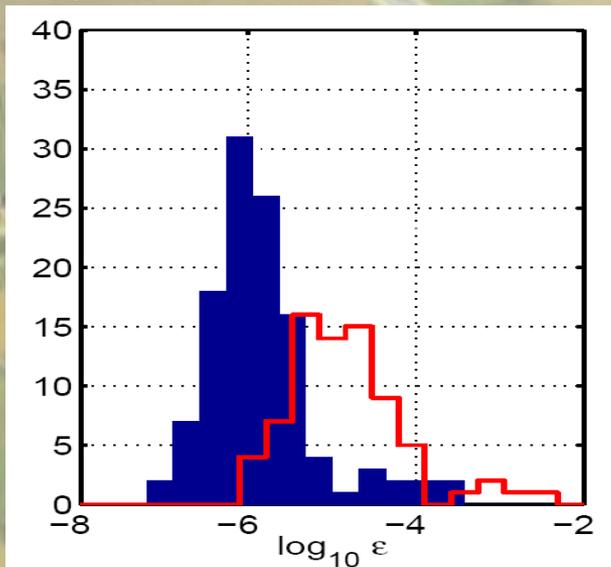
→ moins de 2% / 35% de cette énergie est émise sous forme d'OG



ApJ 683(2008) L45-L49
ApJ 737 (2011), 93 (16pp)

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

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

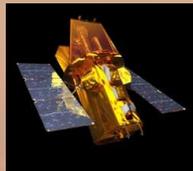


→ l'écart à la sphéricité des étoiles à neutrons ($r \sim 10$ km) est inférieur à ~ 1 cm !

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

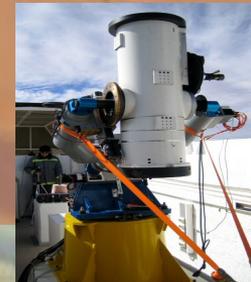
Alertes pour les observatoires

Télescopes en radio et optique

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

Satellite X

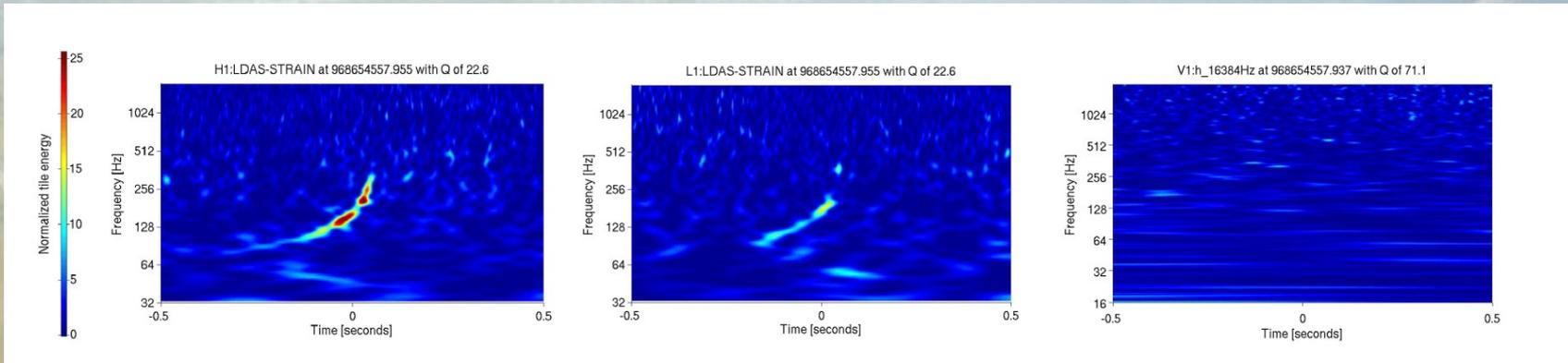
Swift/XRT



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

The « Big-Dog »: un événement pendant S6/VSR3 ?

