



# Virgo et les Ondes Gravitationnelles

Nicolas Leroy

Laboratoire de l'accélérateur linéaire

Séminaire GReCO – 16 avril 2007

# Courte introduction

- Ondes gravitationnelles :
  - Faible perturbation de l'espace-temps
  - Célérité  $c$
  - 2 types de polarisation : + et x
  - Émise par des mouvements quadrupolaires :

$$P = \frac{G}{5c^5} \left\langle \ddot{Q}_{\mu\nu} \ddot{Q}^{\mu\nu} \right\rangle$$

# Ordres de grandeurs

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

Énergie émise :

$$E = \epsilon^2 \frac{c^5 R_s^2 v^6}{G R^2 c^6}$$

- $\epsilon$  asymétrie de la source
- $R_s$  rayon de Schwarzschild
- $R$  rayon de la source
- $v$  vitesse caractéristique de la source

Pour être détectable :

- astre compact
- grande asymétrie du système
- mouvement relativiste

Supernovae

10 Msun @ 10 kpc

$h \sim 10^{-21}$

NS-NS @ 10 Mpc

$h \sim 10^{-20}$

# Quelques sources

## ■ Bursts

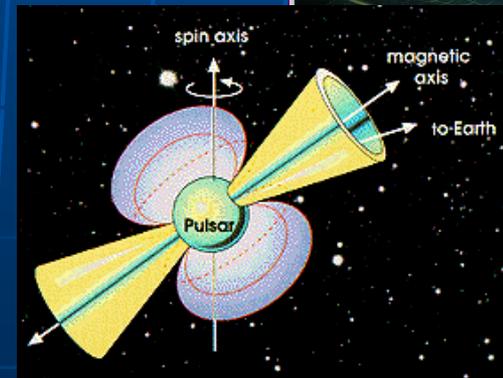
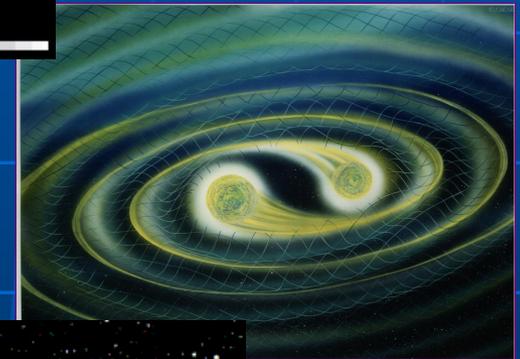
- Supernovae
- Désexcitation de trou noir

## ■ Système binaires

- Couples étoiles à neutrons
- Couples de trous noirs
- Couple mixte

## ■ Sources périodiques (pulsars)

- Fond stochastique
- Autres ?

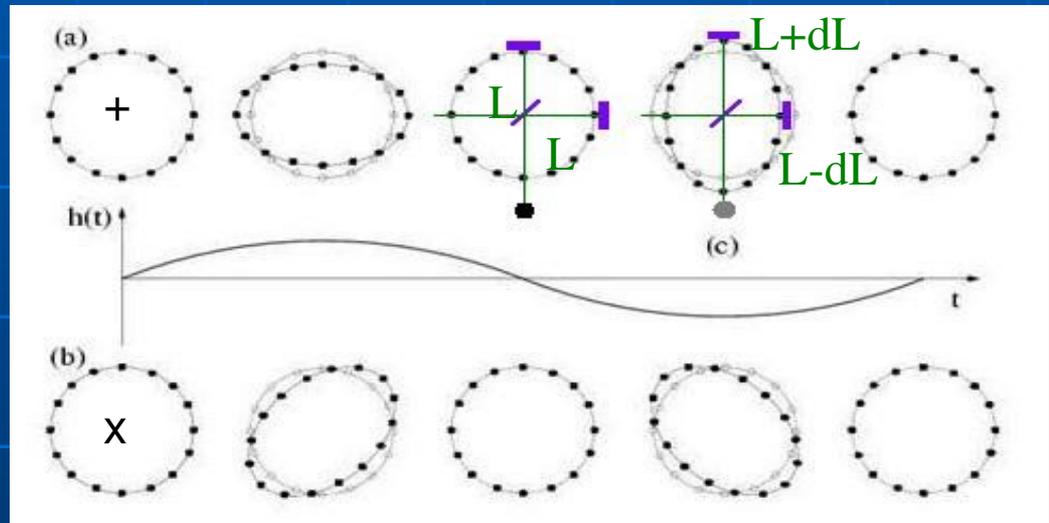


# Comment les détecter

Effet du passage d'une OG sur un ensemble de masses libres

Amplitude de l'onde :

$$h = \frac{\delta L}{L}$$



Effet différentiel :  
principe de l'interférométrie de Michelson  
semble adapté

# Comment les détecter - 2

Miroir de fond

Cavité Fabry-Perot

$$h_{min} \propto \frac{1}{L} \frac{1}{\sqrt{P}}$$

- Bras kilométriques
- Cavités Fabry-Perot
- Laser de haute puissance
- Miroir de recyclage

