

# *Recherche d'ondes gravitationnelles avec l'expérience VIRGO: état d'avancement et perspectives*

*Raffaele Flaminio*

*LAPP*

- Motivations scientifiques
- Détection d'ondes gravitationnelles
- L'expérience VIRGO
  - design du détecteur
  - état d'avancement
  - prochaines étapes
- Le contexte international
- Le futur de la discipline
- Conclusions



# Introduction

1887 Expérience de Michelson-Morley

- pas d'éther
- vitesse lumière indépendante de sa direction de propagation

• 1905 Théorie de la relativité restreinte de Einstein

- vitesse lumière constante fondamentale ( $c$ )
- toute information transmise à une vitesse  $v < c$   
 $\Rightarrow$  théorie de Newton pas correcte

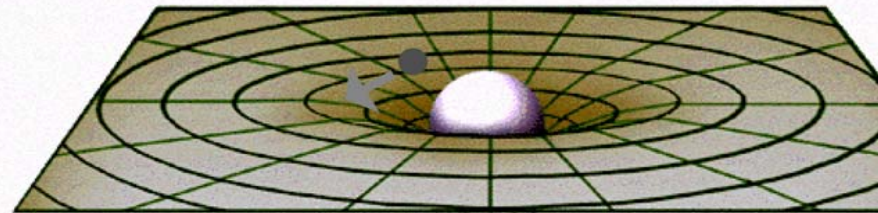
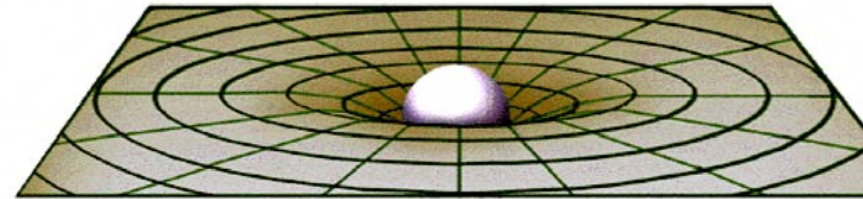
1916 Théorie de la relativité générale de Einstein

toute masse courbe l'espace aux alentours

force de gravitation

=

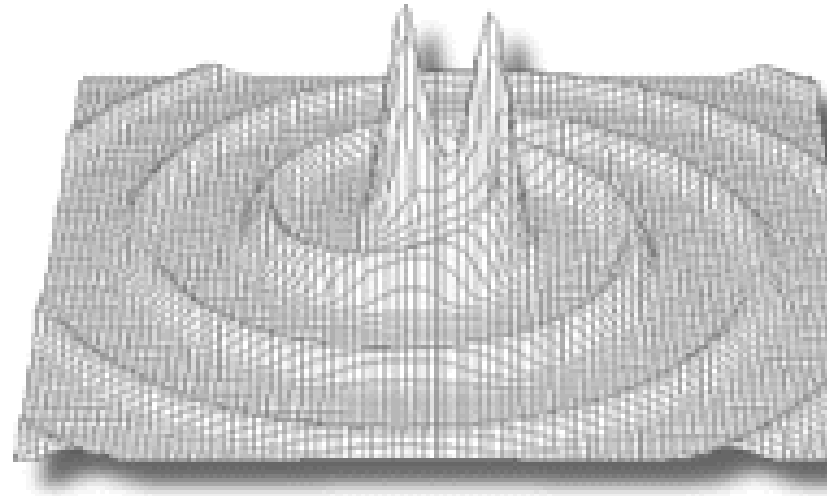
manifestation de la courbure de l'espace





# *Ondes gravitationnelles en image*

Propagation de la déformation  
induite par un ensemble de deux masses  
tournant l'une autour de l'autre



Ondes gravitationnelles:  
déformation de la métrique de l'espace-temps  
se propageant à la vitesse de la lumière



# Ondes gravitationnelles en équations

- $g_{\mu\nu}$  = métrique espace-temps

$$\text{espace plat} \Rightarrow g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix}$$

- Équation de Einstein:  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R^\lambda{}_\lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

$R_{\mu\nu}$  ( $g_{\mu\nu}$ ) tenseur de Ricci       $T_{\mu\nu}$  = tenseur Énergie-Impulsion

- Espace ‘presque’ plat  $\Rightarrow g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$        $h_{\mu\nu} \ll 1$

- Équation de Einstein:  $\Delta h_{\mu\nu} - \partial_\lambda \partial_\mu h^\lambda{}_\nu - \partial_\lambda \partial_\nu h^\lambda{}_\mu + \partial_\mu \partial_\nu h^\lambda{}_\lambda = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

Équation d’onde !



# *Ondes gravitationnelles vs ondes électromagnétiques*

- Équation de Einstein linéarisée

$$\square h_{\mu\nu} - \partial_\lambda \partial_\mu h^\lambda{}_\nu - \partial_\lambda \partial_\nu h^\lambda{}_\mu + \partial_\mu \partial_\nu h^\lambda{}_\lambda = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Conservation de l'énergie-impulsion

$$\partial_\mu T_{\mu\nu} = 0$$

- Invariance de jauge

$$\Rightarrow \square h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} \left[ T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} T^\lambda{}_\lambda \right]$$

- ondes transverses  
deux états de polarisation  
spin 2

- Équation de Maxwell

$$\square A_\mu - \partial_\mu \partial^\lambda A_\lambda = 4\pi J_\mu$$

- Conservation de la charge

$$\partial_\mu J_\mu = 0$$

- Invariance de jauge

$$\Rightarrow \square A_\mu = 4\pi J_\mu$$

- onde transverses  
deux états de polarisation  
spin 1



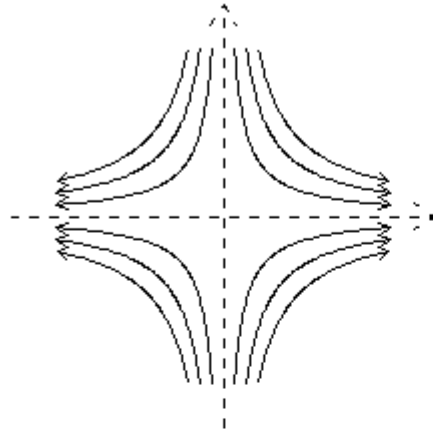
# Propagation d'ondes planes

• Dans le vide:  $T_{\mu\nu} = 0$

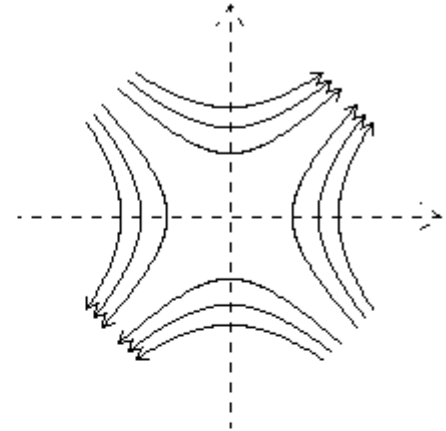
$$\square h_{\mu\nu} = 0$$

$$h_{\mu\nu} = \varepsilon_{\mu\nu} e^{ikx} + \varepsilon_{\mu\nu}^* e^{-ikx}$$

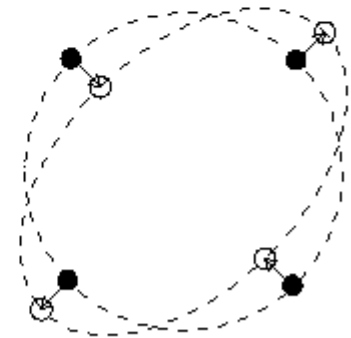
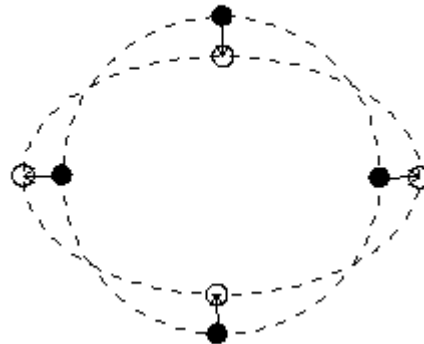
$$\varepsilon_{\mu\nu} = h_+ \varepsilon_{\mu\nu}^+ + h_\times \varepsilon_{\mu\nu}^\times$$



polarisation +



polarisation  $\times$





# *Production d'ondes gravitationnelles*

$$h_{\mu\nu} = \frac{4G}{c^4} \int d^3x' \frac{\left[ T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} T^{\lambda}_{\lambda} \right]}{|\vec{x} - \vec{x}'|} \quad \text{développement en multipôles .....}$$

$$\Rightarrow \text{émission de quadrupôle} \quad h_{jk} = \frac{2G}{c^4} \frac{\ddot{I}_{jk}}{d} \approx \frac{G}{c^4} \frac{E_{ns}}{d}$$

d = distance de la source  
E<sub>ns</sub> = énergie ' non sphérique '

G/c<sup>4</sup> = 8 · 10<sup>-45</sup> m/J    faible facteur de couplage !

**Production sur terre ?** Ex. barre de 1 tonne en rotation h ≈ 10<sup>-43</sup>·f<sup>2</sup>    ⇒ **détection impossible**

$$\text{Luminosité} \quad \frac{dE}{dt} = \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{I}_{jk} \ddot{I}_{jk} \rangle \sim 4 \cdot 10^{59} \frac{\text{erg}}{\text{s}} \left( \frac{v}{c} \right)^6 \left( \frac{r_{Sh}}{R} \right)^2$$

v = vitesse typique  
r<sub>Sh</sub> = rayon de Schwarzschild de la source

⇒ **Sources compactes, massives et ' rapides '**

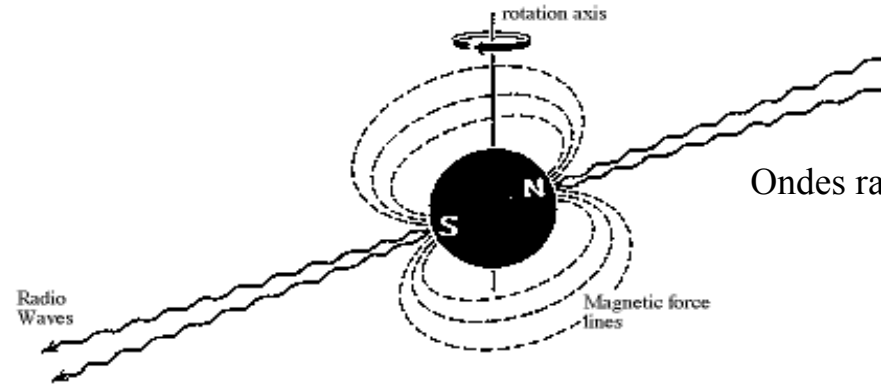
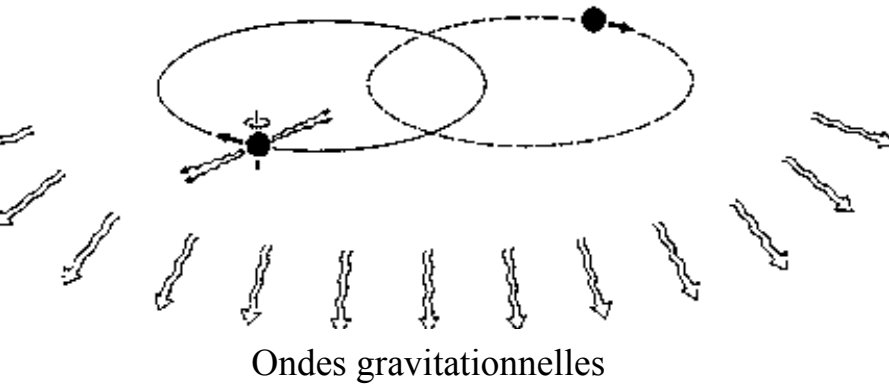
• Sources astrophysiques:

trous noirs, étoiles à neutrons, supernovae, big bang, .....