- ▶ Événement **détection en-ligne** le 16 septembre 2010 (analyse 'burst')
 - alerte vers les télescopes optique et X
- ▶ Evolution temps-fréquence compatible avec une **coalescence**



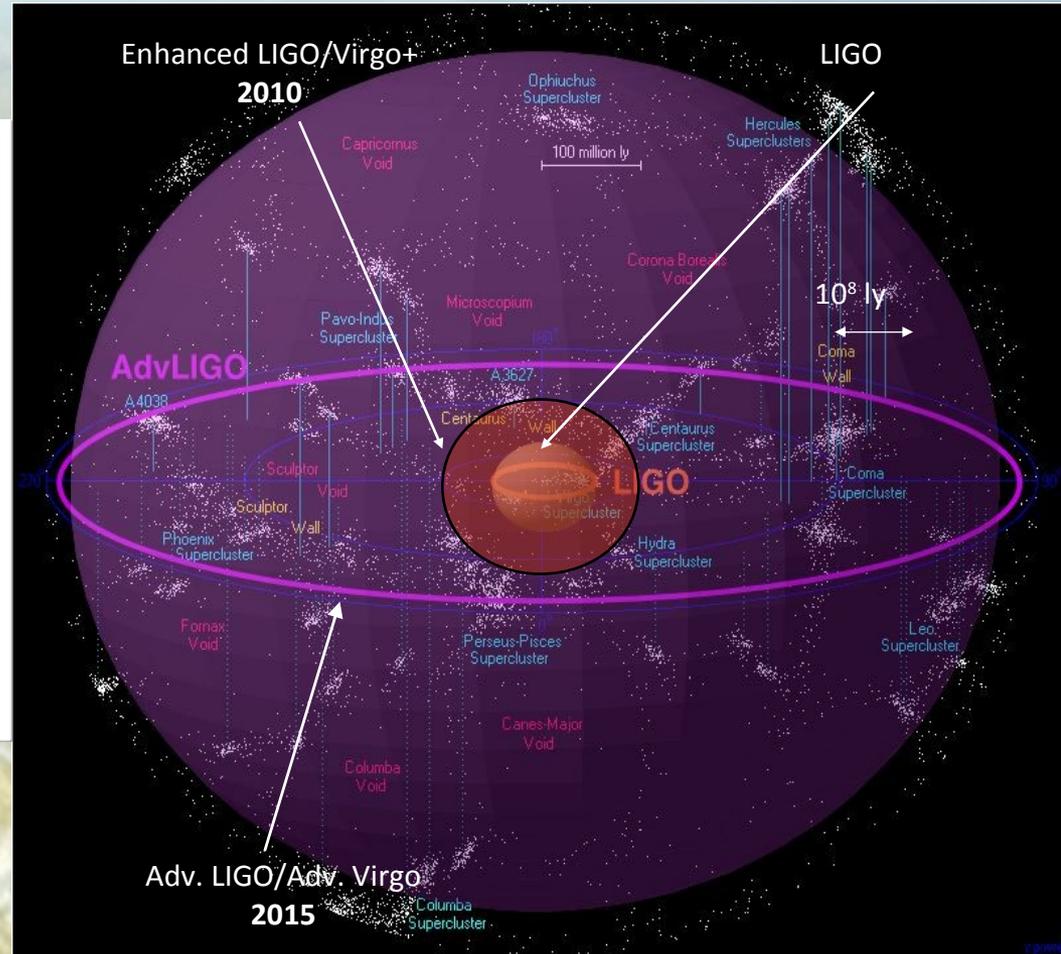
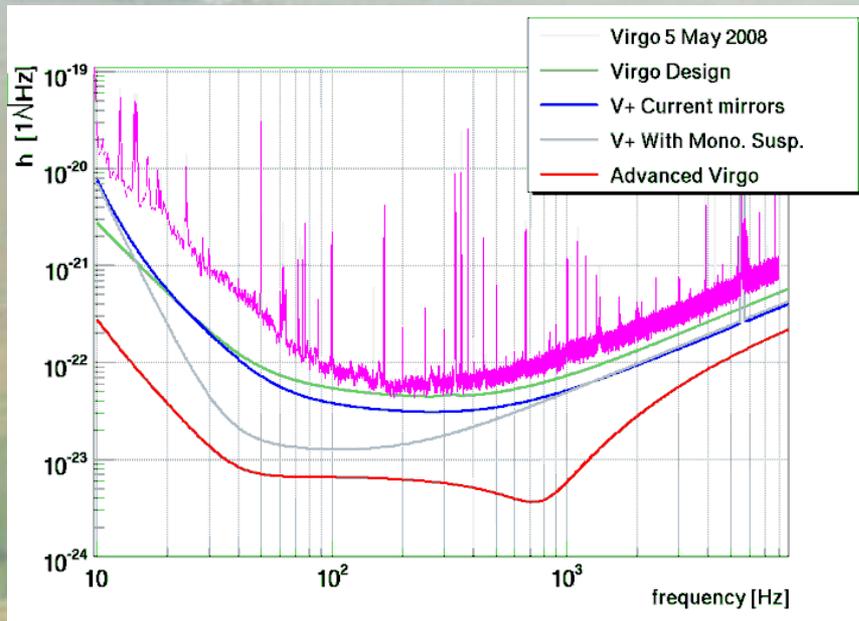
- ▶ Recherche de coalescences sur le **run complet**
 - événement le plus significatif
 - coincidence double H1-L1 : signal-sur-bruit ~ 12.5
 - indication de signal dans Virgo
 - taux de fausse alarme bas : **1/7000 an**
- ▶ Rédaction d'un papier pour PRL : « Evidence for the direct detection... »
- ▶ C'était finalement une **injection en aveugle** (dévoilée en mars 2011)
 - une bonne épreuve pour l'analyse !!