Miroir d'entrée

Séparatrice

$$h_{min} \approx 10^{-23}$$

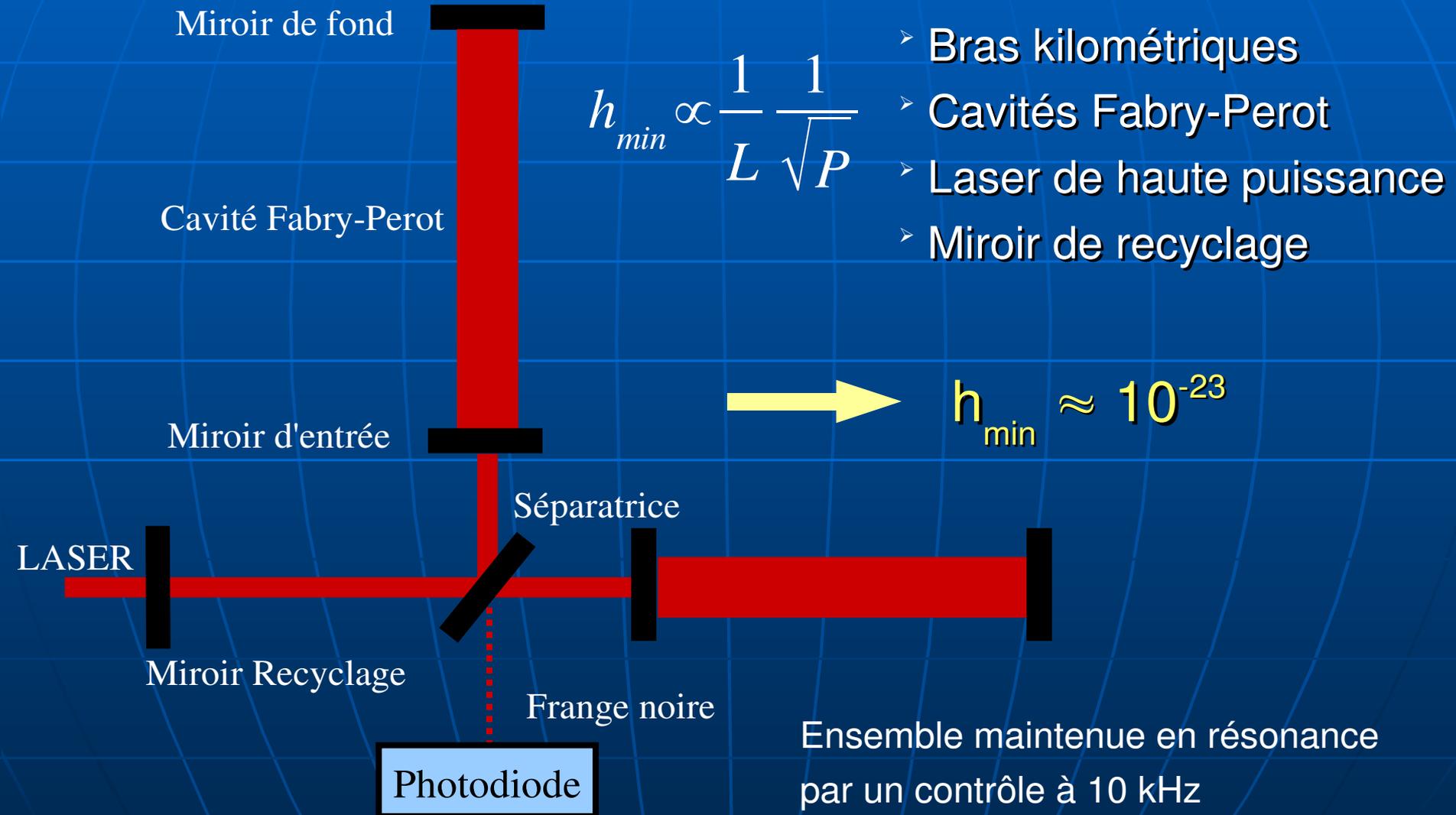
LASER

Miroir Recyclage

Frange noire

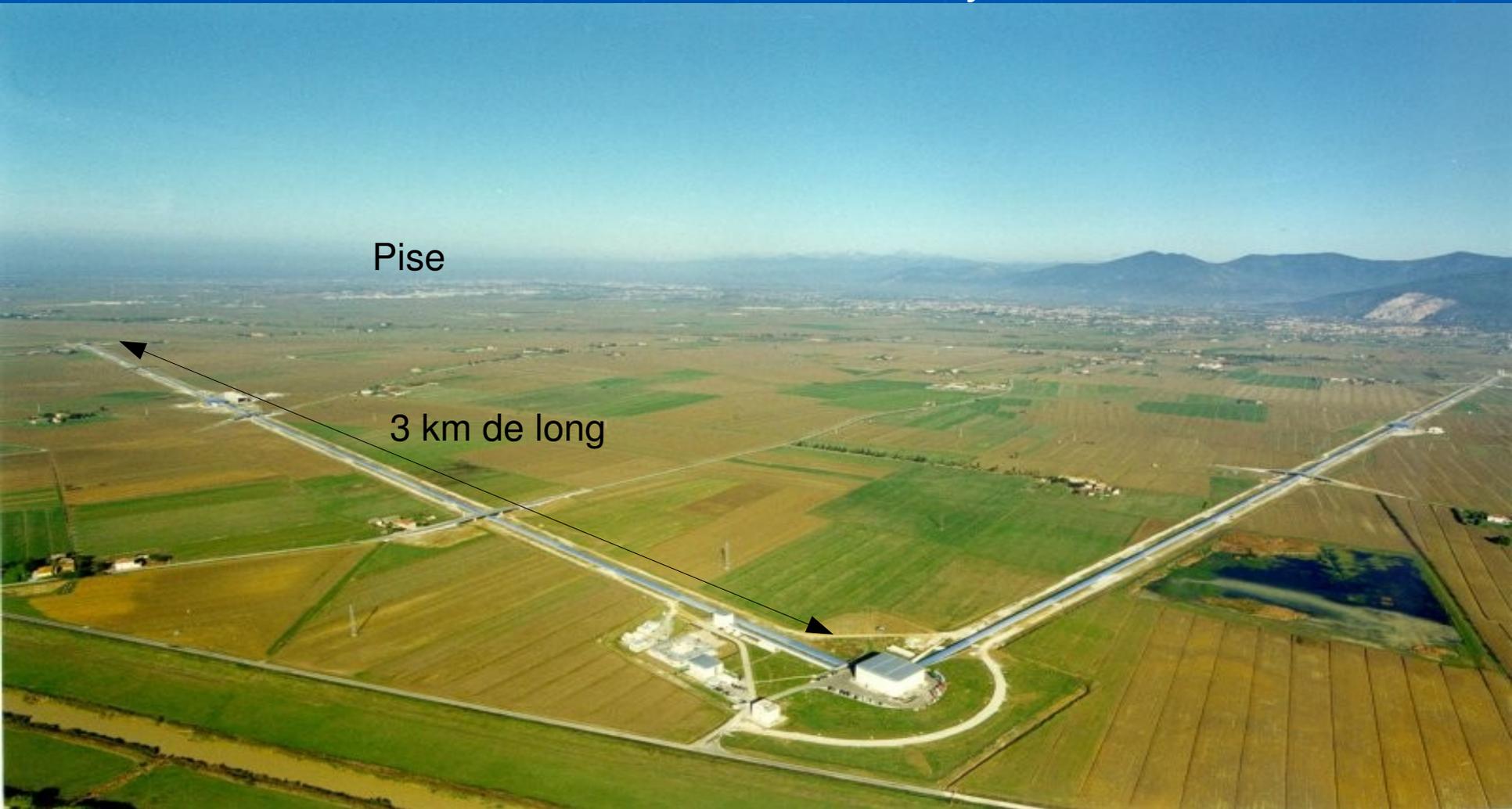
Photodiode

Ensemble maintenue en résonance  
par un contrôle à 10 kHz



# Virgo : un état des lieux

Interféromètre de Michelson recyclé sous vide



# Virgo : un état des lieux

- CNRS - LAPP - Annecy
- INFN - Firenze/Urbino
- CNRS - LMA/ESPCI – Lyon/Paris
- INFN – Napoli
- CNRS - OCA – Nice
- CNRS - LAL - Orsay
- INFN - Perugia
- INFN - Pisa
- INFN – Roma

+ EGO (European Gravitational Observatory)

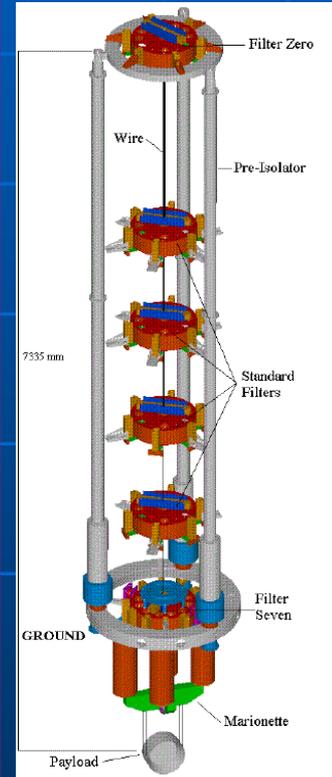
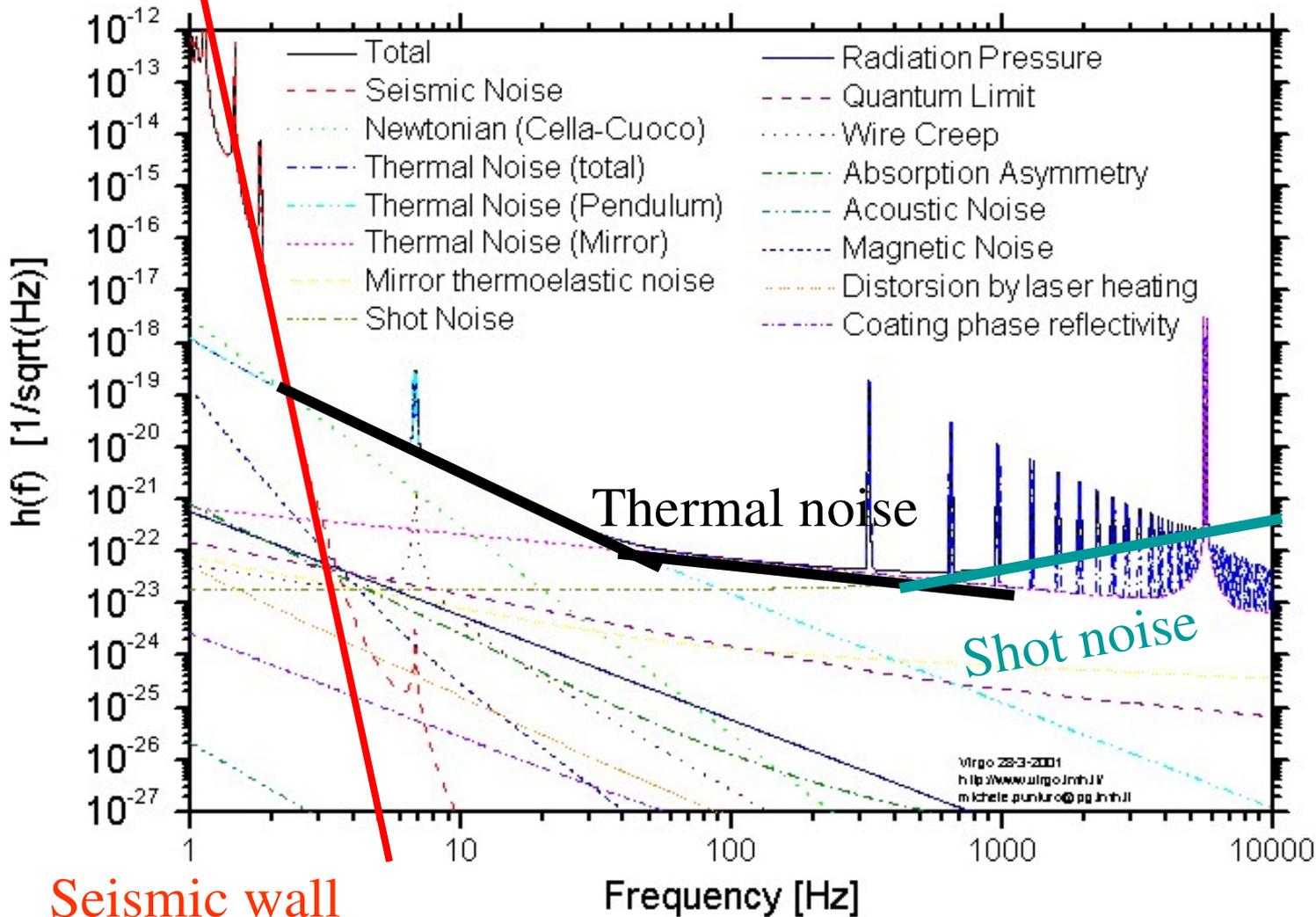
→ 175 physicists / engineers