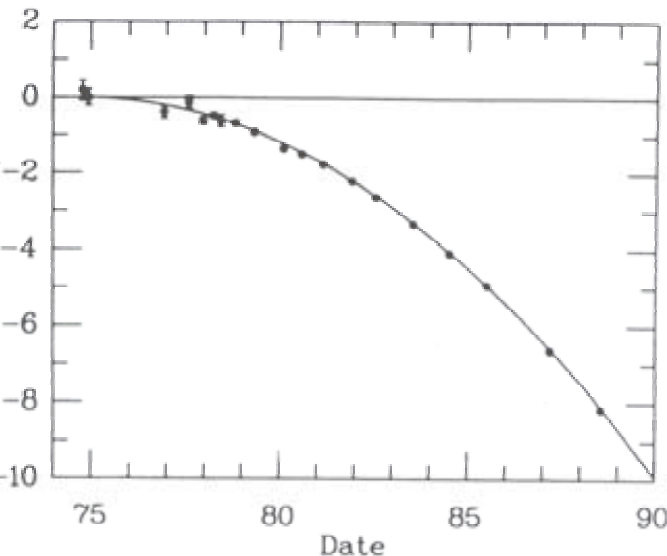


# Évidence d'ondes gravitationnelles

System binaire 1916+13



- Système binaire formé par deux étoiles à neutrons (un pulsar) avec une période de 8h



- Perte d'énergie en accord avec le rayonnement gravitationnel prédit par la relativité générale

$$\frac{\dot{P}_{obs}}{\dot{P}_{theorie}} = 1.0023 \pm 0.005 \quad (\text{Taylor et al. 1992})$$

Prix Nobel à Taylor et Hulse (1993)

- Coalescence des étoiles dans  $10^8$  ans
- Deux systèmes similaires observés depuis



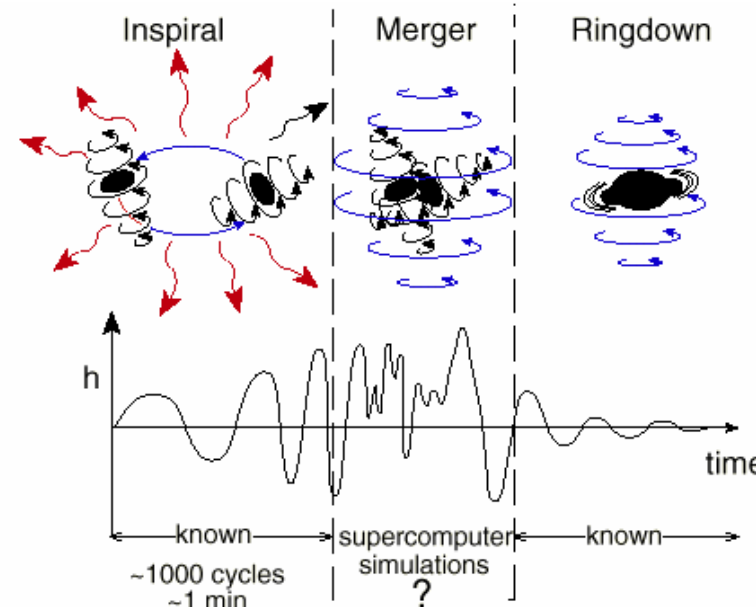
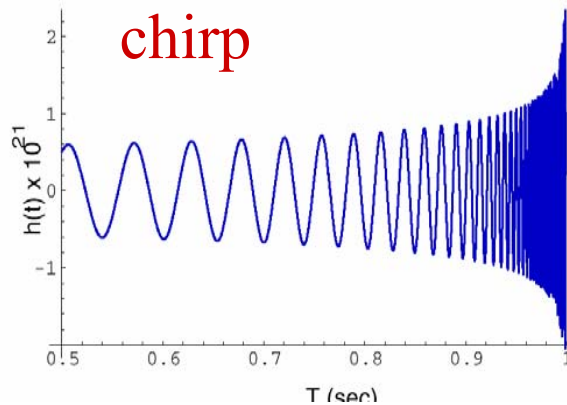


# Coalescences des étoiles binaires

Système binaire formé par deux étoiles compactes (NS-NS, BH-BH, NS-BH)

Forme du signal connue (fonction du paramètre de masse)

plus de signal à basse fréquence



Nombre de coalescences prévues

analyse statistique:  $\sim 1 / 10^5$  an dans la galaxie

$\sim 3 /$  an dans un rayon de 200 Mpc (Narayan et al. 1991, Phinney 1991)

modèle évolutif:  $\sim 3 /$  an dans un rayon de 40 Mpc (Lipunov et al. 1994)



# *La physique des coalescences*

- *Chandelles standards:*  
mesure de la forme d'onde  $\Rightarrow$  distance de la source  
[Schutz, *Nature*, 1986]
- *Test de l'interaction gravitationnelle:*  
forme d'onde avant la coalescence  $\Rightarrow$  test de la gravité en condition de champ fort  
[Damour, Esposito-Farese, gr-qc/9803031]
- *Physique de la matière:*  
signal pendant la coalescence sensible à l'équation d'état de la matière  
[Cutler *et al.*, *PRL*, **70**, 1993]



# Pulsars

toile à neutron en rotation  
asymétrique  $\Rightarrow$  émission d'ondes gravitationnelles

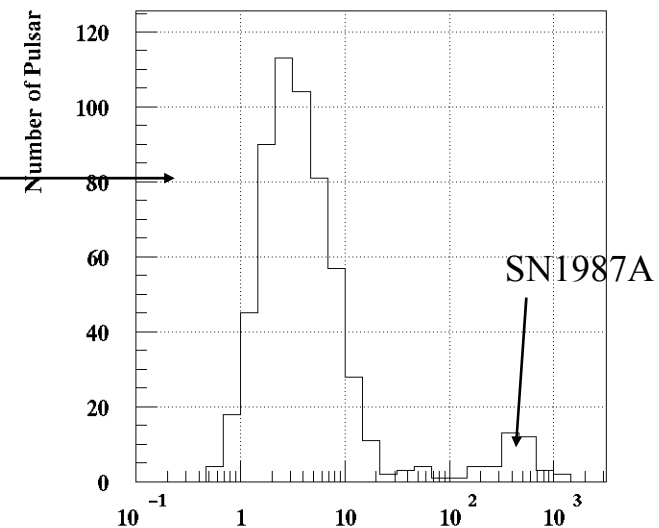
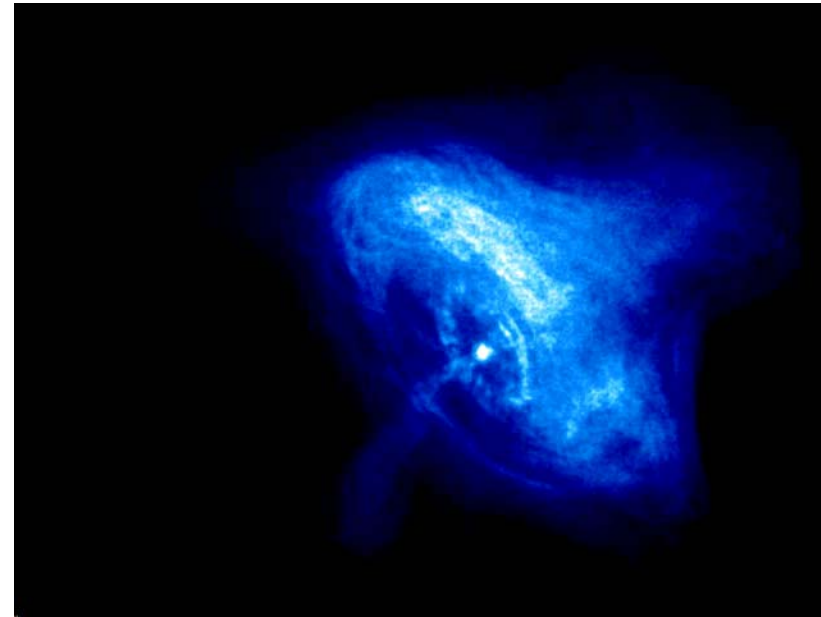
$$\text{amplitude: } h \approx 8 \cdot 10^{-24} \varepsilon \left( \frac{f_{OG}}{10 \text{ Hz}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{10 \text{ kpc}}{d} \right)$$

$$\text{asymétrie: } \varepsilon \approx \frac{Q_{xx} - Q_{yy}}{I_z} = ?$$

limite supérieure:  
affaiblissement dû à l'émission d'ondes gravitationnelles

1000 pulsars connus  
distribution en fréquences  
beaucoup de pulsars à basse fréquence

$10^9$  étoiles à neutrons dans la galaxie





# Explosion de Supernovae

Collapse du cœur d'étoiles massives

- formation d'étoiles à neutrons
- formation de trous noirs

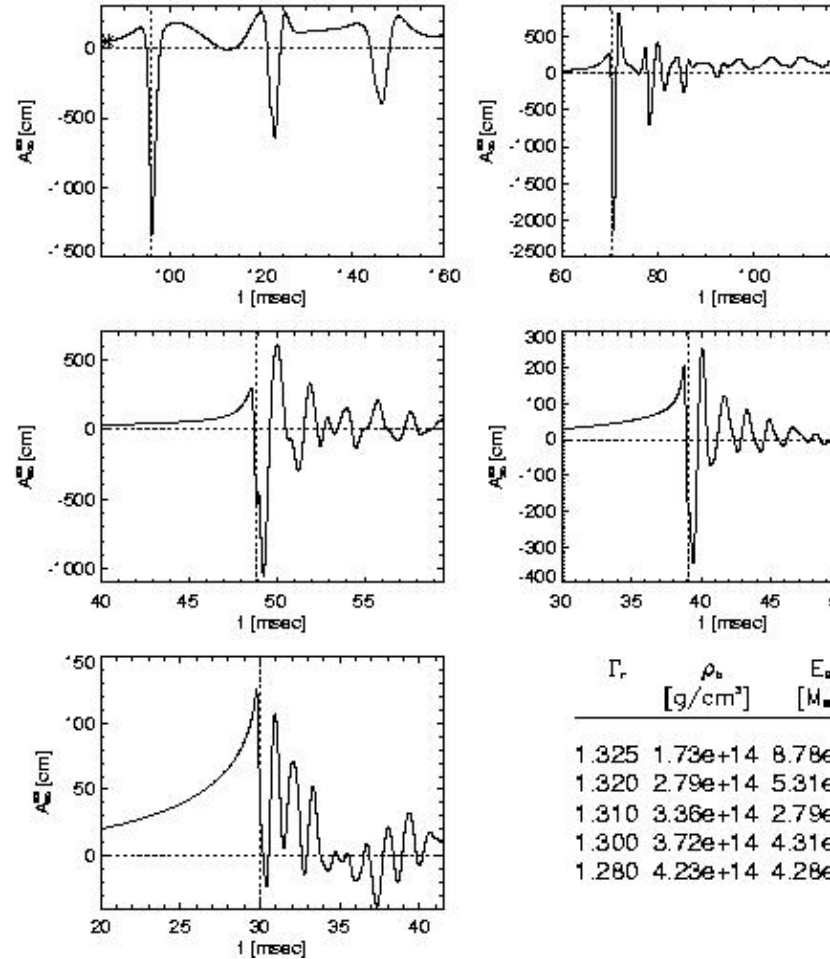
signaux impulsifs (durée ~ 1msec)

forme d'onde difficile à prévoir

Amplitude:  $10^{-21}$  à 30 kpc  
 pour collapse 'axisymmetric'  
 $10^{-21}$  à 10 Mpc  
 pour collapse 'non-axisymmetric'

Taux: dizaine d'évènements par an dans 10 Mpc

ondes gravitationnelles: seule possibilité pour avoir  
 des données directes sur la formation d'un trou noir



[Zwerger-Müller,

[www.mpa-garching.mpg.de/~ewald/GRAV/grav.h](http://www.mpa-garching.mpg.de/~ewald/GRAV/grav.h)



# *Détecter les Ondes Gravitationnelles: Pourquoi ?*

- Étude de l'interaction gravitationnelle
  - interaction très faible et très peu connue  $\left( \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 10^{-40} \ll \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \right)$
  - peu de données sur l'interaction gravitationnelle en champ fort ou sur ses effets non linéaires
- Nouveau moyen d'observation de l'univers
  - OG produites par le mouvement cohérent de grande quantité de matière
  - OG très peu absorbée par la matière