An aerial photograph of the VIRGO gravitational wave observatory. The image shows two long, V-shaped arms of the interferometer extending across a rural landscape of green and brown fields. At the vertex of the V, there is a large, circular central building. The background shows a town and distant mountains under a clear blue sky.

En route vers le futur....

Les détecteurs de 2ème génération

AdvancedVirgo, AdvancedLIGO : construction 2011-2014



Credit: R.Powell, B.Berger

Taux de détection prévus (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

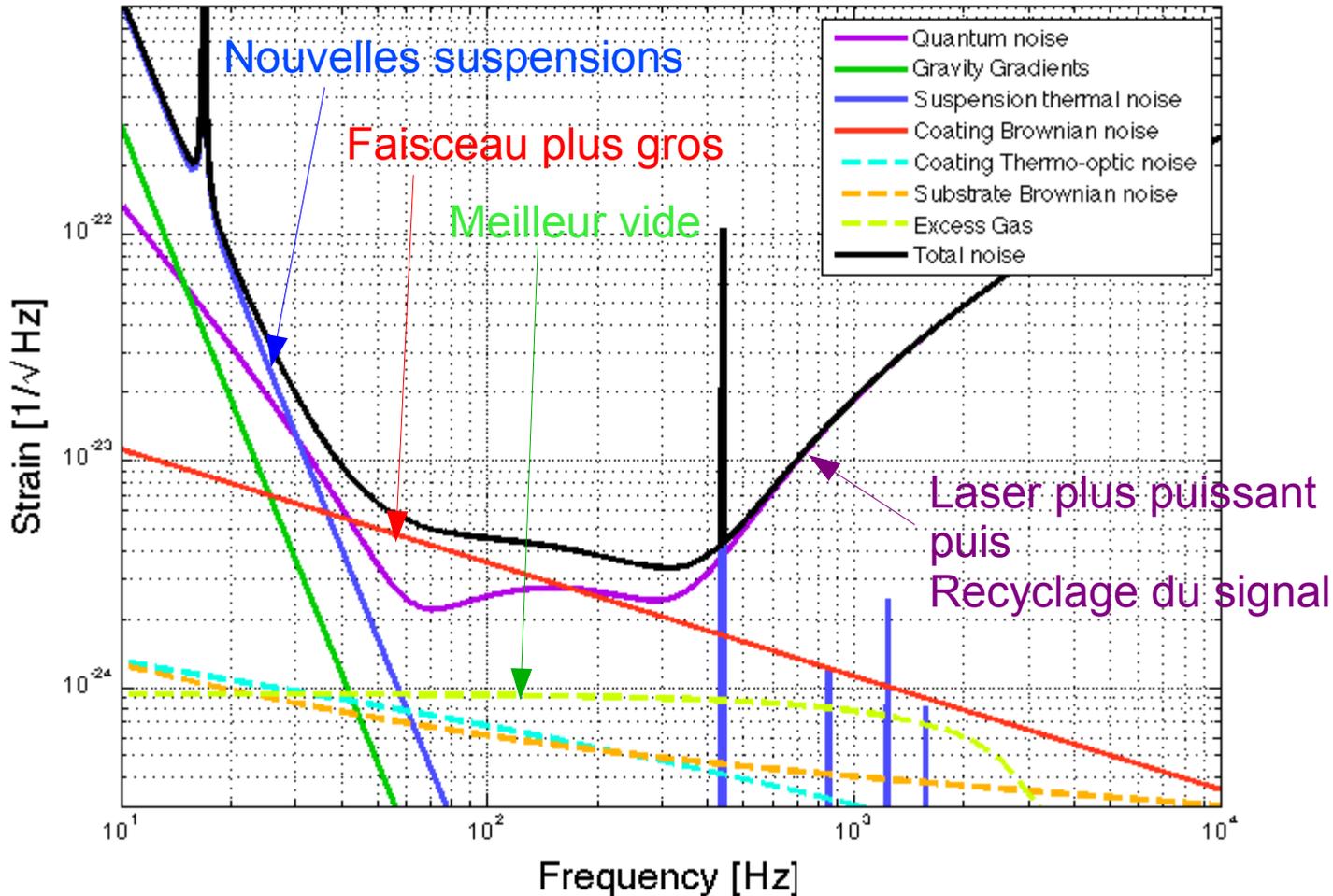