**2006: NIKHEF – Amsterdam**

**Tor Vergata – Roma**

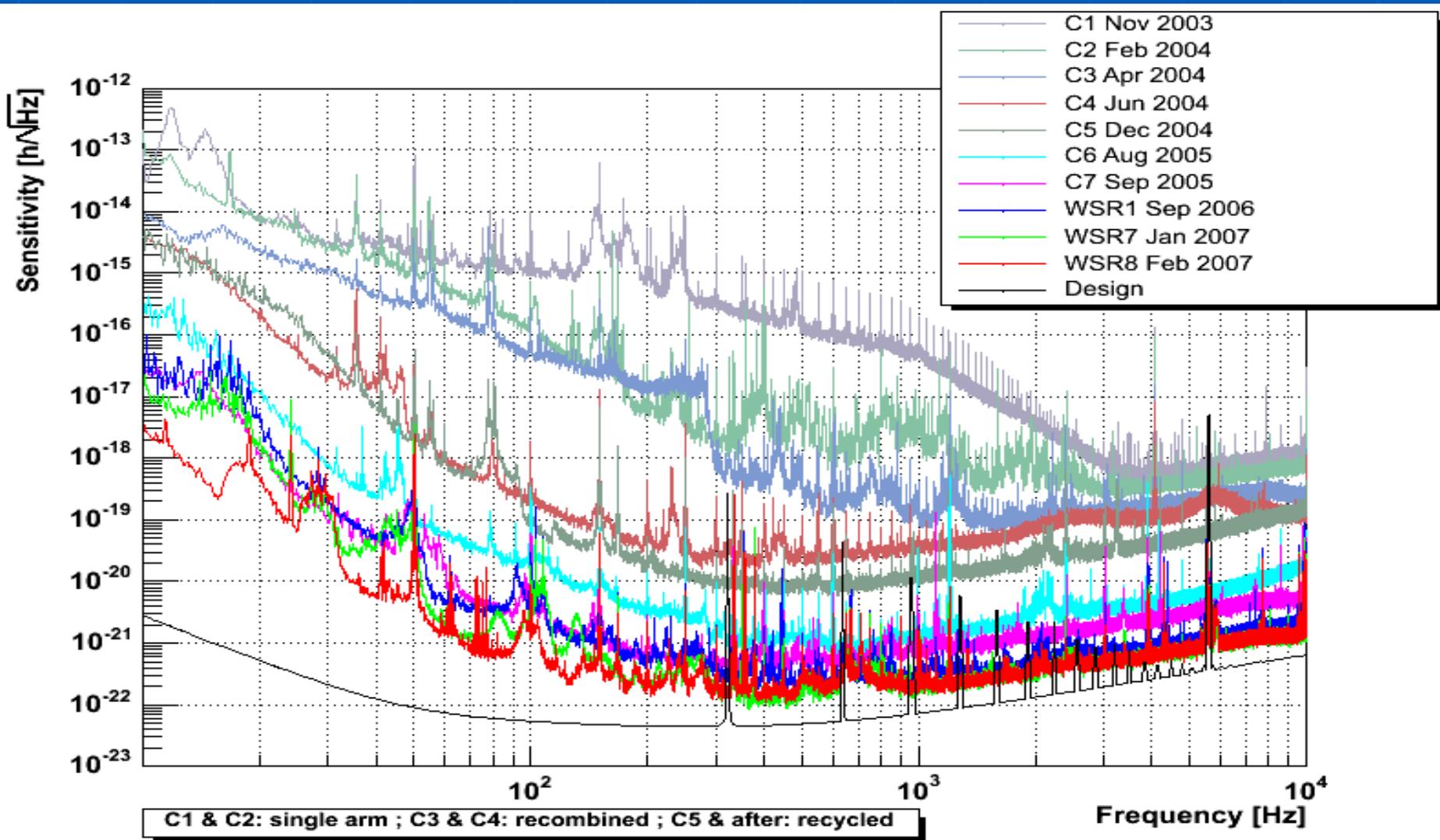


# Virgo : un état des lieux - 2



Virgo seismic attenuator

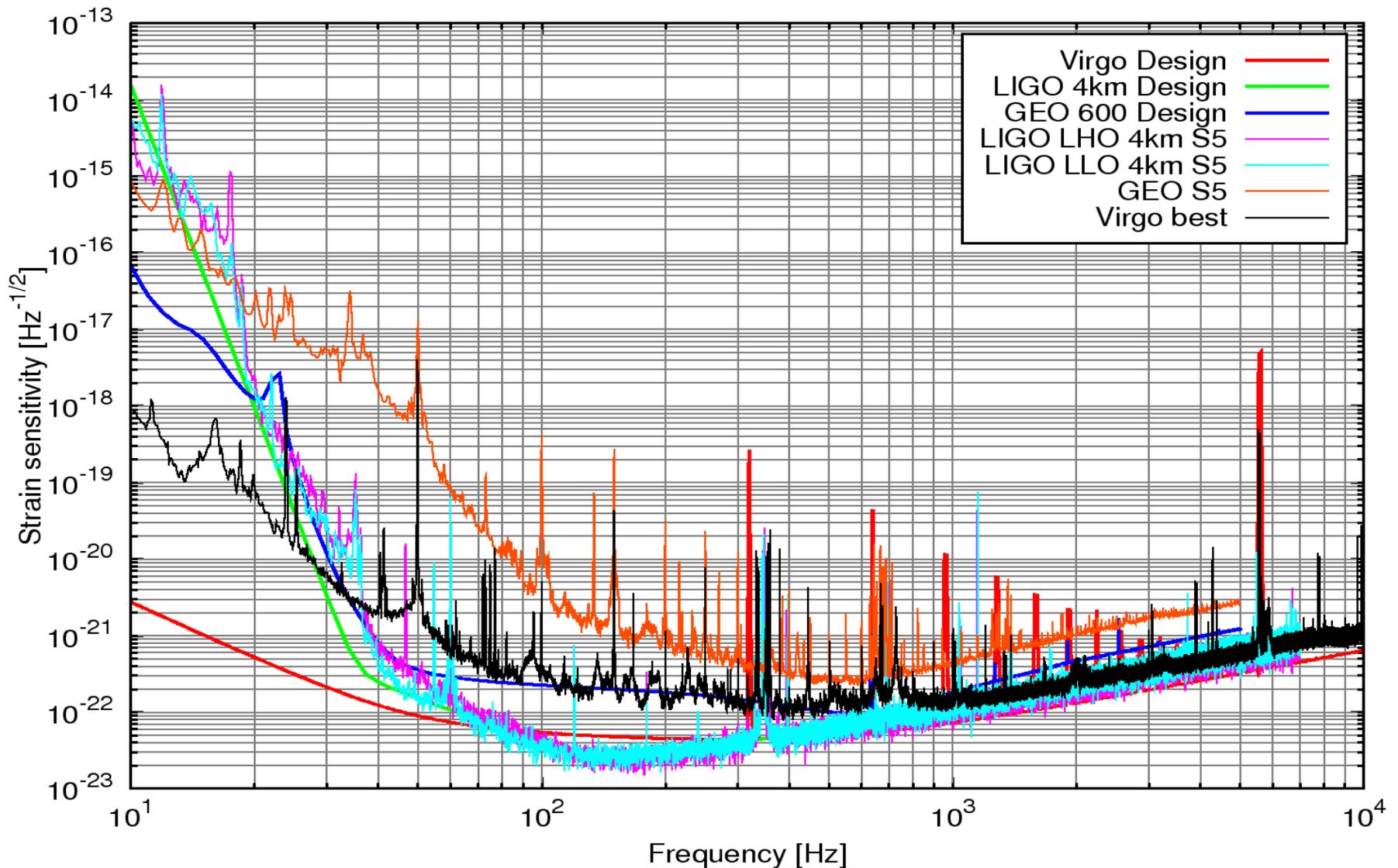
# Virgo : un état des lieux - 3



# Les derniers progrès

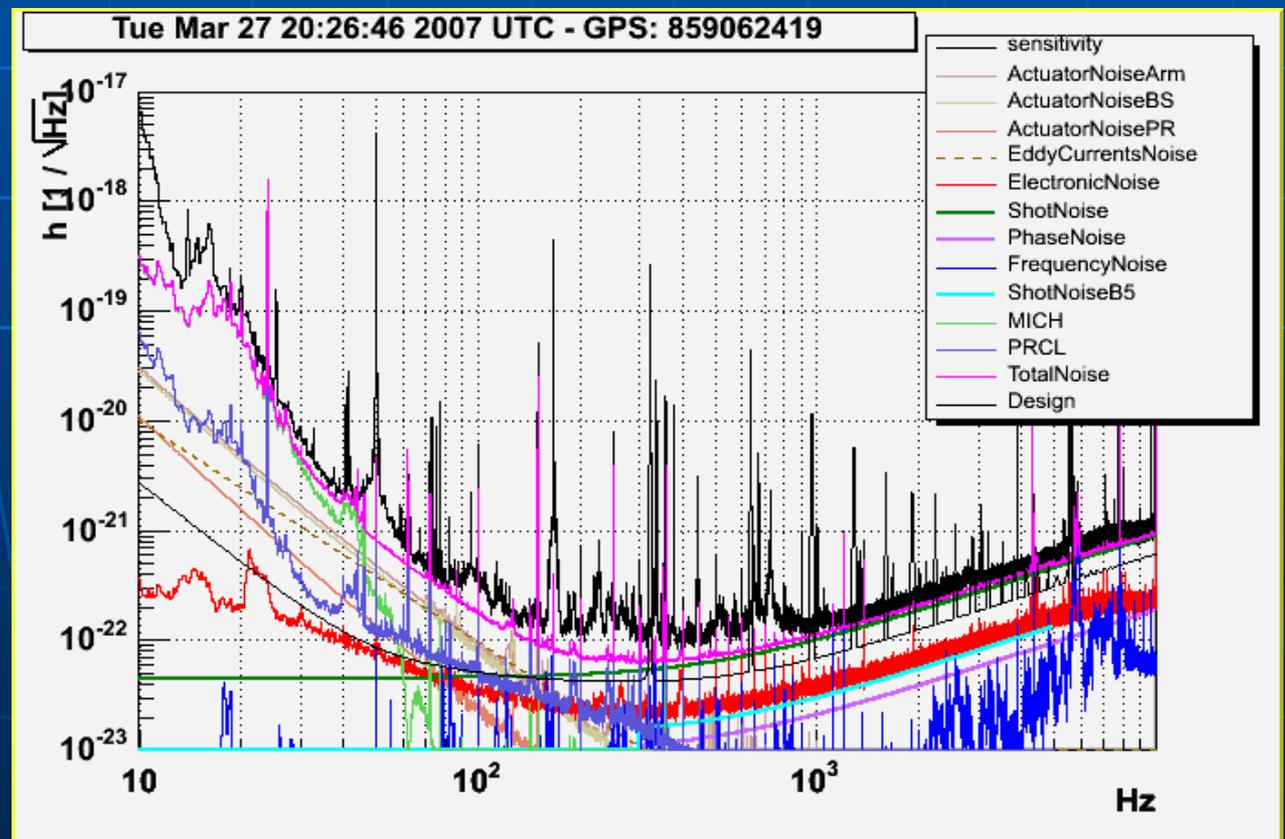
- Meilleure compréhension de la calibration
  - Moyennes et hautes fréquences
- Enlever le plus possible la lumière diffusée et les résonances mécaniques
  - Un peu partout en fréquence
- Meilleurs controls longitudinaux et angulaires
  - Essentiellement basses fréquences

# Les derniers progrès



# Quelles sont nos limites

- Pour  $f < 80$  Hz , bruits de contrôles
- Milieu de fréquences (  $80 < f < 600$  Hz), encore inconnu
- Hautes fréquences, bruit de photon



# Vers le premier run scientifique

- Isolation acoustique en cours autour des différents bancs de détections
- Changement d'un élément optique pouvant introduire du bruit acoustique
- Changements sur les systèmes annexes (computing, UPS, ...)
- 2 à 3 semaines pour tester la machine

Premier run scientifique à partir du mois de mai !

# Les données déjà disponibles

- Depuis 2005 plusieurs prises de données dite de commissioning
  - 2005, 2 périodes de plusieurs jours
  - 2006, quelques week-end de septembre à décembre
  - 2007, 4 week-end de données
- Analyses se sont focalisées sur quelques périodes

# Les données déjà disponibles

- Prises de données servent également à vérifier l'état de la machine avec d'éventuels ajustement en cours de run
- Nécessaire de comprendre au mieux les données pour améliorer l'instrument
- Un seul instrument pour faire l'analyse

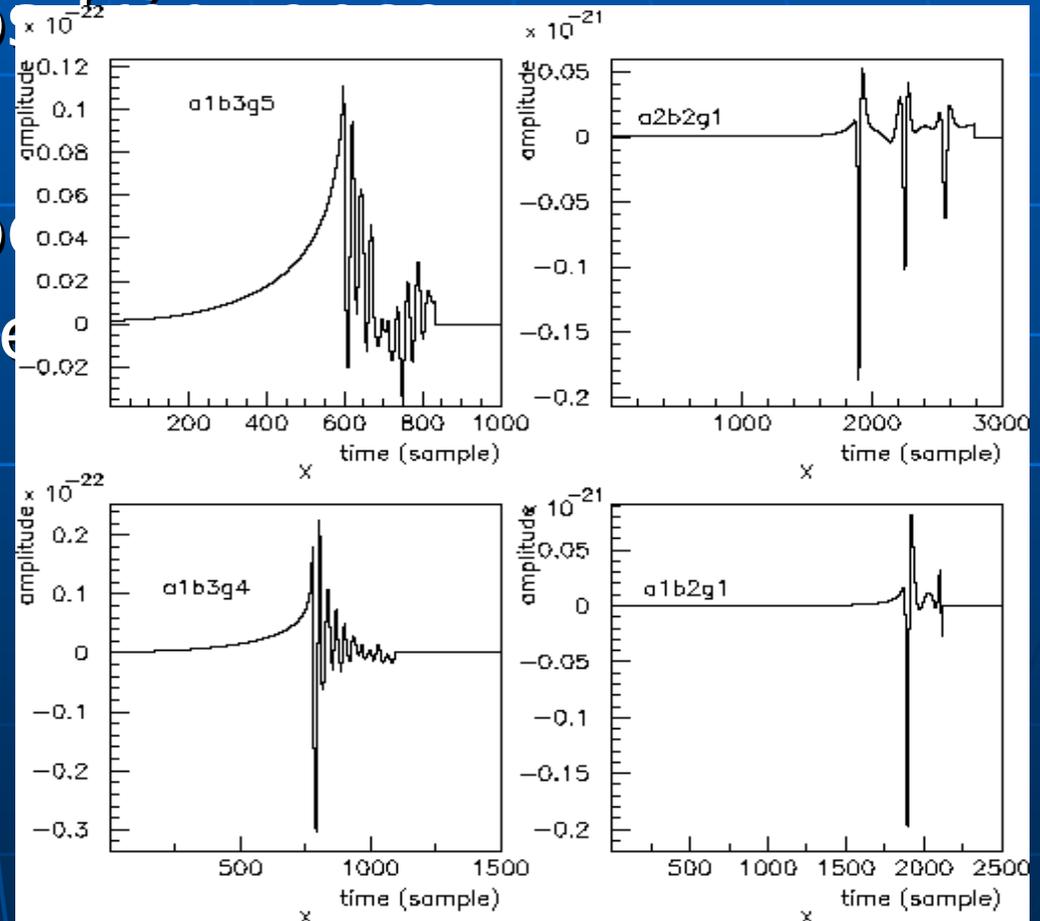
# Types d'analyses

- Pour les bursts : batteries de filtres
  - Méthodes temps-fréquence
  - Corrélateurs
  - Méthodes temporelles
  - Analyse en ondelettes

# Types d'analyses

- Pour les bursts : batteries de filtres
  - Méthodes temporelles
  - Corrélateurs
  - Méthodes temporelles
  - Analyse en ondelettes