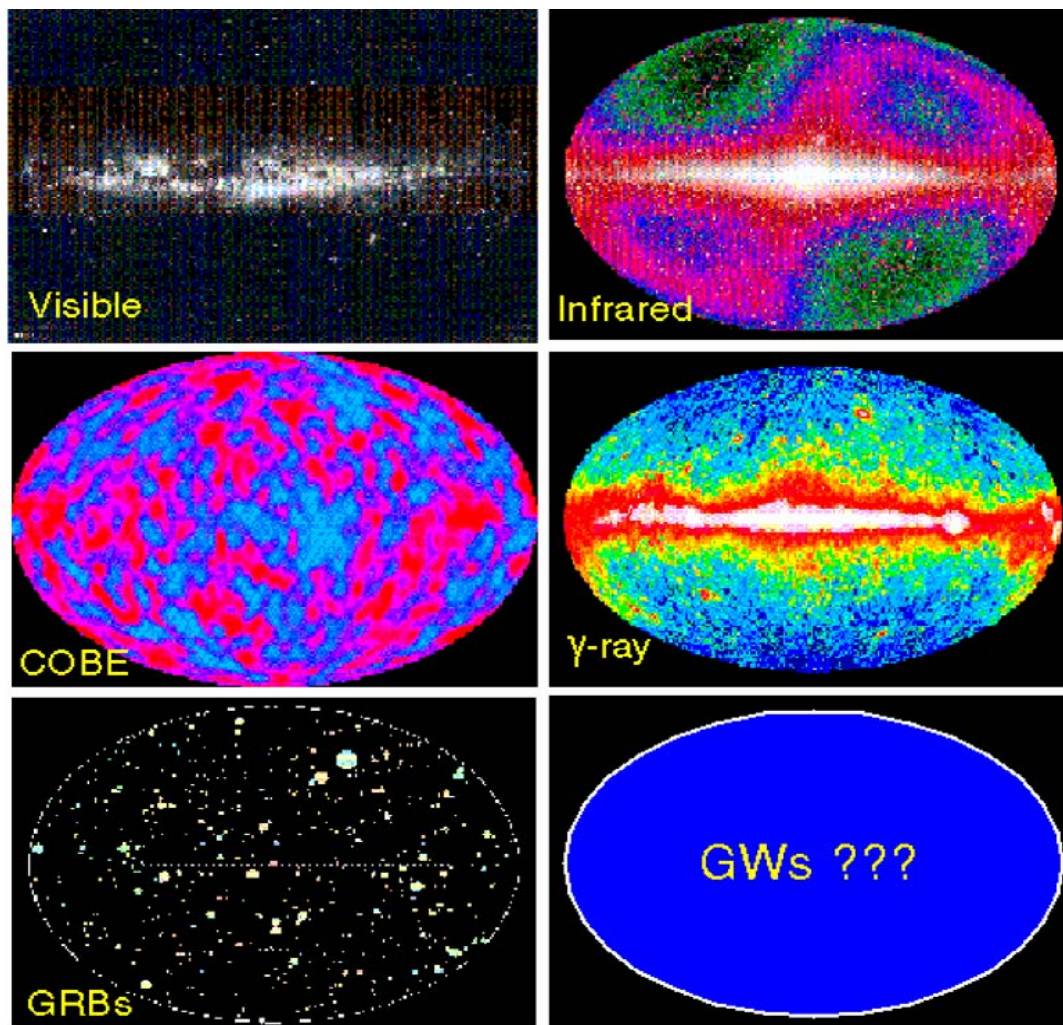


# *Détecter les Ondes Gravitationnelles: Pourquoi ?*

- Quels sont les états de polarisation d'une OG ?
- Quelle est la vitesse de propagation des ondes gravitationnelles ?
- Les 'Gamma Ray Burst' ?
- La constante de Hubble ?
- Quelles sont les lois physiques aux densités typiques d'une étoile à neutrons ?
- Quelle est la dynamique de l'effondrement du cœur d'une étoile ?
- La masse des neutrinos ?
- Comment se forme un trou noir ?
- Comment était l'univers à l'ère de Planck ( $10^{-43}$  s après le Big Bang)
- Cordes cosmiques, univers parallèles ?



# *Détecter les Ondes Gravitationnelles: Pourquoi ?*





# Détection Interférométrique des OG

Effet d'une onde gravitationnelle

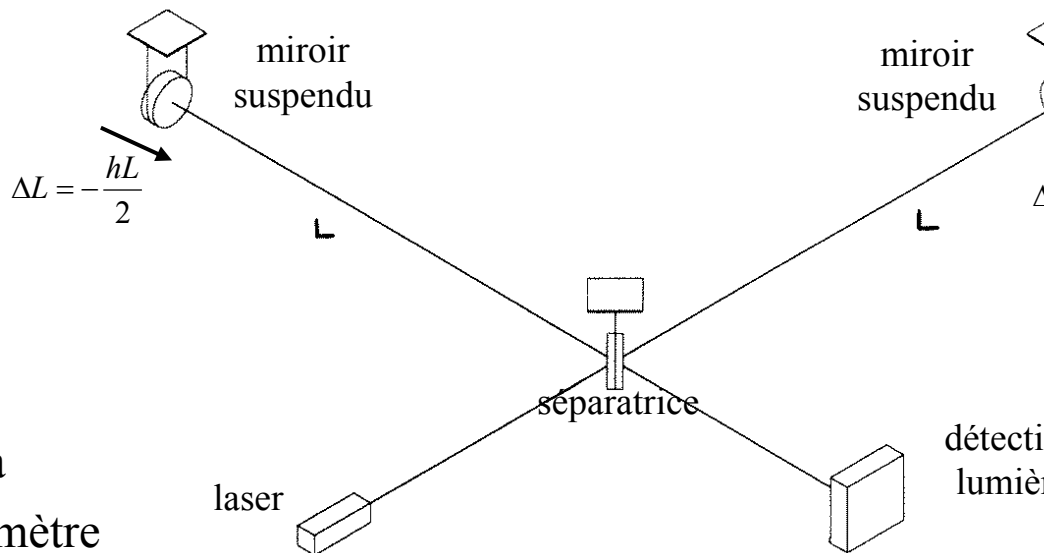
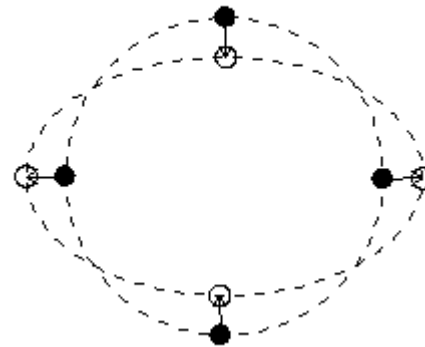
Interféromètre de Michelson

Miroirs suspendus avec pendules  
= masses en 'chute libre'

$h = 10^{-21}$ ,  $L = 3 \text{ km} \Rightarrow \Delta L \approx 10^{-18} \text{ m}$

OG  $\Rightarrow$  déphasage  $\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} hL$

Détection OG = mesure du déphasage à  
la sortie de l'interféromètre







# *Bruit de Photons*

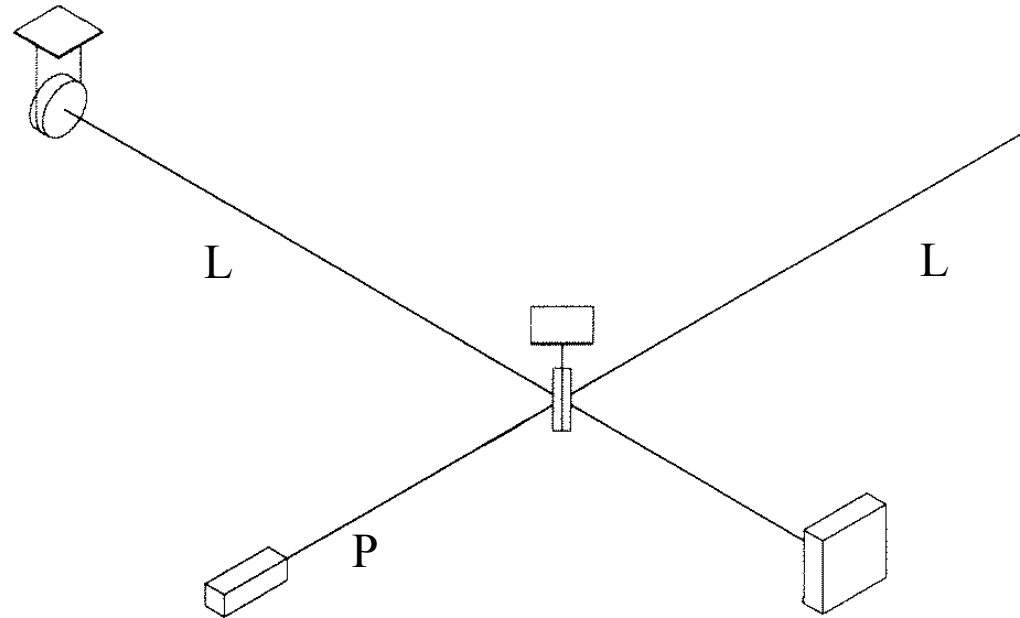
déphasage minimum détectable  $\propto N_\gamma^{-1/2}$

$$\tilde{\phi} = \sqrt{\frac{2\hbar\omega}{P}}$$

$$\tilde{h} \geq \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2\hbar\omega}{P}}$$

si  $L = 100 \text{ km}$  et  $P = 1 \text{ kW}$

$$h \sim 3 \cdot 10^{-23}$$





# *Bruit de Photons*

$$\tilde{h} \geq \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2h\omega}{P}}$$

augmentation longueur effective  
avec Fabry-Perot

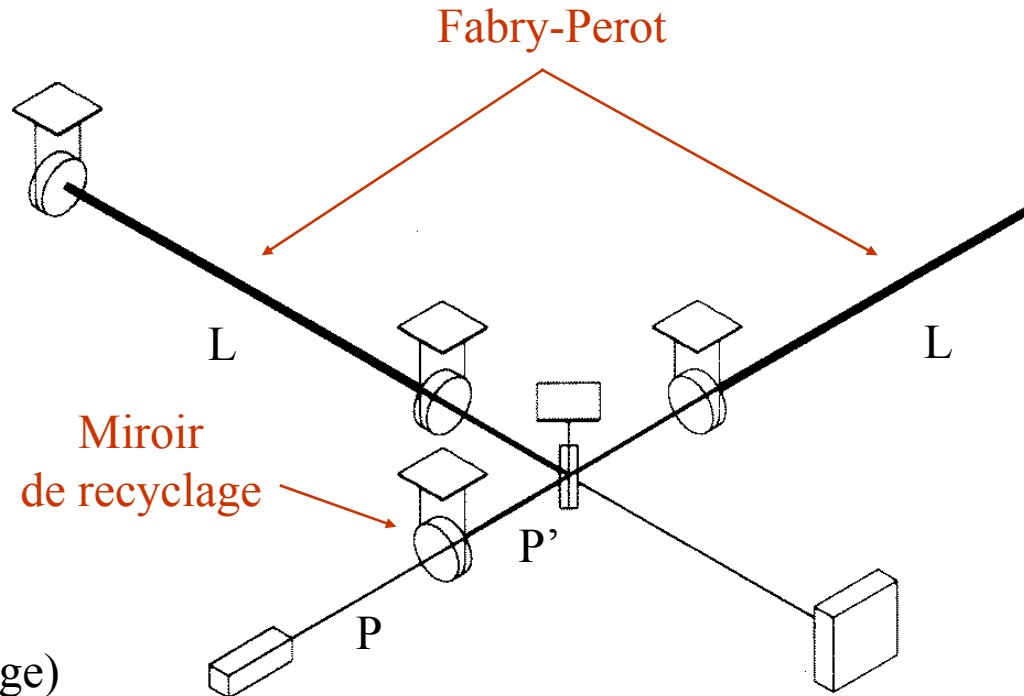
$$L' = \frac{2}{\pi} \cdot F \cdot L \quad (F = \text{finesse FP})$$