Estimation optimiste

	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 ?

AdV Noise Curve: $F_{in} = 125.0 \text{ W}$



2012

2013

2014

2015

2016...

Construction

Commissioning

1ère prise de données
et commissioning

Les autres interféromètres en construction

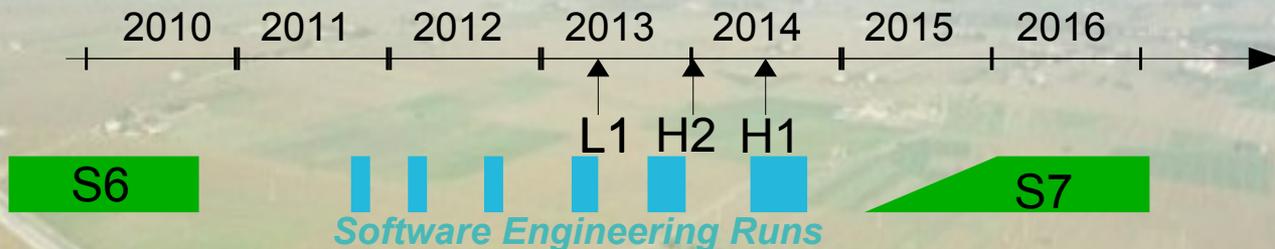
Advanced LIGO

démarré le 20 octobre 2010

~1/2 budget dépensé

certains systèmes en cours d'installation

réglages et optimisations à partir de 2015 → vers le design



Advanced Virgo

septembre 2011

arrêt de Virgo+ : mars 2012



LIGO-Australia ?