Simulations de l'émission  
d'OG pour une supernovae à  
10 kpc

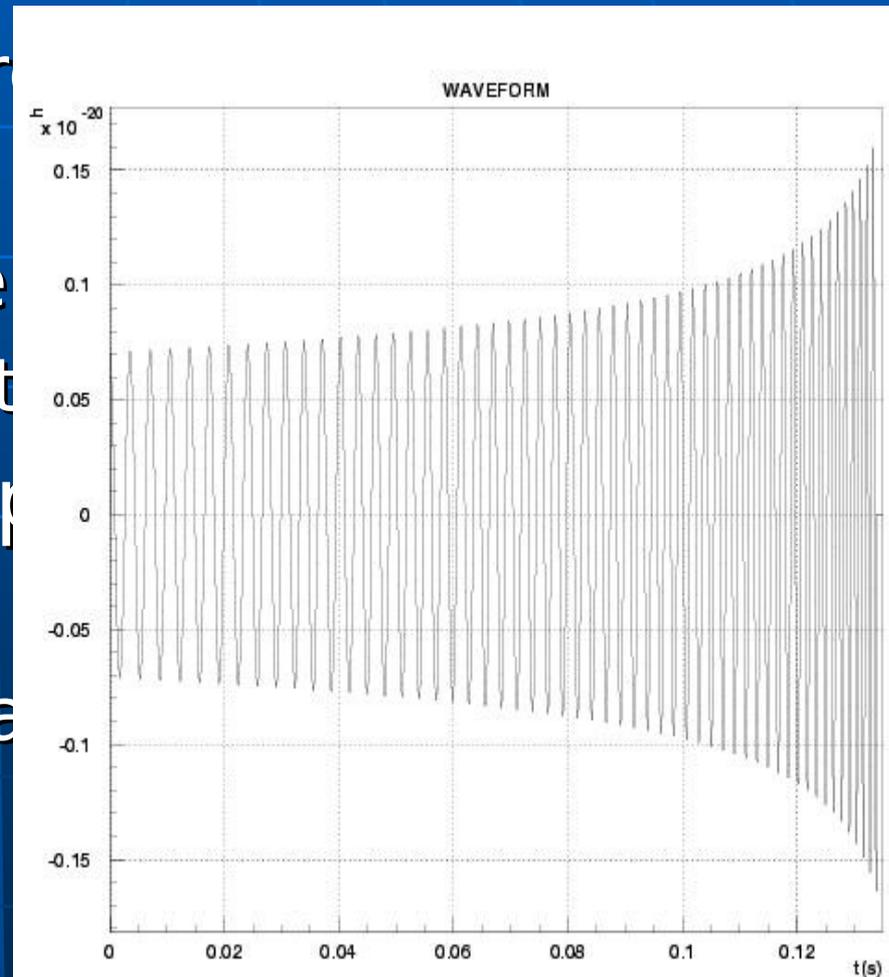


# Types d'analyses

- Pour les bursts : batteries de filtres
  - Méthodes temps-fréquence
  - Corrélateurs
  - Méthodes temporelles
  - Analyse en ondelettes
- Pour les binaires spiralantes
  - Signaux connus
  - utilisations de « calques » (match filtering)

# Types d'analyses

- Pour les bursts : batteries de filtres
  - Méthodes temps-fréquence
  - Corrélateurs
  - Méthodes temporelles
  - Analyse en ondelettes
- Pour les binaires spirales
  - Signaux connus
  - utilisations de « matched filtering »



# Qualité des données

- Nettoyage des données pour retirer les événements instrumentaux connus
- Nécessaires pour l'analyse burst
  - Signaux théoriques attendus sont très mal connus
- Certains événements peuvent perturber le fonctionnement des analyses

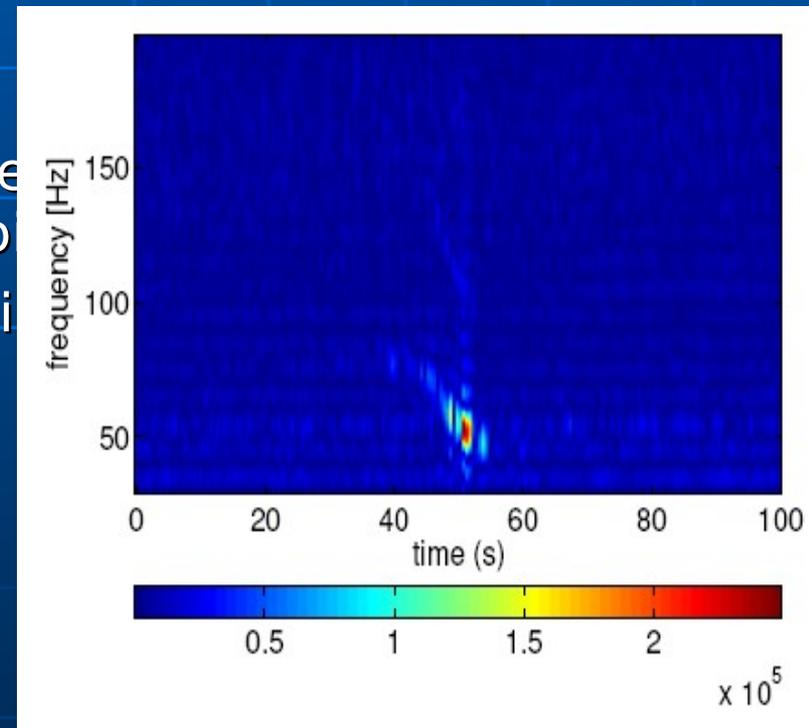
# Qualité des données - 2

- Type DQ1 : à enlever avant analyse
  - Fin de lock
  - Périodes de calibration
  - Excitation de modes des miroirs
- Type DQ2 : a posteriori
  - Mauvaise reconstruction
  - Problème sur les parties optiques (saturation des systèmes de contrôles des miroirs, ...)
  - Événements sur canaux auxiliaires (ex : avion)

# Qualité des données - 2

- Type DQ1 : à enlever avant analyse
  - Fin de lock
  - Périodes de calibration
  - Excitation de modes des miroirs
- Type DQ2 : a posteriori
  - Mauvaise reconstruction
  - Problème sur les parties optique systèmes de contrôles des miroirs
  - Événements sur canaux auxiliaires

Passage d'un avion  
détecté dans un canal  
acoustique



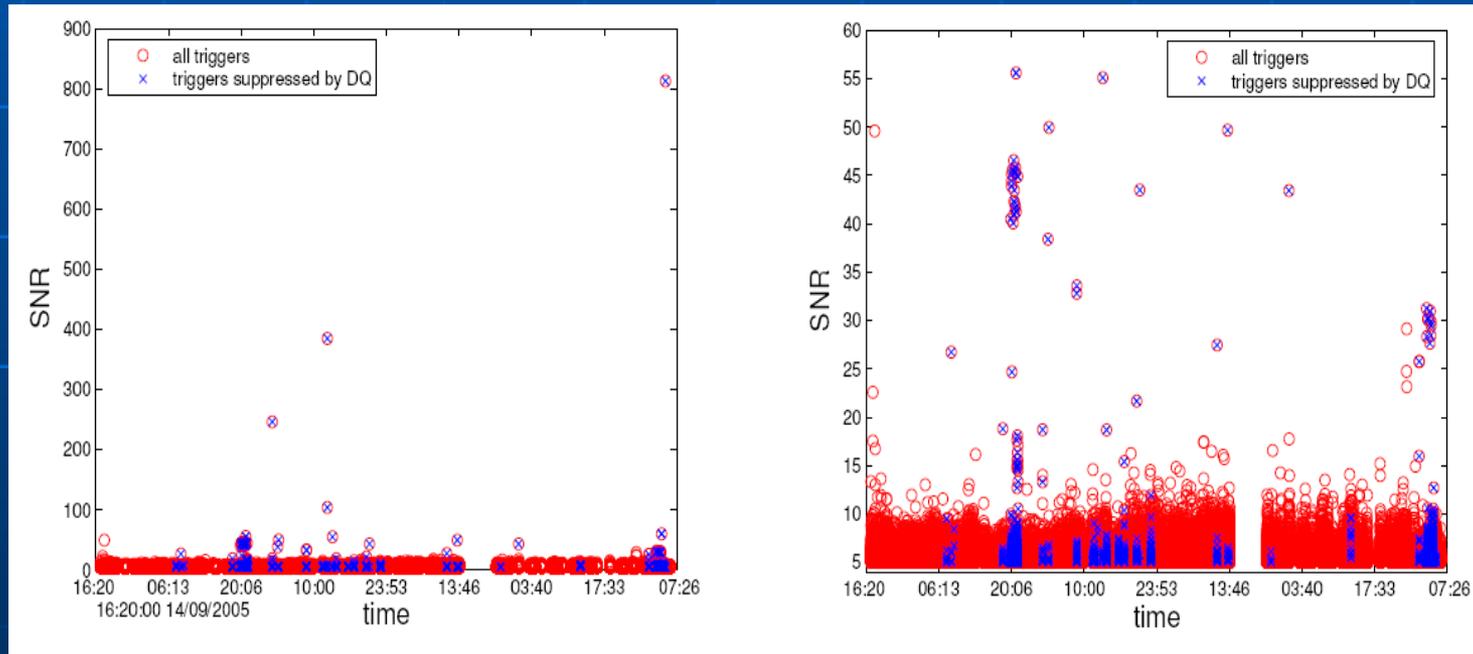
# Qualité des données - 2

- Type DQ1 : à enlever avant analyse
  - Fin de lock
  - Périodes de calibration
  - Excitation de modes des miroirs
- Type DQ2 : a posteriori
  - Mauvaise reconstruction
  - Problème sur les parties optiques (saturation des systèmes de contrôles des miroirs, ...)
  - Événements sur canaux auxiliaires (ex : avion)

Run	C7 (Sept 05)	WSR1 (Sept 06)	WSR7 (Jan. 07)	WSR8 (Feb. 07)
Science mode	64.5%	88%	78%	92%
Effective duty cycle	57.4%	87%	76%	92%

# Qualité des données - 3

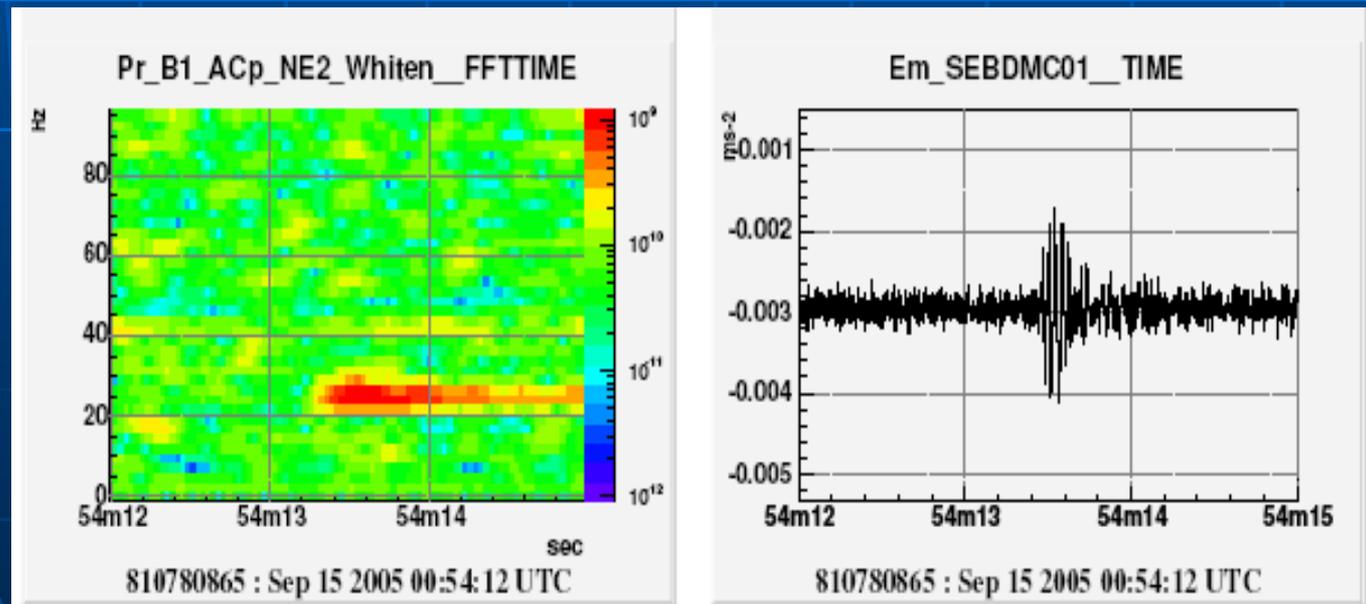
Effets sur les données de l'application des qualités de données