$$L' = 100 \text{ km avec } L = 3 \text{ km}$$

augmentation du nombre de photons  
avec recyclage de la lumière

$$P' = R \cdot P \quad (R = \text{facteur de recyclage})$$

$$P' = 1 \text{ kW avec } P = 20 \text{ W}$$





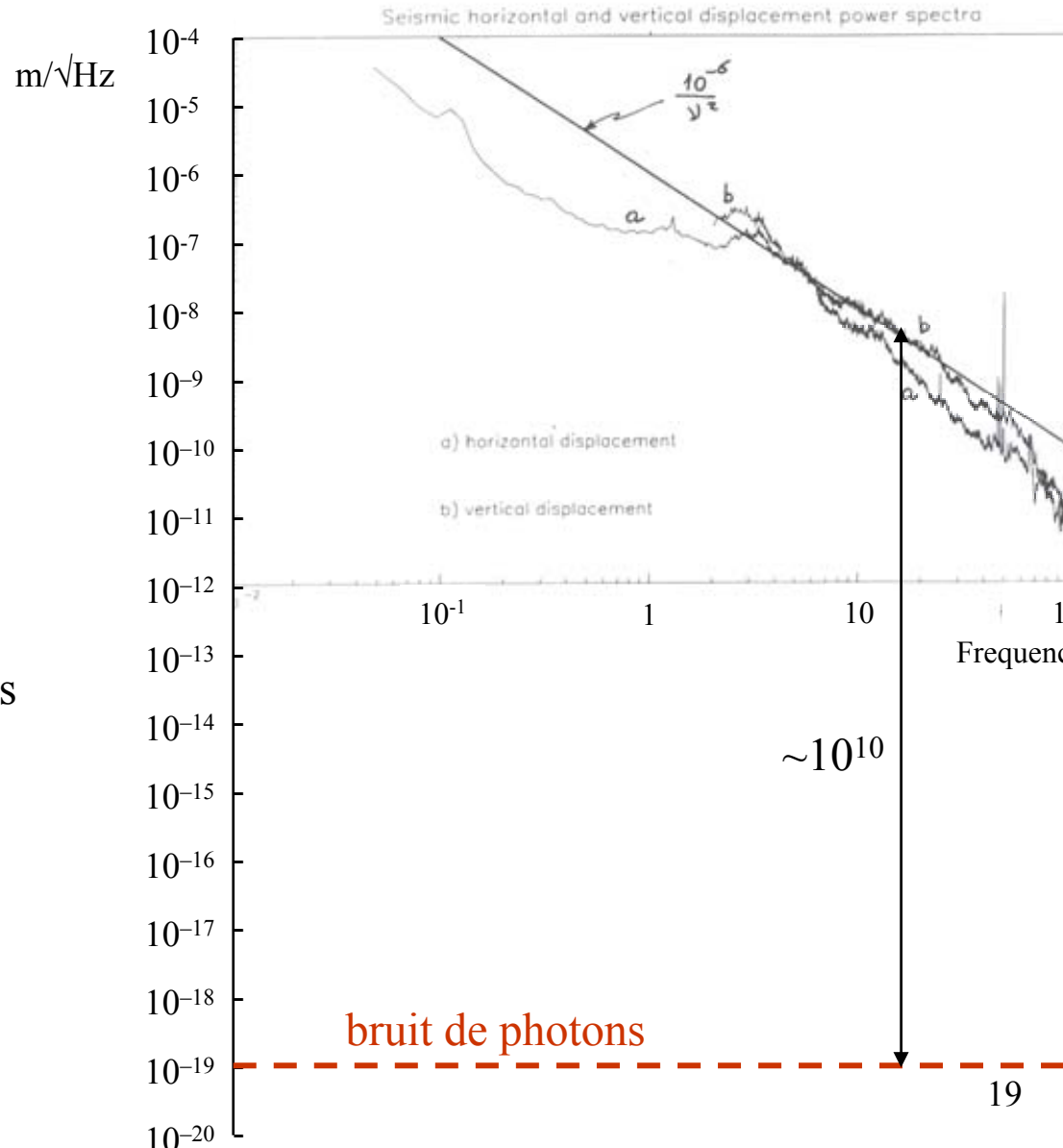
# Bruit sismique

- Spectre du bruit sismique  
à fréquence  $f \geq$  quelques Hz

$$\tilde{x}_s = \frac{a}{f^2} \frac{m}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

$$(a \approx 10^{-6} - 10^{-7})$$

- Plus important à basses fréquences
- Besoin d'une grande atténuation

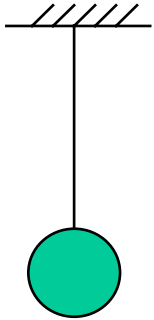




# Atténuation du bruit sismique

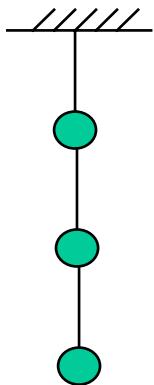
- Atténuation en horizontal: pendule  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$

Q = facteur de qualité

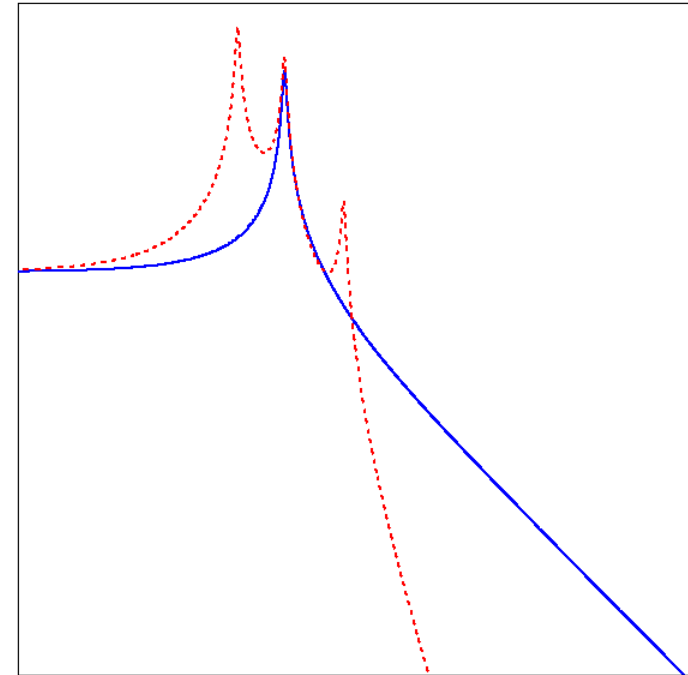


$$\frac{x}{x_0}(f) = \frac{f_0^2}{-f^2 + f_0^2 + i \frac{f \cdot f_0}{Q}}$$

- Plus d'atténuation: plusieurs pendules en cascade



$$\frac{x}{x_0}(f) = \prod_{k=1}^N \frac{f_k^2}{-f^2 + f_k^2 + i \frac{f \cdot f_k}{Q_k}}$$

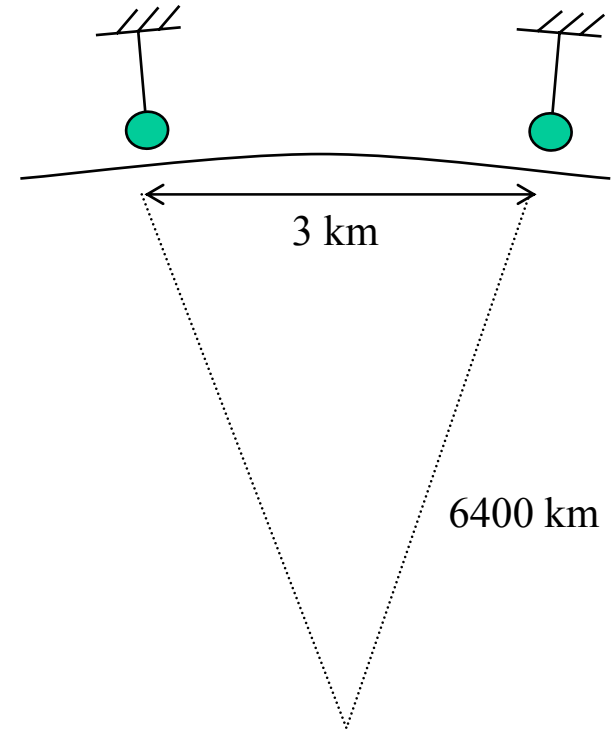
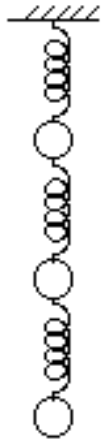




# *Atténuation du bruit sismique (continu)*

- couplage vertical-horizontal ( $> 2 \cdot 10^{-4}$ )

- atténuation en vertical nécessaire aussi





# *Bruit thermique*

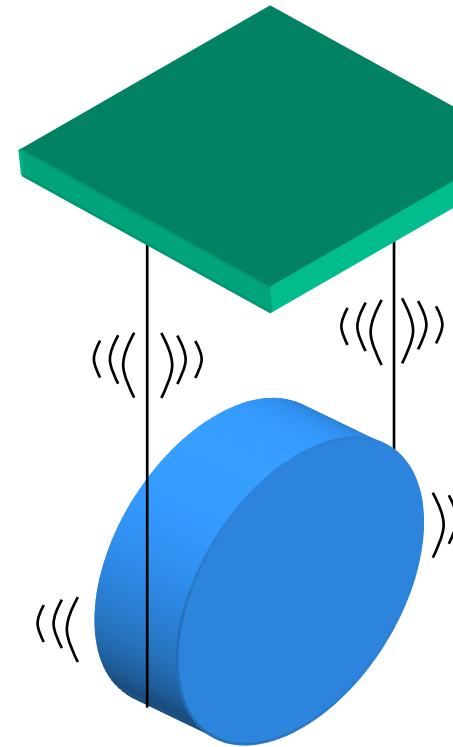
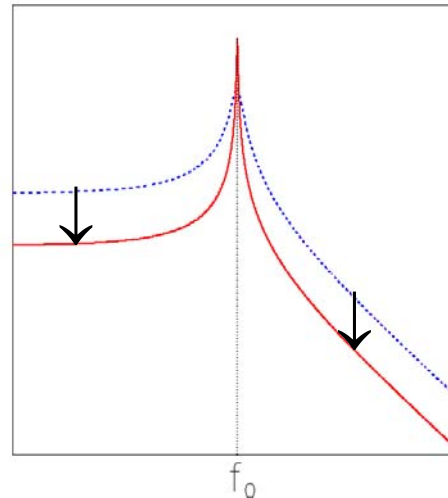
• Mouvement Brownien  $\tilde{F}^2(f) = 4k_B T \beta(f)$  ( $\beta(f)$  = facteur de dissipation)

- pendule
- fils
- miroir

• Spectre du mouvement thermique ( $\alpha$  = facteur de couplage)

$$\tilde{x}^2(f) = \alpha \frac{4k_B T \beta(f)}{m^2 (f^2 - f_0^2)^2 + \beta(f)^2 f^2}$$

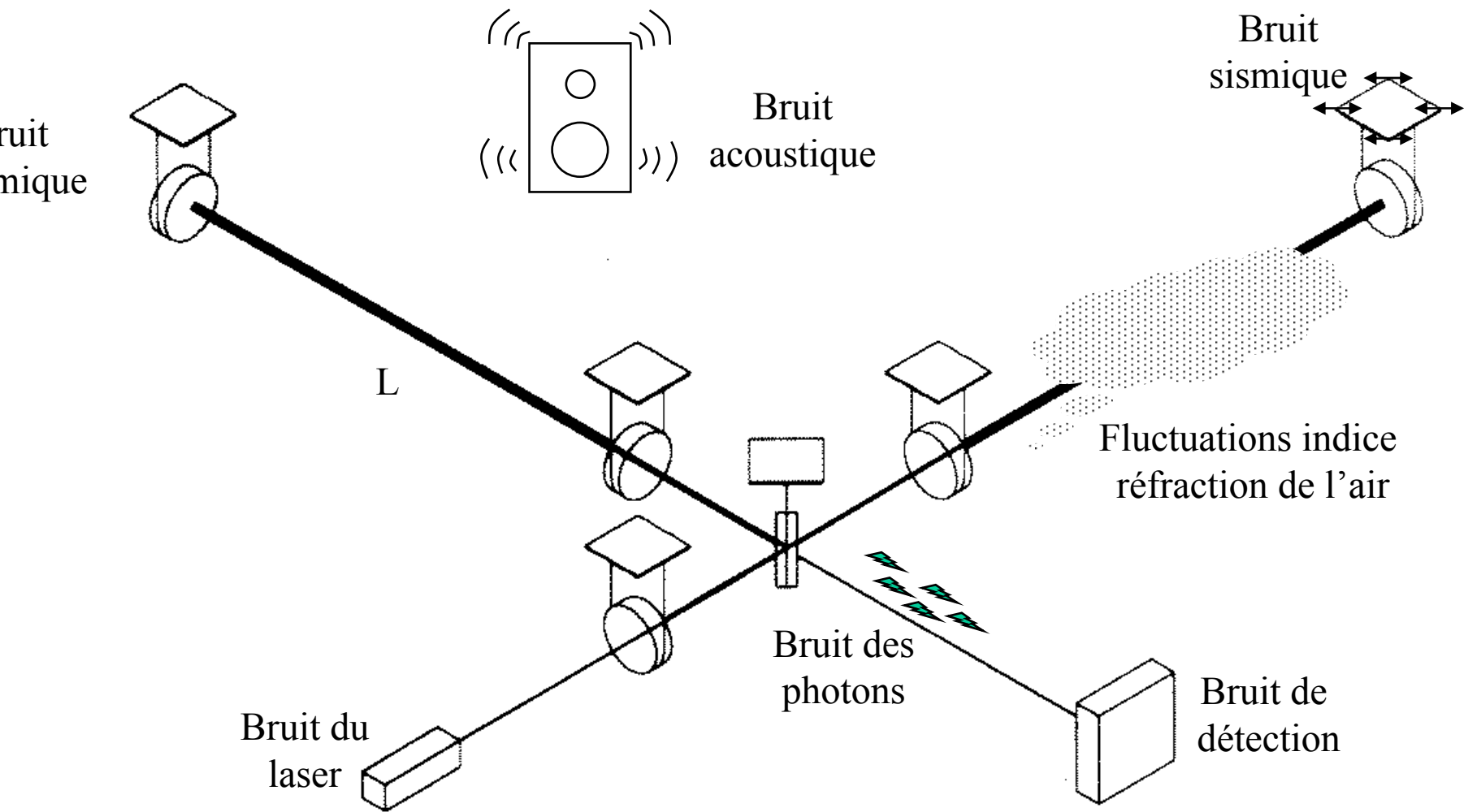
moins de dissipation  $\Rightarrow \beta \downarrow \Rightarrow$