« déplacer » H2 en Australie
 approuvé par la NSF
 → décision en octobre

LCGT (Japon)

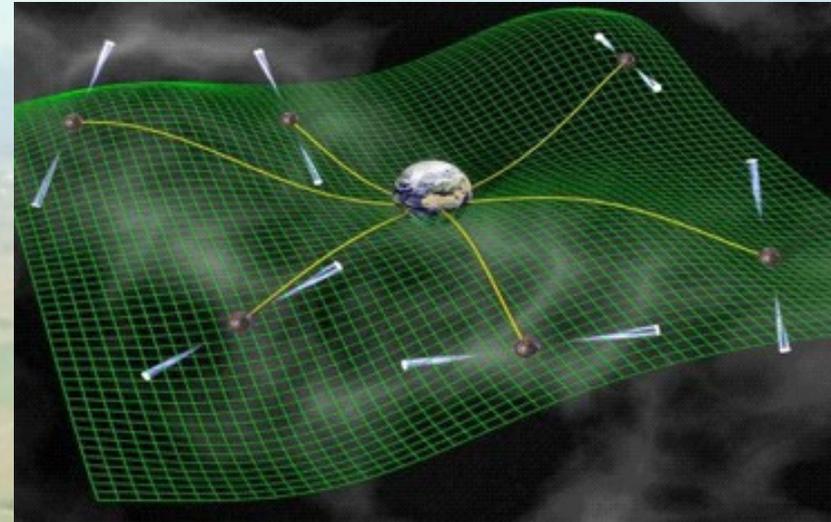
interféromètre de 3 km souterrain (Kamioka)
 approuvé en 2010
 construction pour 2015, puis cryogénie

Pulsar Timing Array (PTA)

Observation de ~ 20 pulsars millisecondes
résidus de la modélisation < 100 ns
échantillonnage hebdomadaire sur 5 ans

Détection d'OG de $\sim 10^{-9}$ Hz and 10^{-8} Hz
→ trous noirs supermassifs $\sim 10^9 M_{\odot}$

Réseau international
Parkes PTA
North American NanoHertz Gravitational Wave Observatory
European PTA