# Définition de veto

- Recherche des événements de haut SNR restant, coïncidence avec :
  - Source externe

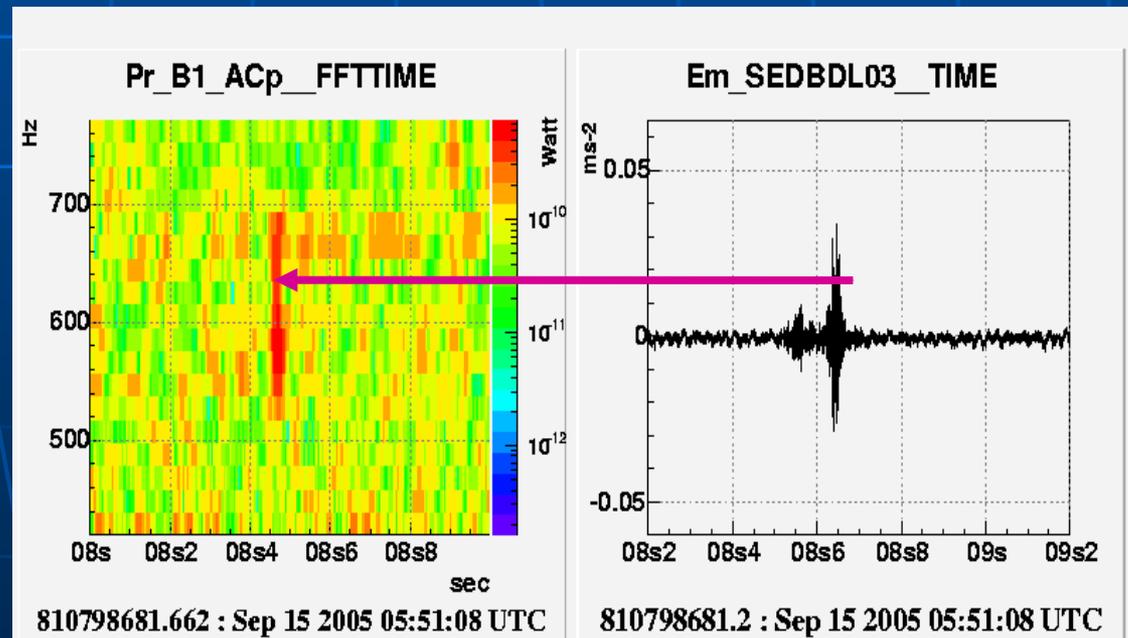
Événement  
coincident avec le  
déclenchement  
de la climatisation  
d'un bâtiment



# Définition de veto

- Recherche des événements de haut SNR restant, coincidence avec :
  - Source externe

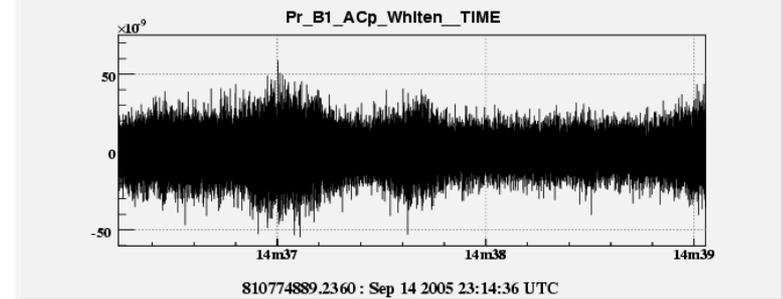
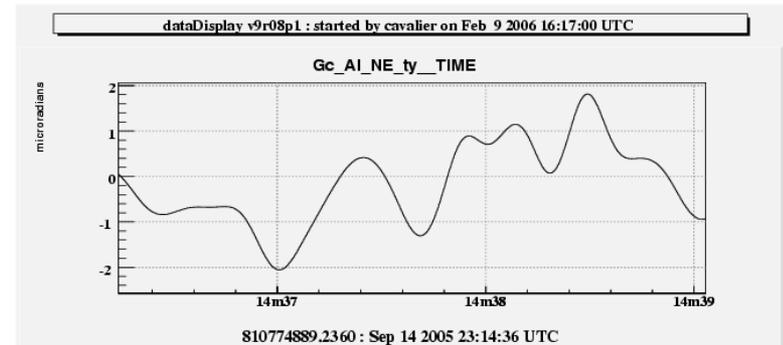
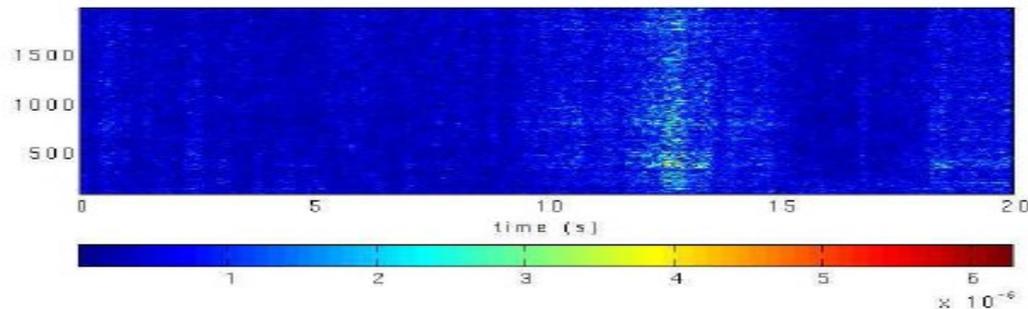
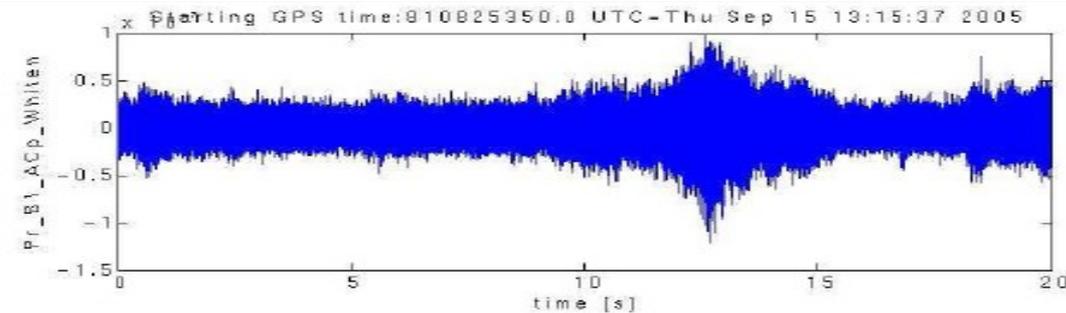
Événement coïncident avec le réalignement d'une photodiode



# Définition de veto

- Recherche des événements de haut SNR restant, coïncidence avec :
  - Source externe
  - Signaux de controls anormaux

Événement de type Burst of Burst (BoB)



# Définition de veto

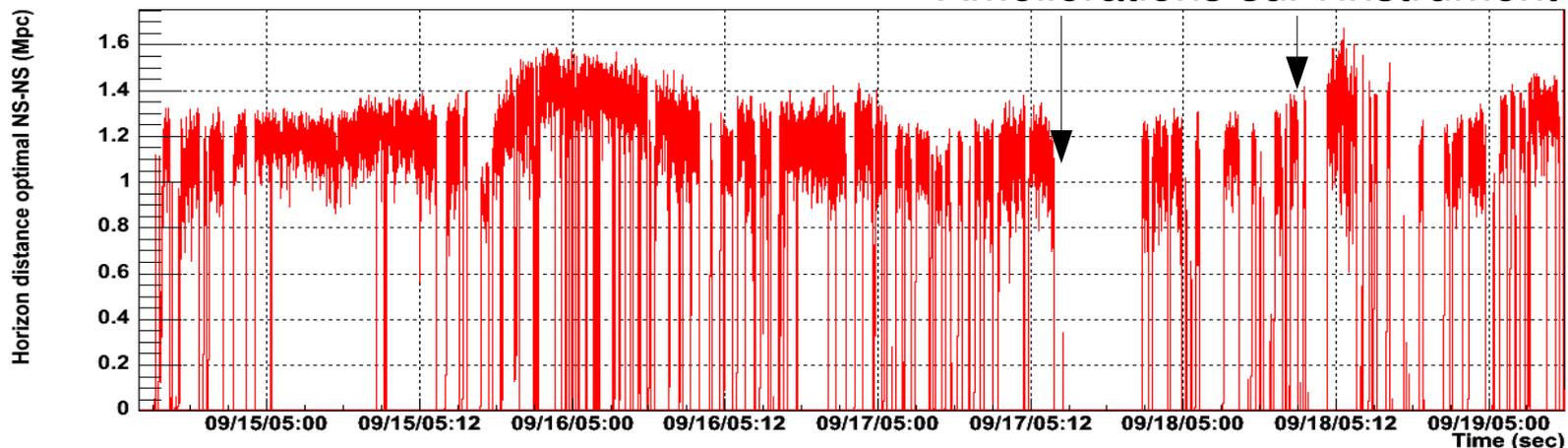
- Recherche des événements de haut SNR restant, coïncidence avec :
  - Source externe
  - Signaux de controls anormaux
  - Problèmes observés dans d'autres signaux optiques
    - Veto de type had-hoc
    - Injection hardware nécessaire pour les tester

# Le run « C7 »

- Données prises entre le 14 et 19 septembre 2005
  - Science mode : 65 %
  - Sensibilité :  $7 \cdot 10^{-22} / \sqrt{\text{Hz}}$  @ 300 Hz (*similaire à S2 de LIGO*)
  - Distance NS-NS (SNR>8) :
    - 1.5 Mpc (orientation optimale)
    - 0.65 Mpc (moyenné)

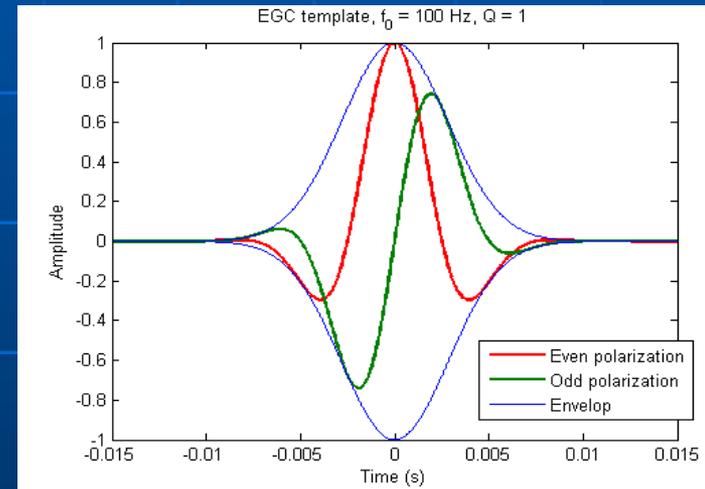
Horizon distance for optimally oriented NS-NS inspiral