- Utiliser des matériaux à faible dissipation

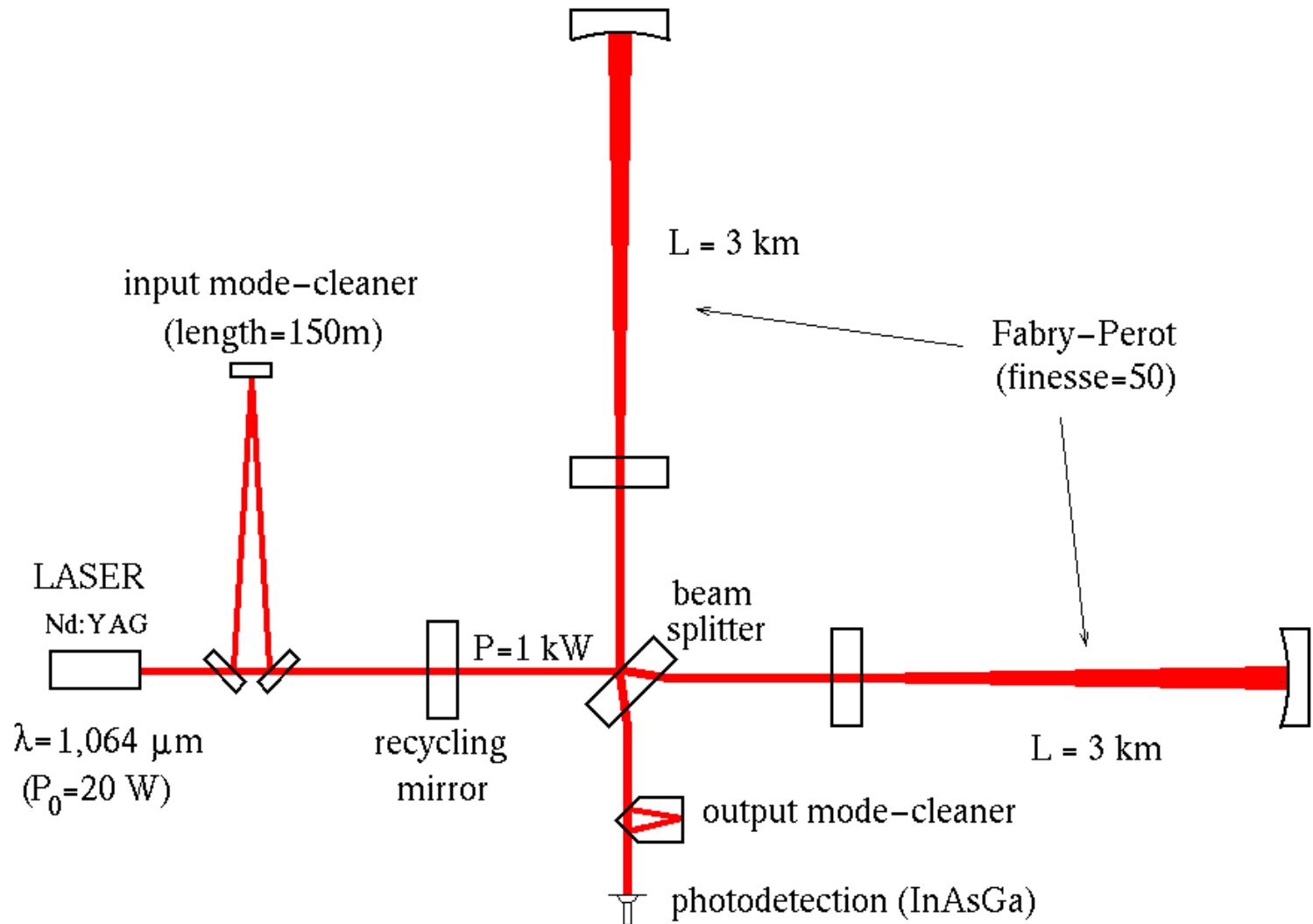


# *Autres sources de bruit*





# *L'interféromètre VIRGO*

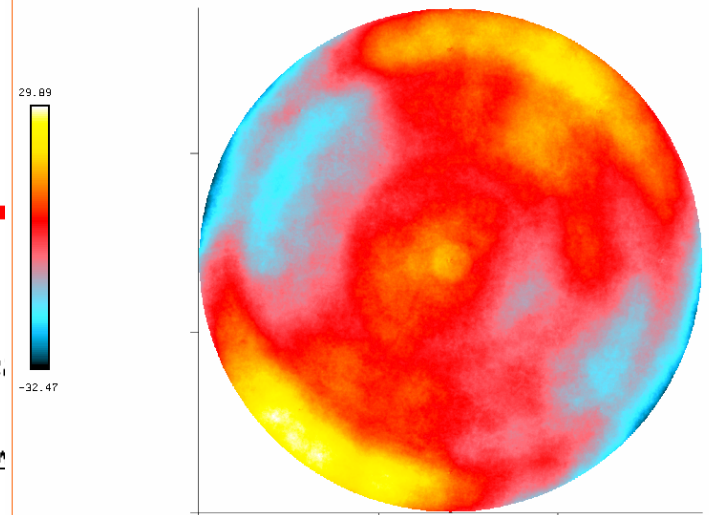
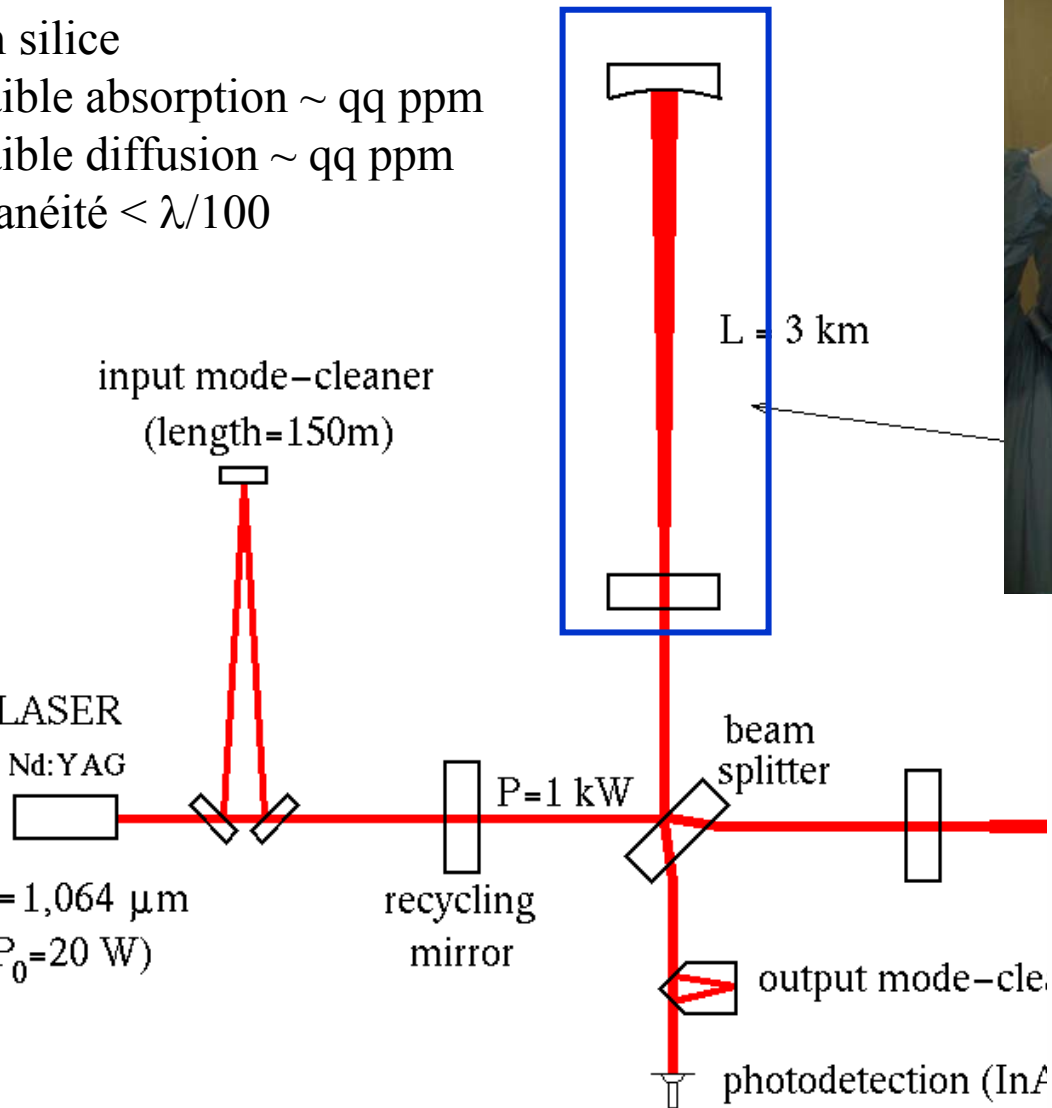