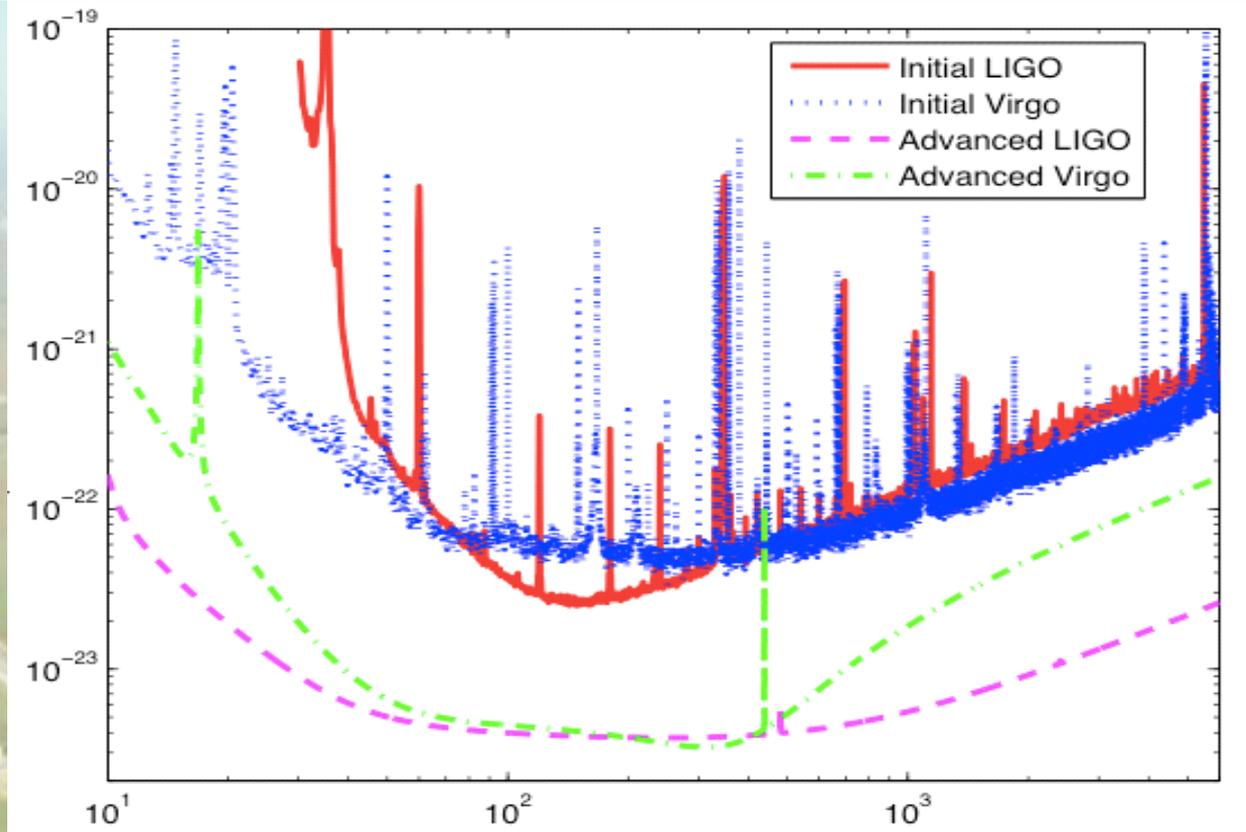
Premières détections possibles d'ici 5 à 10 ans !!

Et toujours plus loin... après 2020

Elargir la bande-passante

Pulsar Timing Array (PTA)