Améliorations sur l'instrument



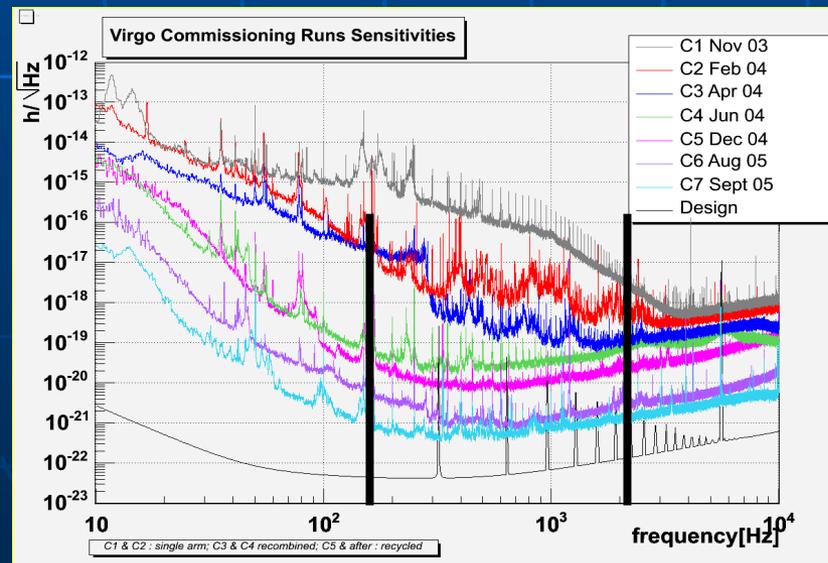
# Méthode d'analyse

- EGC : exponential gaussian correlator
  - Recherche de Sinus et Cosinus gaussien
  - 2 paramètres :  $f_0$  et  $Q$



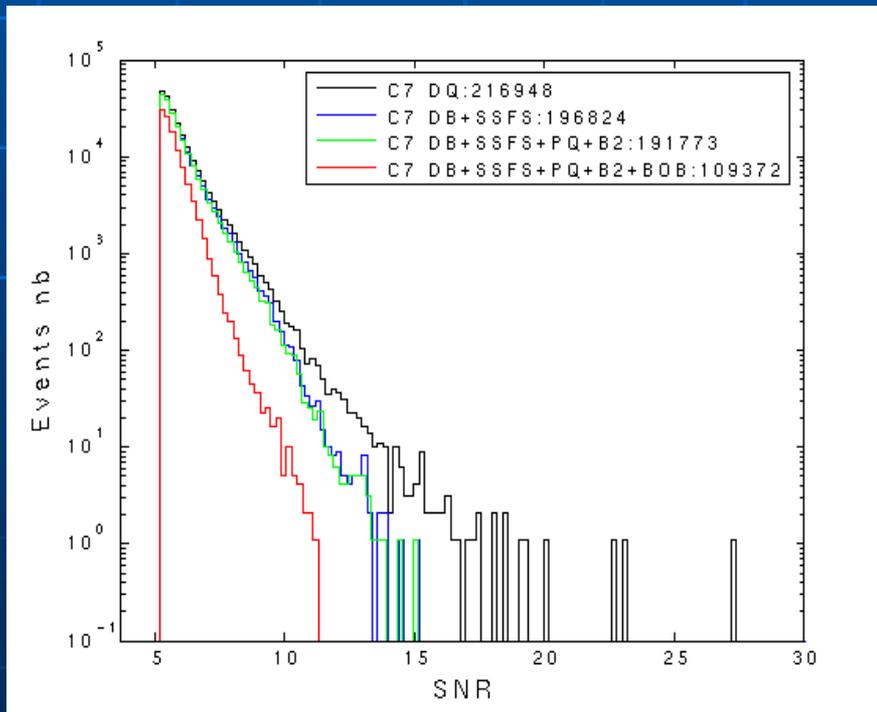
$$f_{\min} = 150 \text{ Hz} \quad Q_{\min} = 2$$

$$f_{\max} = 2000 \text{ Hz} \quad Q_{\max} = 16$$



# Résultats bruts

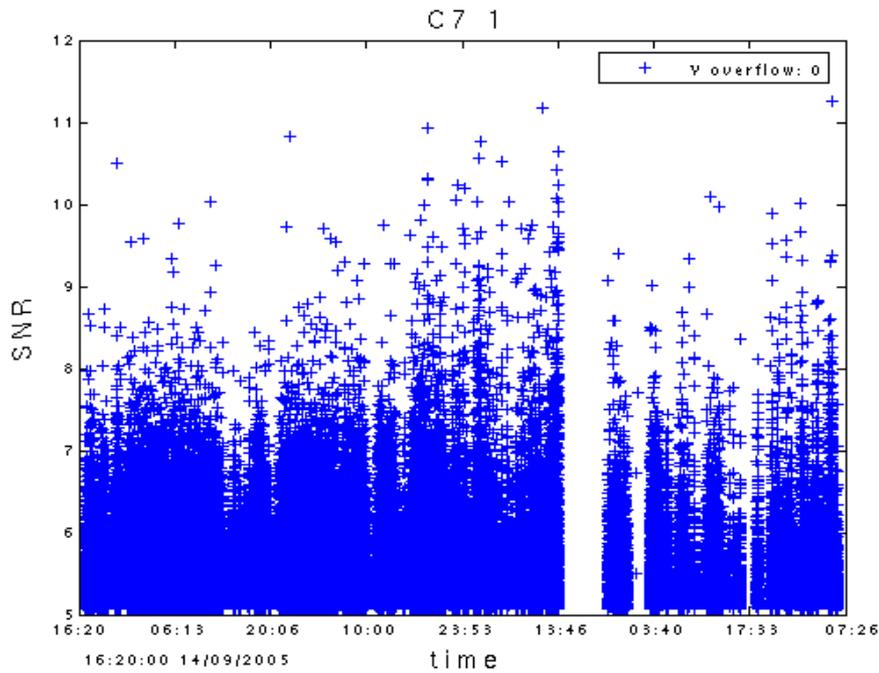
- Forte réduction des queues
  - SNR max : 11.2
  - Réduction des événements par un facteur 2



Mais temps mort DQ + veto important 24.6%:

- BoB : 17.2%
- réalignement photo. : 3.7%

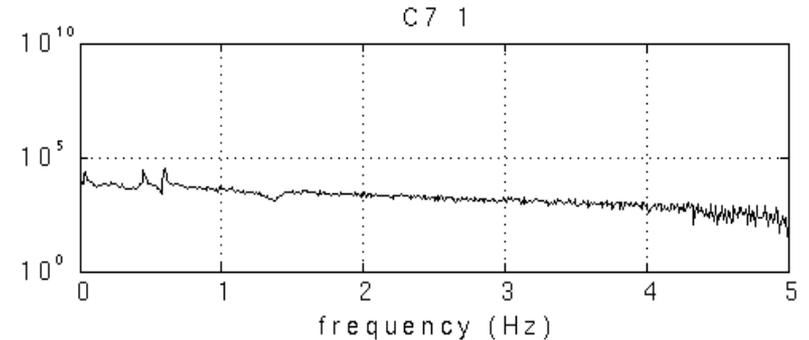
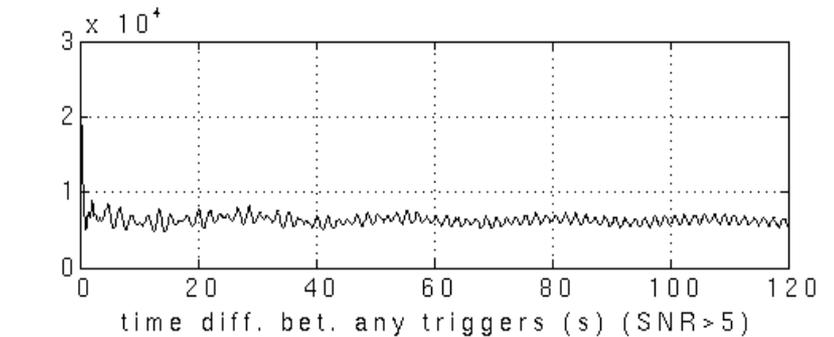
# Données après coupures



Distribution temporelle des SNR  
des événements

Autocorrélograme après coupures

- plutôt plat
- fréquences résiduelles : 0.5 et 0.6 Hz



# Efficacité de détection

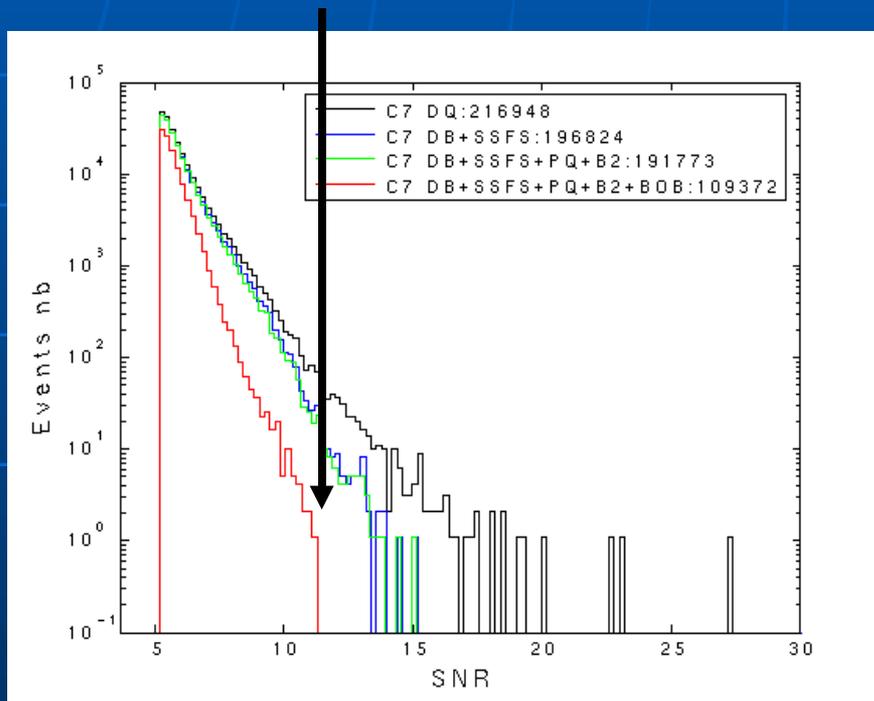
- Déterminer efficacité de l'analyse à différents signaux
- Efficacité est donné en fonction de l'énergie du signal:

$$h_{\text{RSS}} \equiv \sqrt{\int (|h_+(t)|^2 + |h_\times(t)|^2) dt}$$

- Choix du seuil

# Efficacité de détection - 2

Cut SNR > 11.3

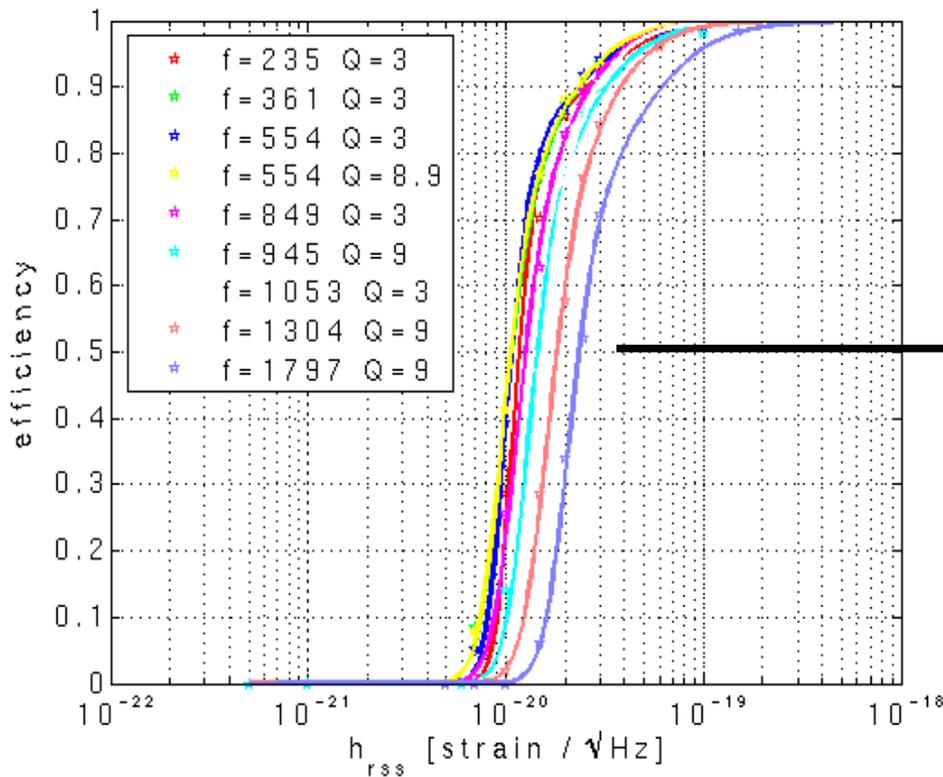


- Difficile d'avoir une bonne estimation du fond
- Choix : pas d'événement de fond
- Nécessaire de vérifier l'effet du seuil sur les limites

# Efficacité aux Sinus Gaussiens

- Injection a posteriori des formes de signaux
  - Tester efficacité avec les données réelles
  - Plusieurs hrss
  - Différents types de polarisation
- Recherche dite « all-sky »
  - Distribution spatiale spécifique (encore à faire)
- Estimation des efficacité en fonction hrss + fit par une sigmoïde
- Sur C7 utilisation de sinus gaussien répartis sur toute la gamme fréquentielle de EGC

# Efficacité aux Sinus Gaussiens



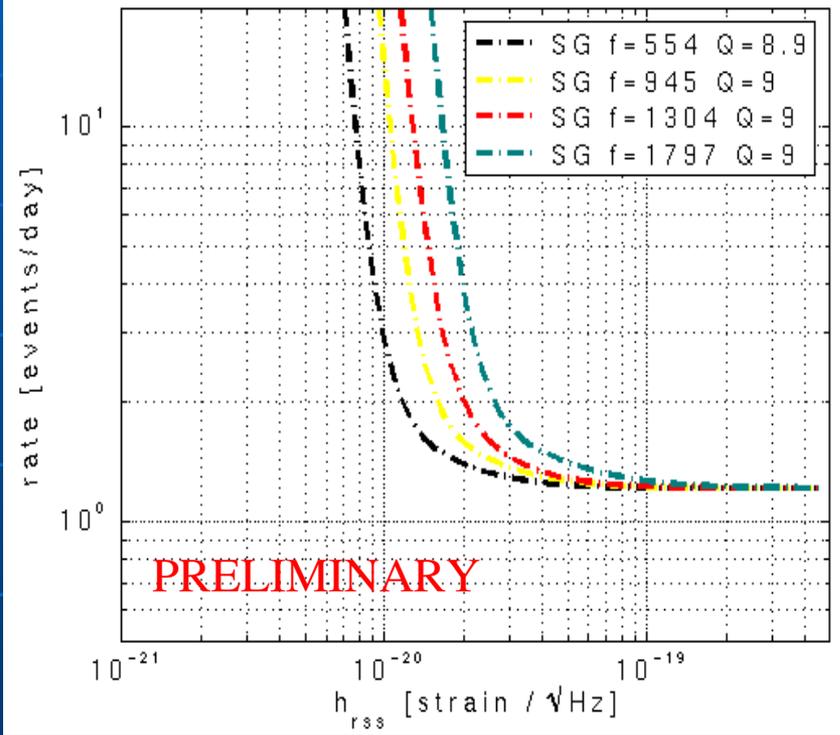
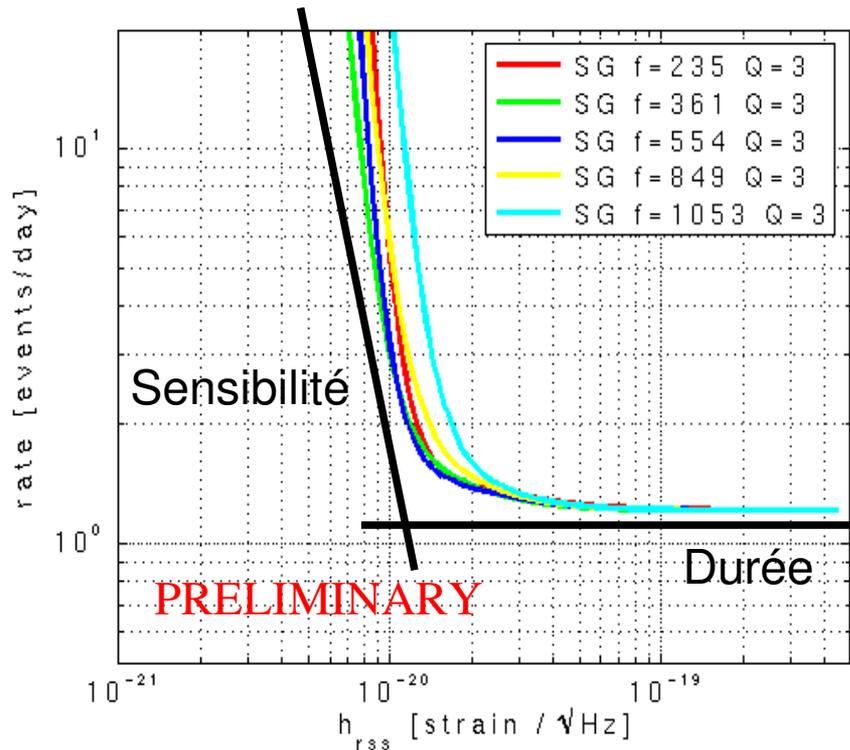
Efficacité à hautes fréquences :  
bruit plus important

hrss à 50% d'efficacité :  
 $1.1 \longleftrightarrow 2.4 \cdot 10^{-20} / \sqrt{\text{Hz}}$

# Premières limites supérieures

- Seuil pour ne pas avoir d'événement de fond
- Utilisation d'un grand nombre de signaux
  - Limite supérieure à 90 % de confiance sur le nombre d'événement par jour en fonction de l'énergie des signaux
- Durée effective : 1.9 jour

# Premières limites supérieures



Limite supérieure : 1.2 evt/jour

# Interprétation astrophysique

- Sensibilité à des signaux avec un hrss de  $10^{-20}$
- Energie de l'émission de l'OG
  - Puissance émise par une source sous forme d'OG

$$\frac{d^2 E_{GW}}{dA dt} = \frac{c^3}{16\pi G} \langle (\dot{h}_+)^2 + (\dot{h}_\times)^2 \rangle$$

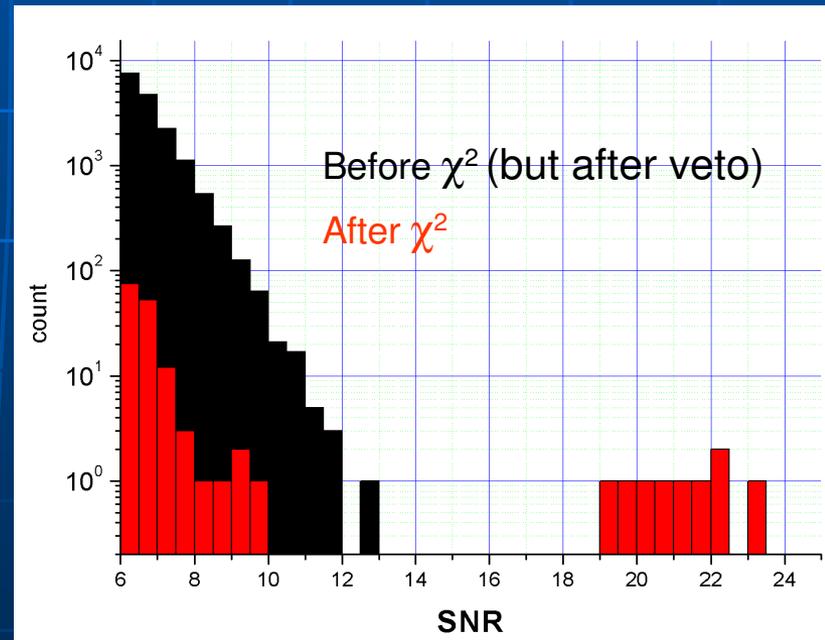
- Pour le cas d'un sinus gaussien émis au centre galactique, on obtient :

$$E_{GW} = \frac{r^2 c^3}{4G} (2\pi f_0)^2 h_{r_{SS}}^2$$

$$E_{OG} < 10^{-6} M_{\text{sun}}$$

# Autres analyses sur C7

- Suivi du GRB 050915a (redshift inconnu), pas d'événement
- Binaires
  - Analyse pour NS-NS
  - Développement de veto
  - Utilisation de  $\chi^2$



# Les WSRs

- Analyses en cours focalisées sur 2007
- Nettoyage des données en cours
- Bursts
  - All-sky – distribution galactique
  - Suivi de GRBs