# Les miroirs

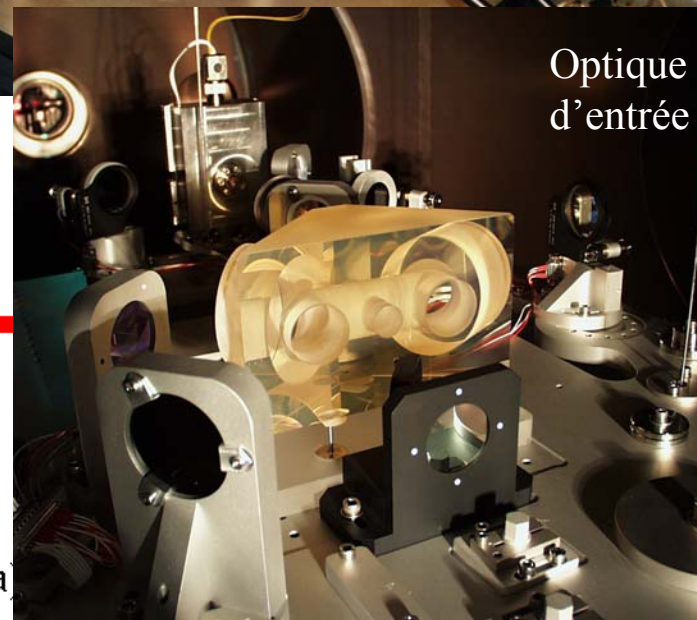
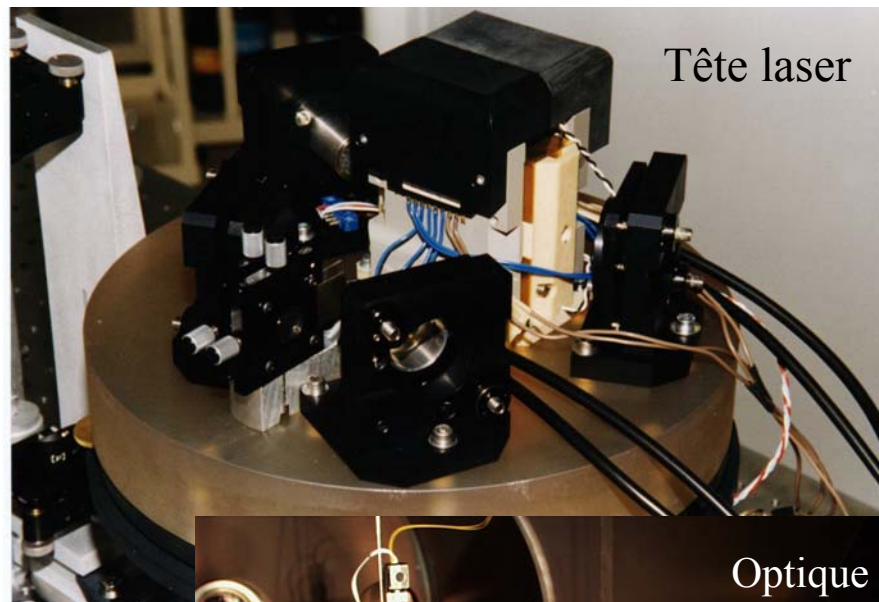
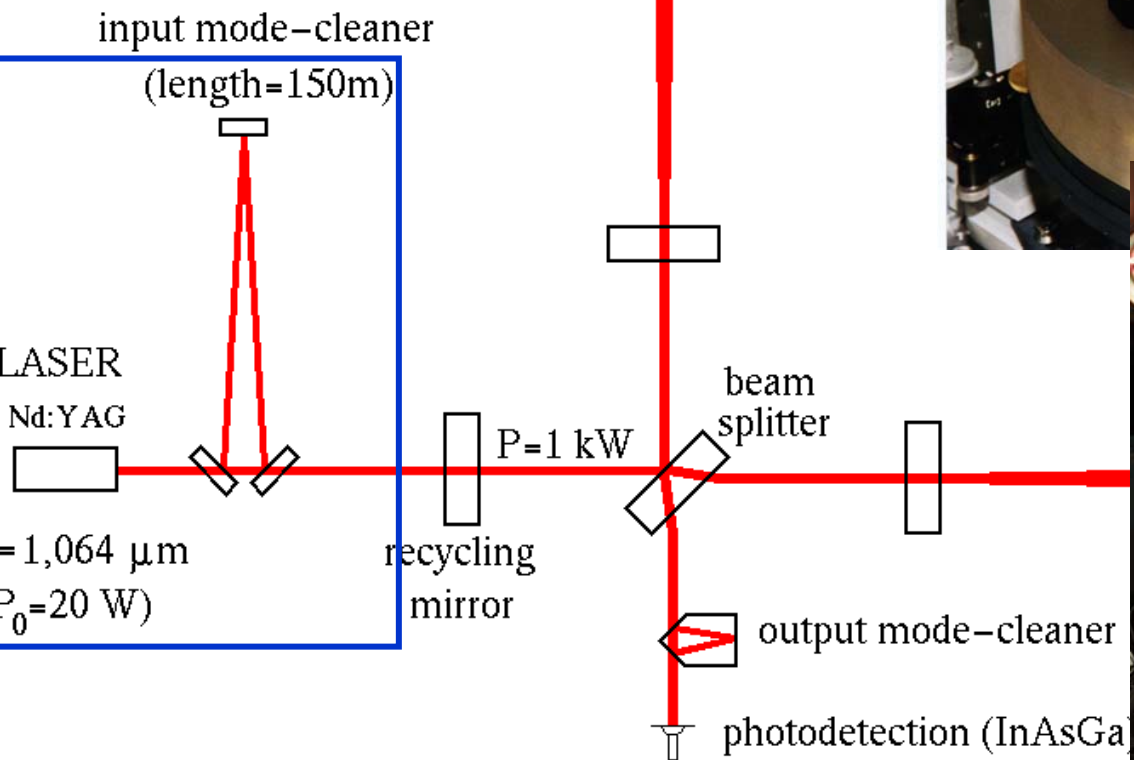
silice  
absorption  $\sim$  qq ppm  
diffusion  $\sim$  qq ppm  
transparence  $< \lambda/100$





# *Le système d'injection*

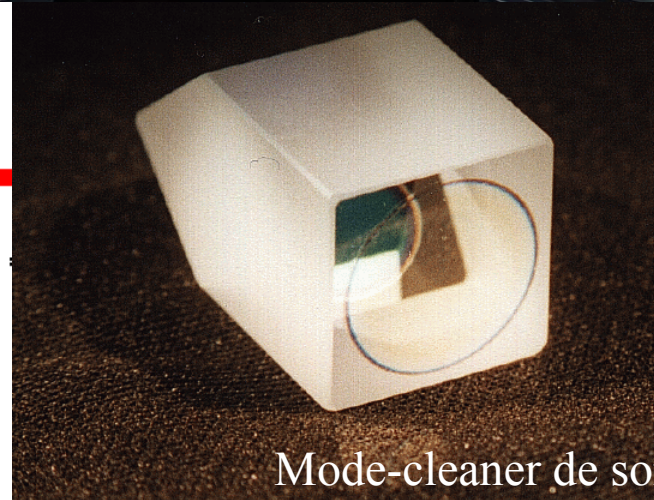
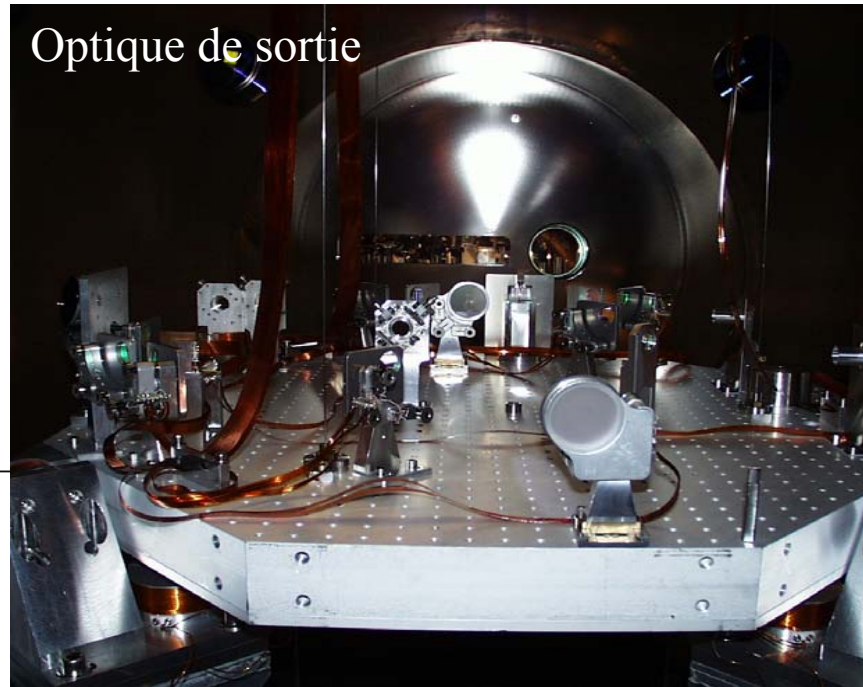
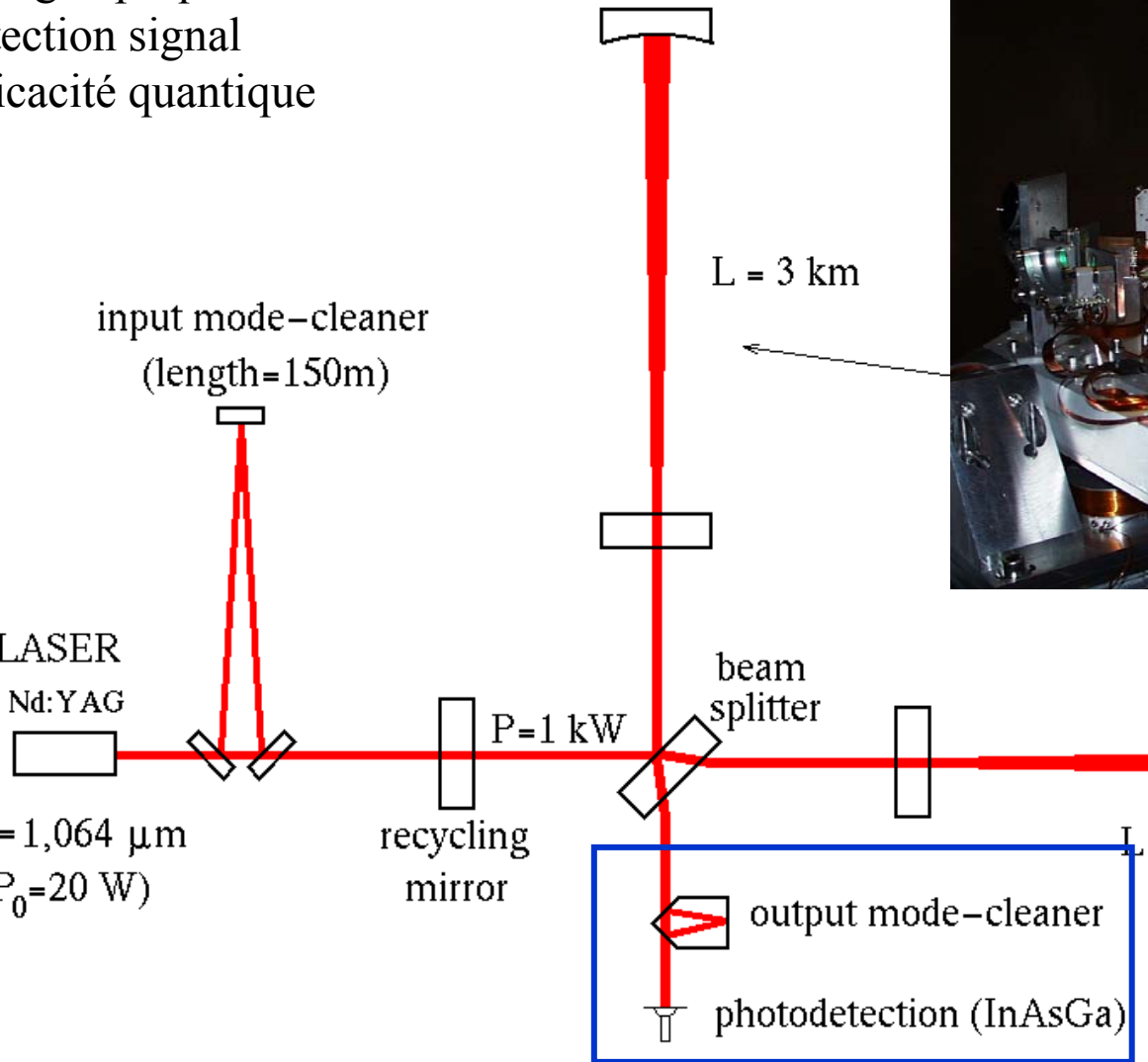
er puissant et stable  
tabilité en puissance:  $10^{-8}$   
tabilité en fréquence:  $\mu\text{Hz}$   
'mode-cleaner' d'entrée  
lirage optique du bruit du laser