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

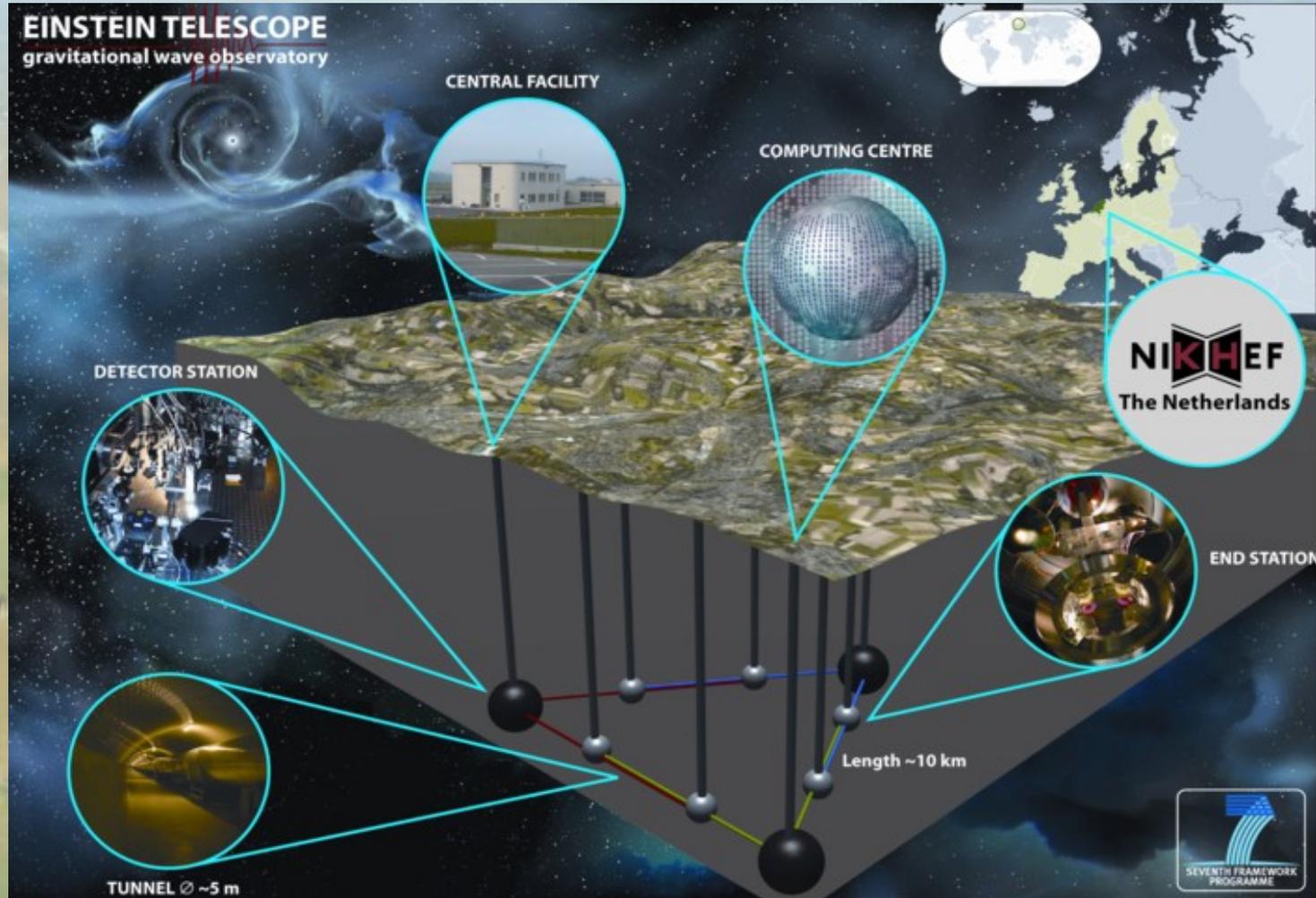


Améliorer la sensibilité

Einstein Telescope (ET)

Détecteur terrestre de 3ème génération : Einstein Telescope

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



Détecteur spatial : LISA

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

~~Projet ESA/NASA~~

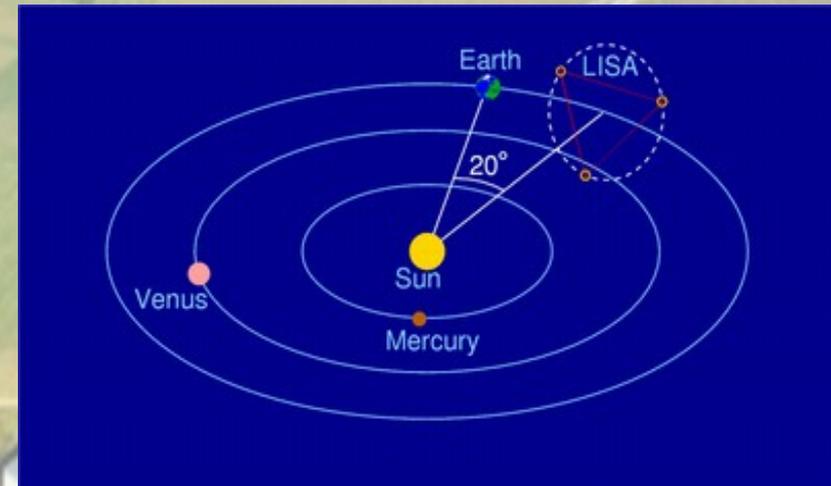
- asservissement en fréquence
- vol en formation, asservissement en position
- contraintes spatiales

Étape préliminaire : LISA Pathfinder

- lancement mi-2012 ?