# L'analyse en réseau

4 & 2 km



600 m



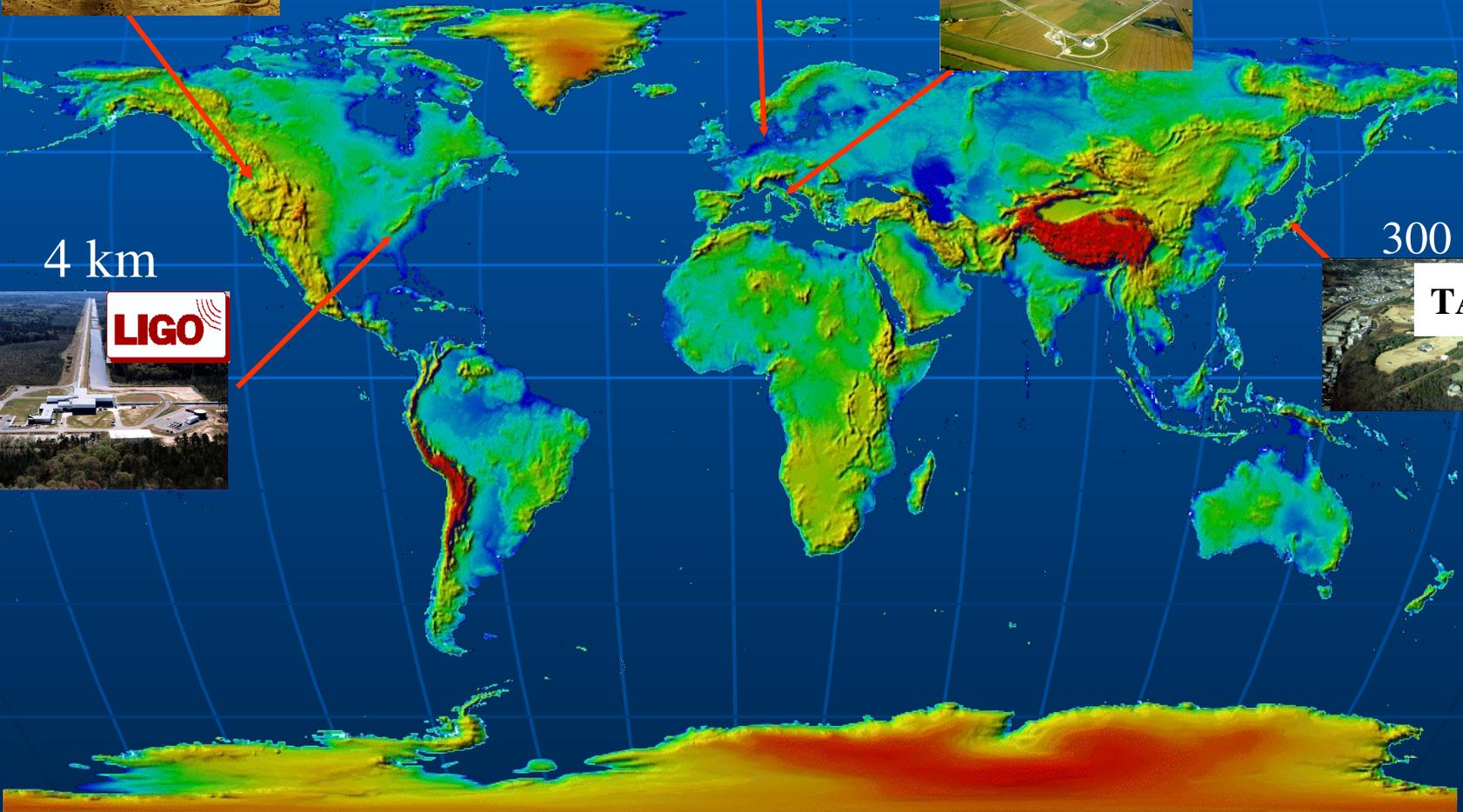
3 km



4 km

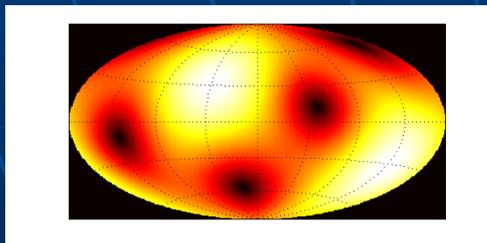


300 m

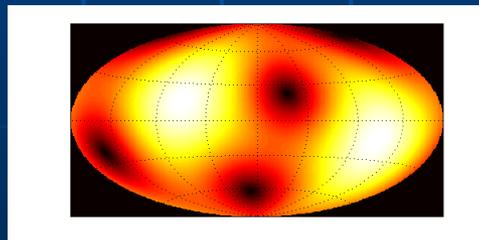


# LIGO-Virgo : analyse commune ?

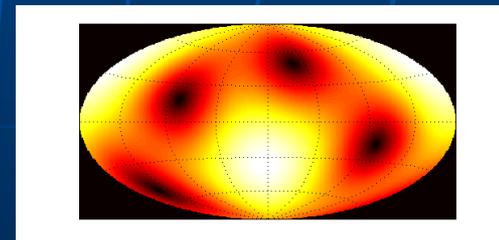
- Redondance de l'information
  - Meilleure suppression des fausses alarmes
- Obligatoire pour certaine recherche comme le fond stochastique
- Meilleure couverture du ciel
- Reconstruction de la position de la source



Hanford



Livingston



Virgo

# LIGO - Virgo

- Mise en place d'un groupe de travail commun en 2005 : bursts et CB
  - Comparaisons des filtres en place
  - Travail sur 24 heures de données simulées – injection 1 ou 2 sources
  - Reconstruction au degrés de la position
  - Augmentation de l'efficacité de détection

	HL	HV	LV	$HL \cup HV \cup LV$	HLV
Efficacité	41 %	22 %	22 %	60 %	19 %

# LIGO - Virgo

- Échange d'une week-end de données réelles (WSR1)
  - Analyse coïncidente en cours – meilleure efficacité
  - Analyse cohérente – problème de stabilité avec les données Virgo mais résolu
- MoU signé entre les deux collaborations
- Accord pour l'échange de données à partir du run scientifique de Virgo
- Accord valable pour les années à venir

# A venir

## Améliorer la sensibilité d'un facteur 10

Gagner un facteur 10 sur la distance de détection

Gagner un facteur 1000 sur le volume de sources potentielles

Distance de détection NS-NS pour Virgo/LIGO: 14 Mpc (amas de la Vierge)

Taux de binaires spirales: moins d'un événement par an!

Pas d'astronomie des OG possible ...

Mouvement vers la seconde génération en 2 étapes :

- « Virgo + » et eLIGO
- Advanced LIGO et Advanced Virgo

# Première étape - 2008/2009

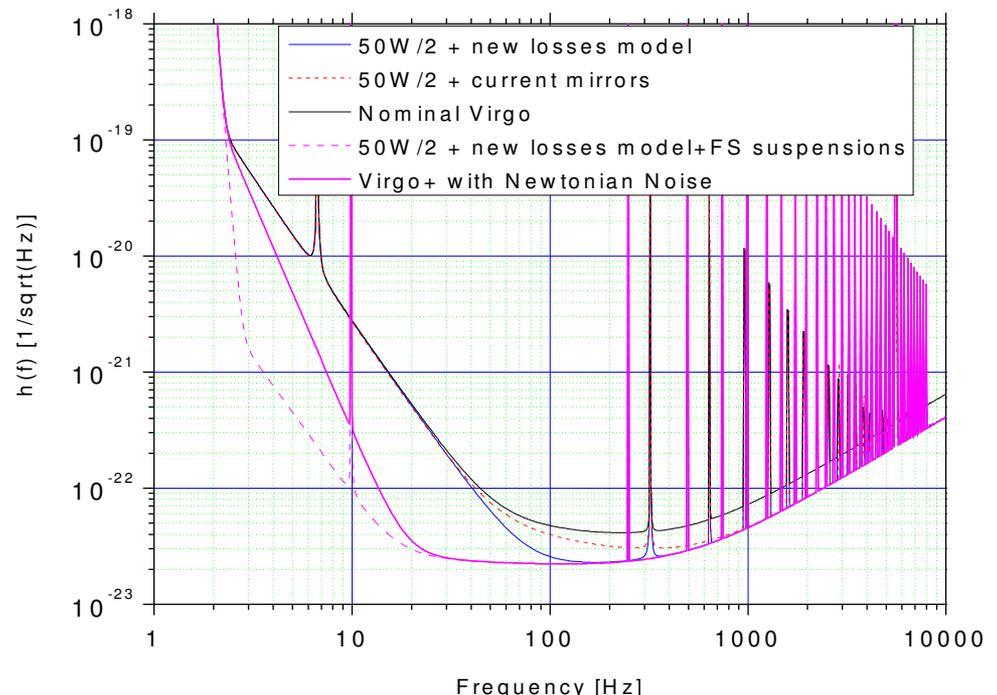
- Virgo + : LASER (50W), miroirs, électronique de control , compensation thermique, suspensions (?)
- eLIGO : LASER (50W), optique de sortie, suspensions (?)

Distance pour binaires:

- NS-NS : 114 Mpc

- BH-BH : 584 Mpc

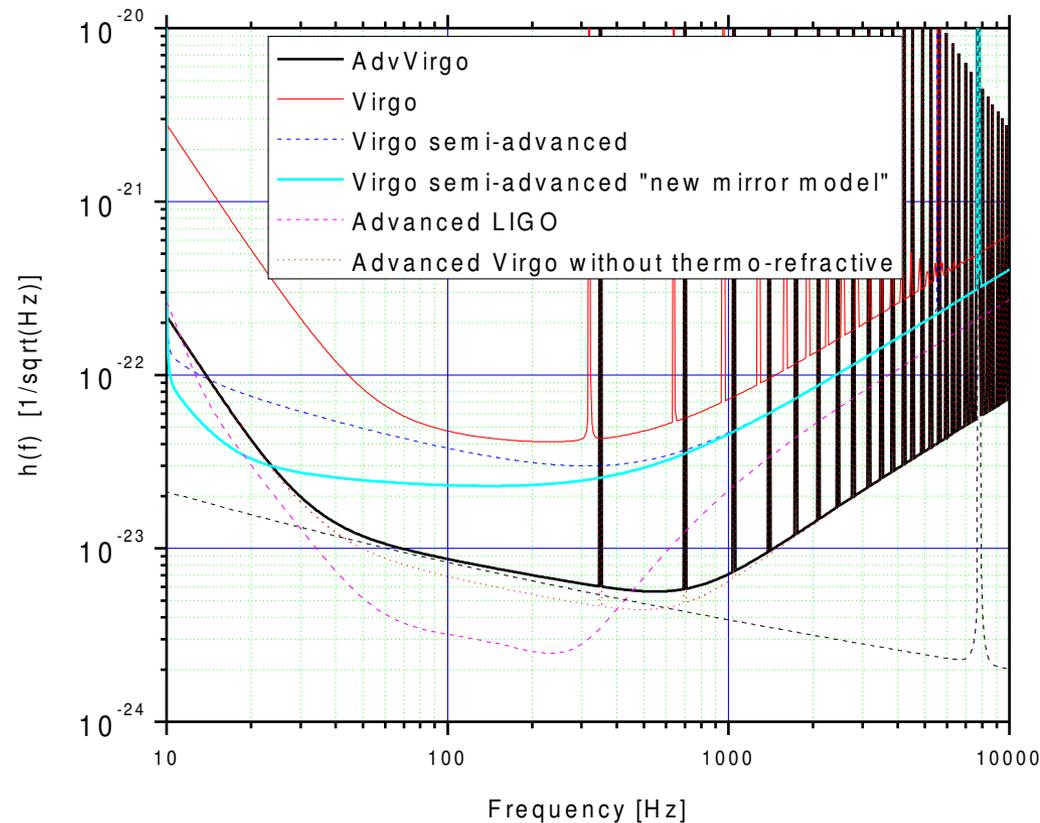
Arrêt concerté des machines entre Virgo et LIGO



# Deuxième étape - 2011/2012

- Advanced detector : design en cours

Possibilité de détecter  
plusieurs sources par mois !



# Conclusions

- Virgo se rapproche de sa sensibilité nominale
- Premières limites de Virgo
- Premier run scientifique pendant l'été
- LIGO est en run (S5) depuis novembre 2005
- Entre 4 et 5 détecteurs en ligne en même temps pour 4 mois

# Conclusions - 2

- Analyse des données LSC et Virgo se fera en réseau
- Après le run :
  - Retour vers la machine
  - Mise en place des améliorations
  - Retour en ligne pour 2008/2009
- Design pour la seconde génération est pratiquement finie
- **Bientôt une astrophysique avec les OG ?**