# Le système de détection

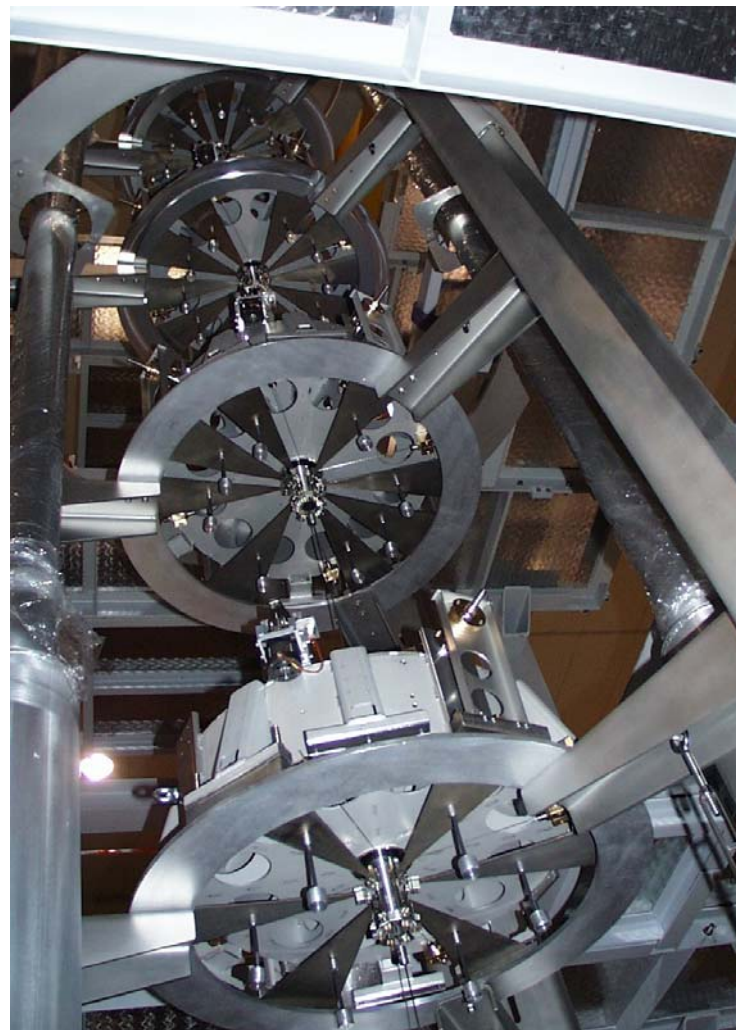
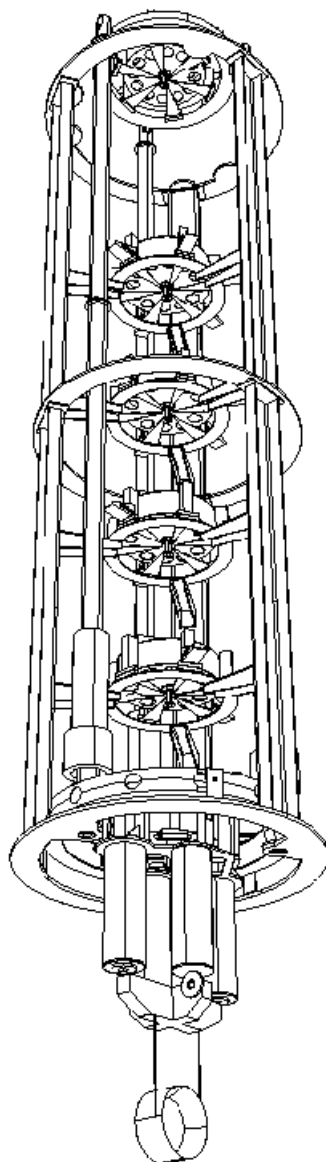
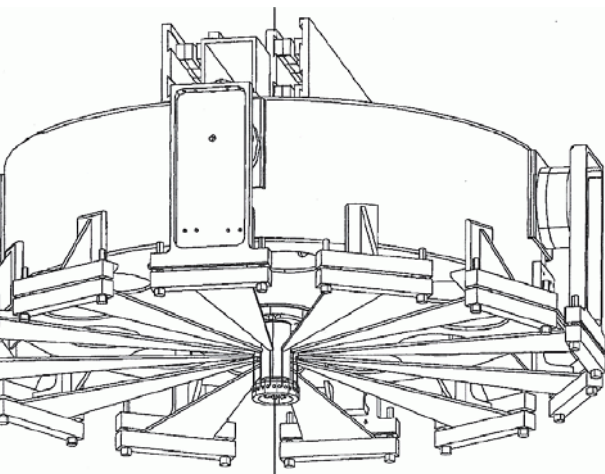
optique lumière diffusée  
détection signal  
efficacité quantique





# *L'isolation sismique*

Plateau sismique à plusieurs étages  
Isolation: pendule inverse  
Pendules pour isolation horizontale  
Sorts à lames pour isolation en vertical  
Étages en cascade  
Hauteur ~ 10 m



- Filtres à lame

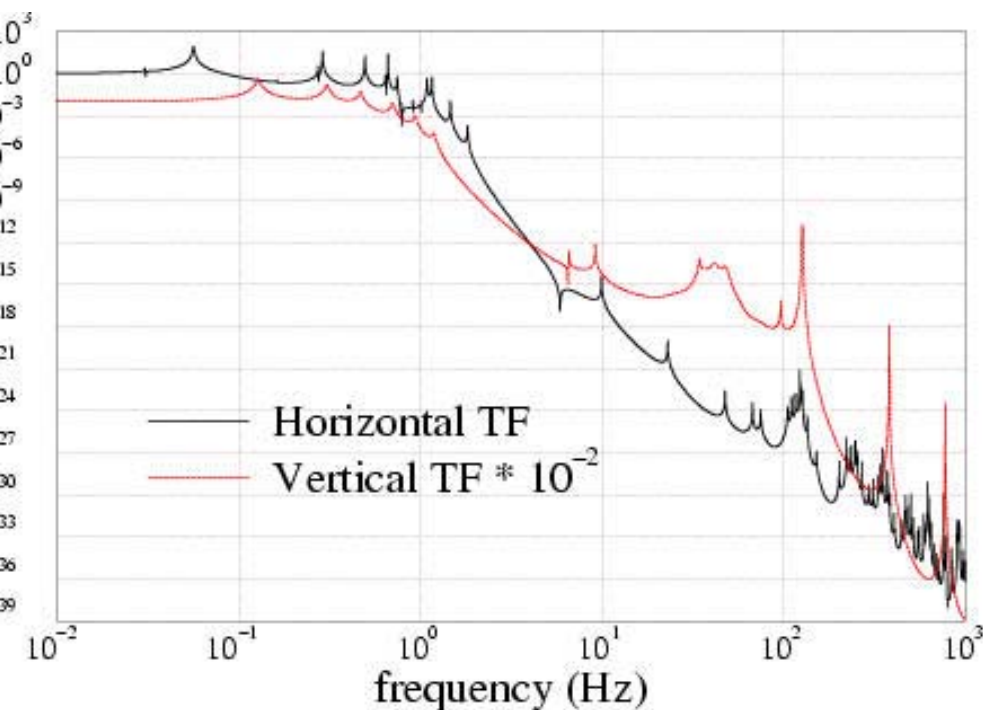


# Contrôle de l'interféromètre

grande atténuation dans la bande de détection (au dessus de quelques Hz)

pas d'atténuation ou amplification (résonances de la suspension) au dessous de quelque

micro mouvements/dérives à basses fréquences  $\sim 10^{-4}$ - $10^{-3}$  m



- Contrôles actifs nécessaires pour

- 1) maintenir l'interféromètre aligné

- 2) maintenir l'interféromètre dans les conditions d'interférence requises

- Stratégie en deux étapes:

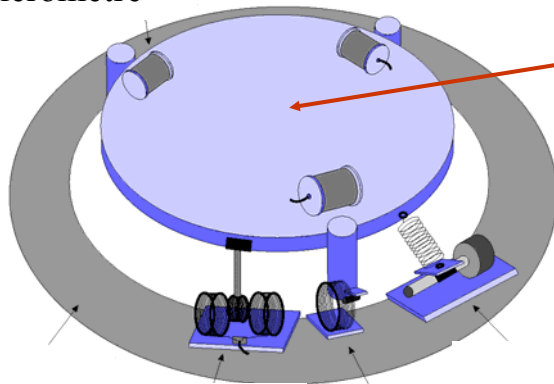
- 1) contrôle local des suspensions

- 2) contrôle global des conditions d'interférence



# Contrôle des suspensions

accelerometre



senseur de déplacement    actionneur

mortissement inertiel

mesure accélération du pendule inverse

proaction via actionneur e.m. attaché au sol

servissement position miroir

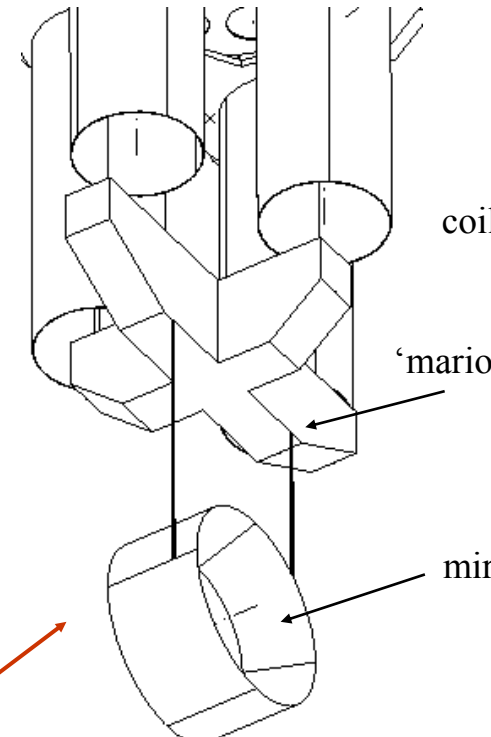
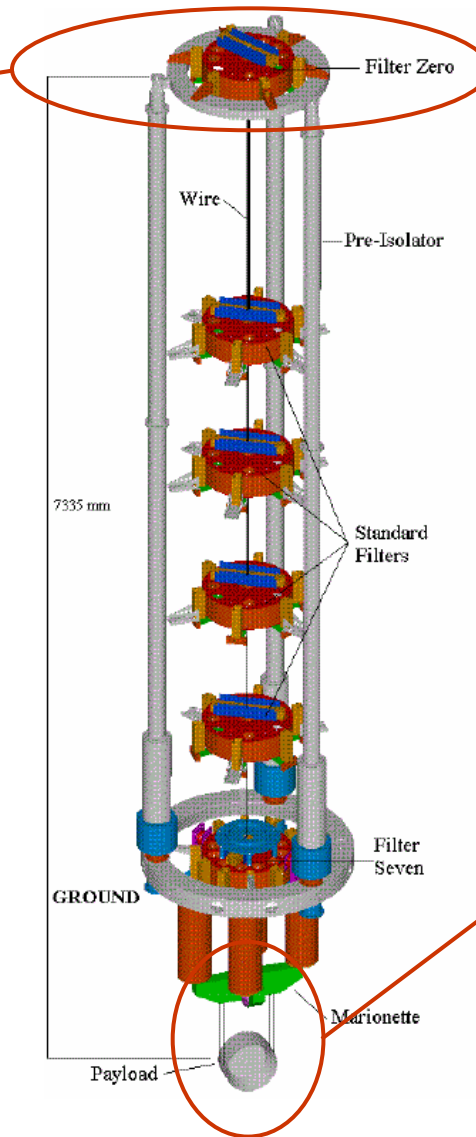
mesure position miroir par rapport au sol

proaction via actionneur e.m. suspendu

résultat:

attention franges d'interférence

placement résiduel  $< \lambda$





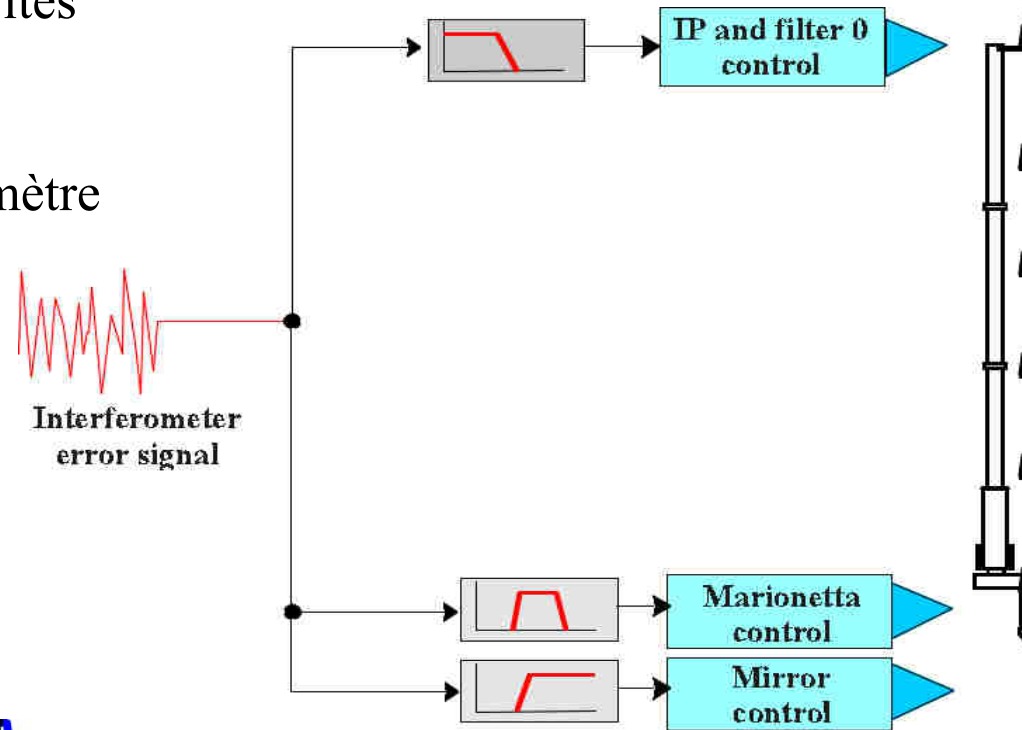
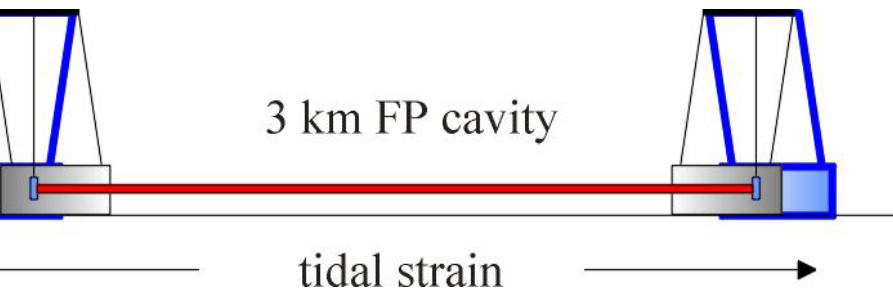
# Contrôle des conditions d'interférence