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

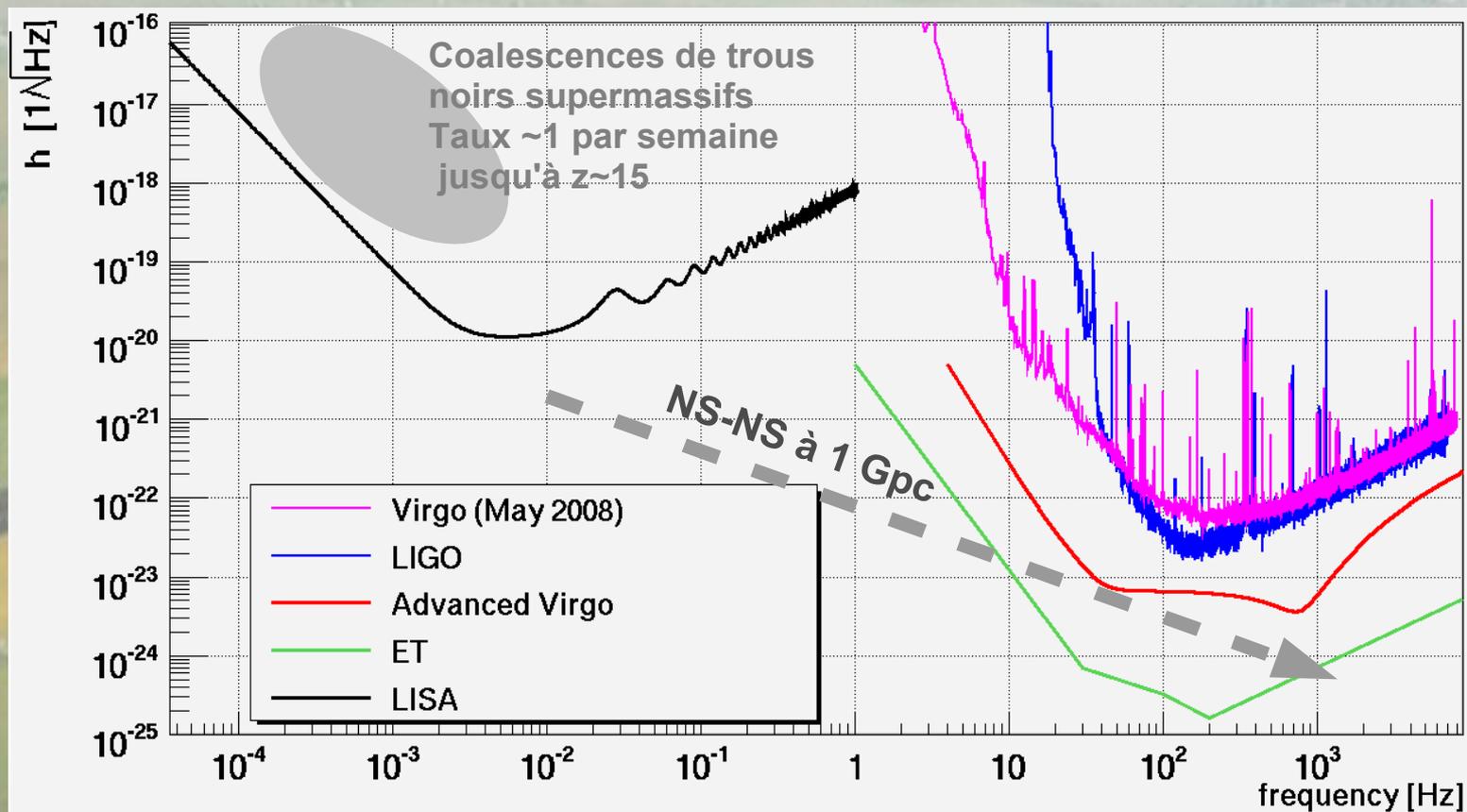
Prises de données,
analyses en cours

2ème génération

Début de l'astronomie
gravitationnelle

3ème génération

Des détections quotidiennes ?



FFN