Besoin de contrôler la longueur des cavités  
avec une précision de  $10^{-12}$  m

Utilisation du signal issu de l'interféromètre

Plusieurs photodiodes placées  
à différents endroits

Corrections envoyées aux différents  
actionneurs de façon hiérarchique



- Corrections des dérives envoyées vers les pendules inversés (IP)
- Corrections fines envoyées aux miroirs



# Monitoring, DAQ et 'On-line'

environ 500 canaux à enregistrer en continu (24h/24h)

**Signaux de l'interféromètre**

**Signaux des boucles de contrôle**

**Signaux de monitoring de l'environnement**

canaux utilisés dans des boucles de contrôle

**Front end basée sur VME+CPU temps réel (LynxOS)**

canaux depuis sites distants (3km)

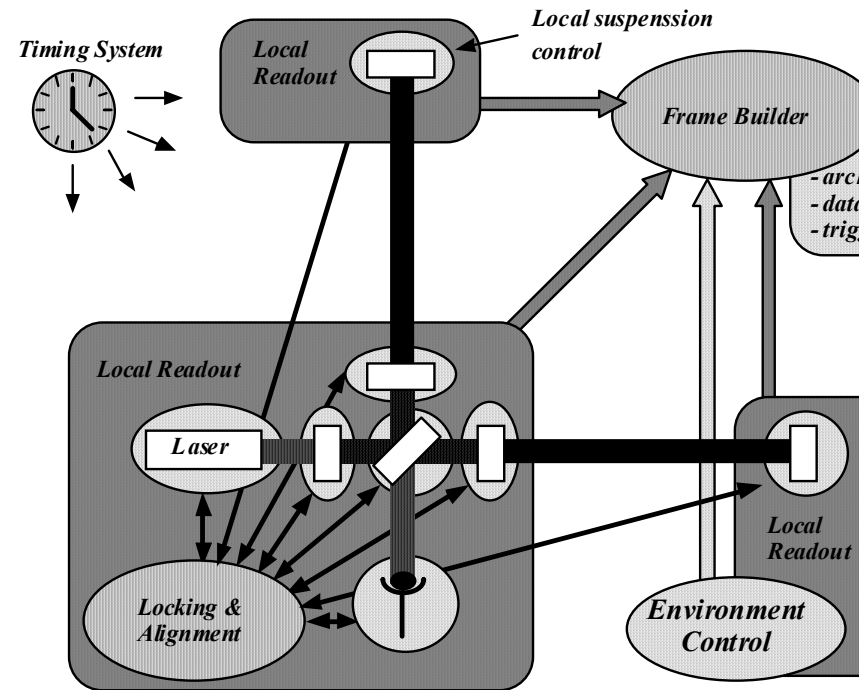
**data transfert avec link optiques et Ethernet**

besoin de timing précis et synchrone

**utilisation du GPS**

flux total  $\sim 4 \text{ MB/s}$  (compressé) = 140 TB/an

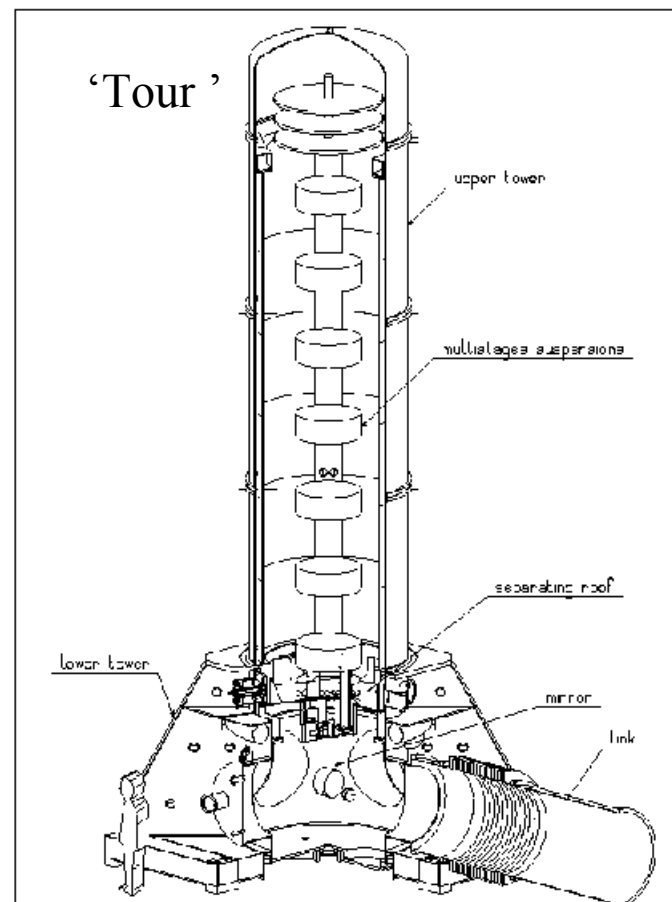
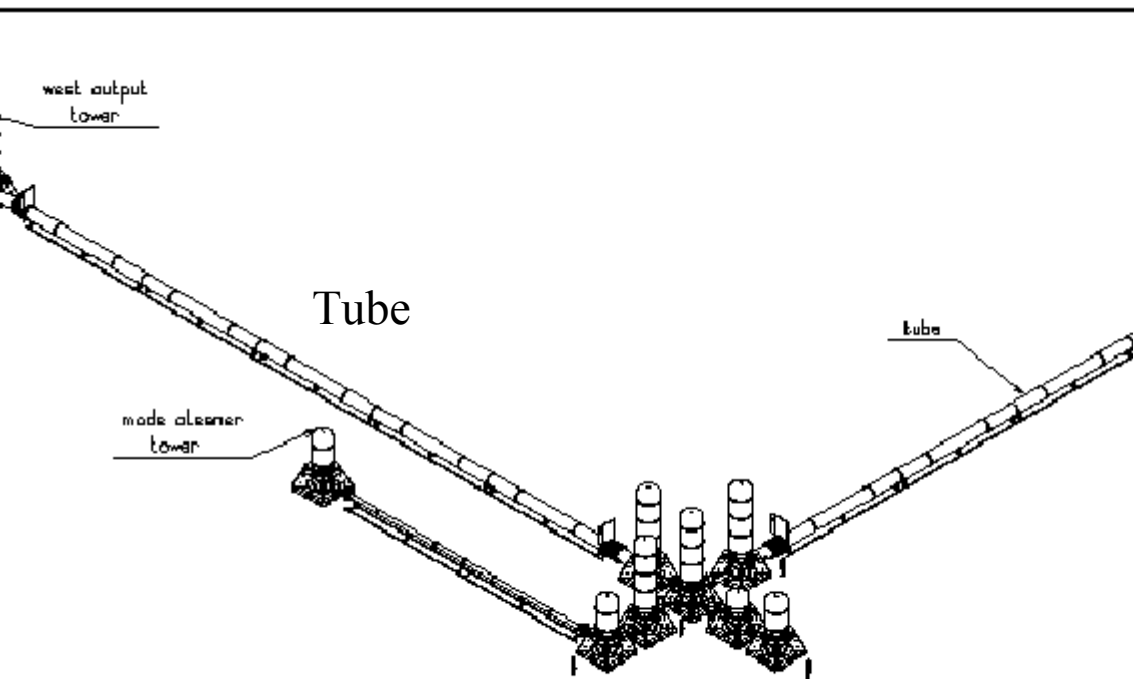
**besoin d'un traitement des données en ligne**





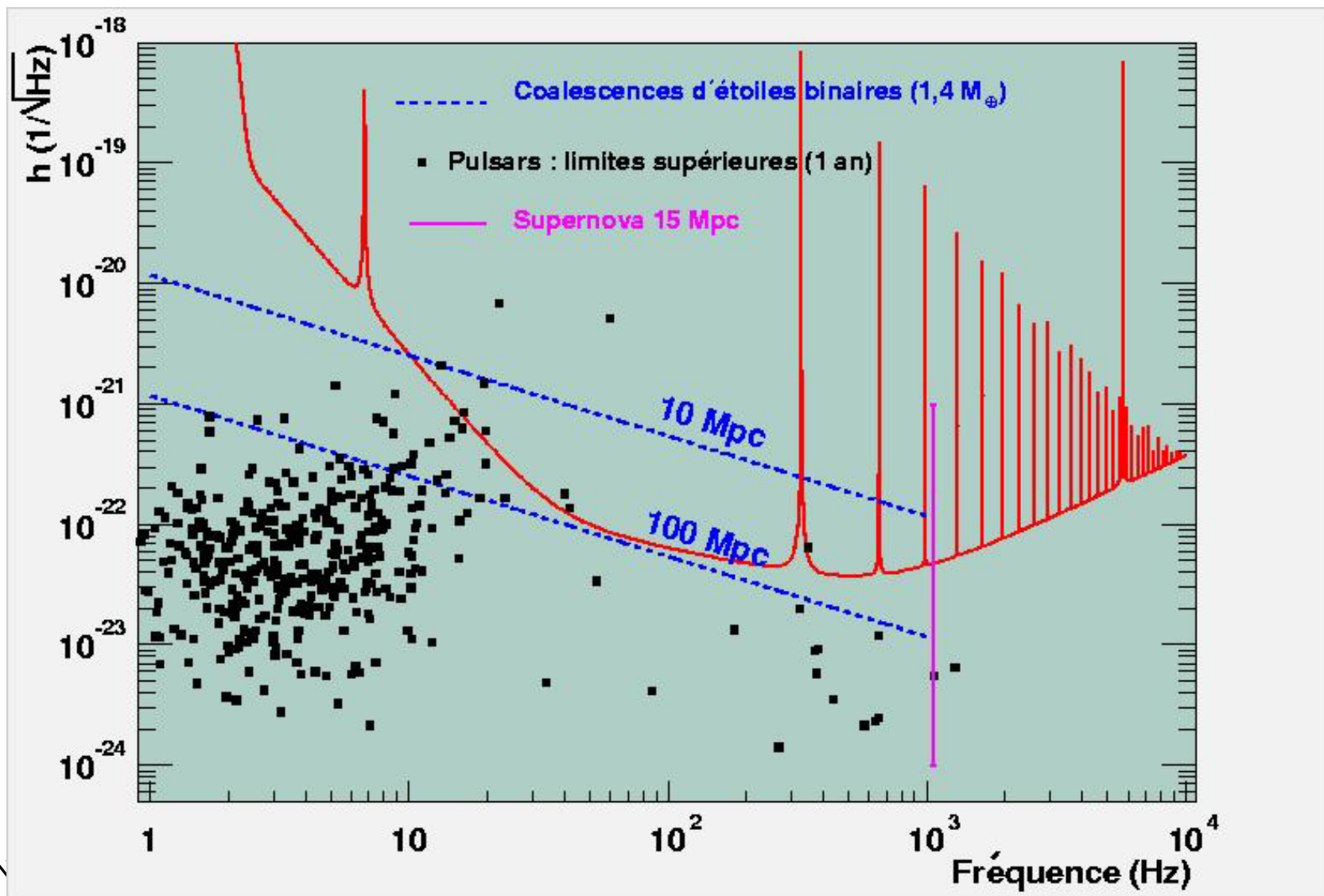


# Systeme à vide





# *VIRGO planned sensitivity*





# *La collaboration VIRGO*

- Collaboration franco-italienne
- Financée par le CNRS en France et l'INFN en Italie

**LAPP Annecy**, INFN Firenze, INFN Frascati, **IPN Lyon**,  
INFN Napoli, Observatoire de Nice, **LAL Orsay**, ESPCI Paris,  
INFN Perugia, INFN Pisa, INFN Roma

- Environ 170 personnes (physiciens + ingénieurs)
- Environ 70 personnes à l'IN2P3
- Importantes responsabilités assurées par l'IN2P3:
  - détection, DAQ, timing, calibration, enceintes à vide (LAPP)
  - contrôle, tube à vide, diaphragmes, superviseur (LAL)
  - traitement et métrologie des miroirs (IPNL)



# *La construction de VIRGO*

- Planning dicté par la construction des infrastructures
  - Début de la construction: 1996
  - Dernier bâtiment disponible depuis le printemps dernier

- Partie centrale disponible depuis 1998





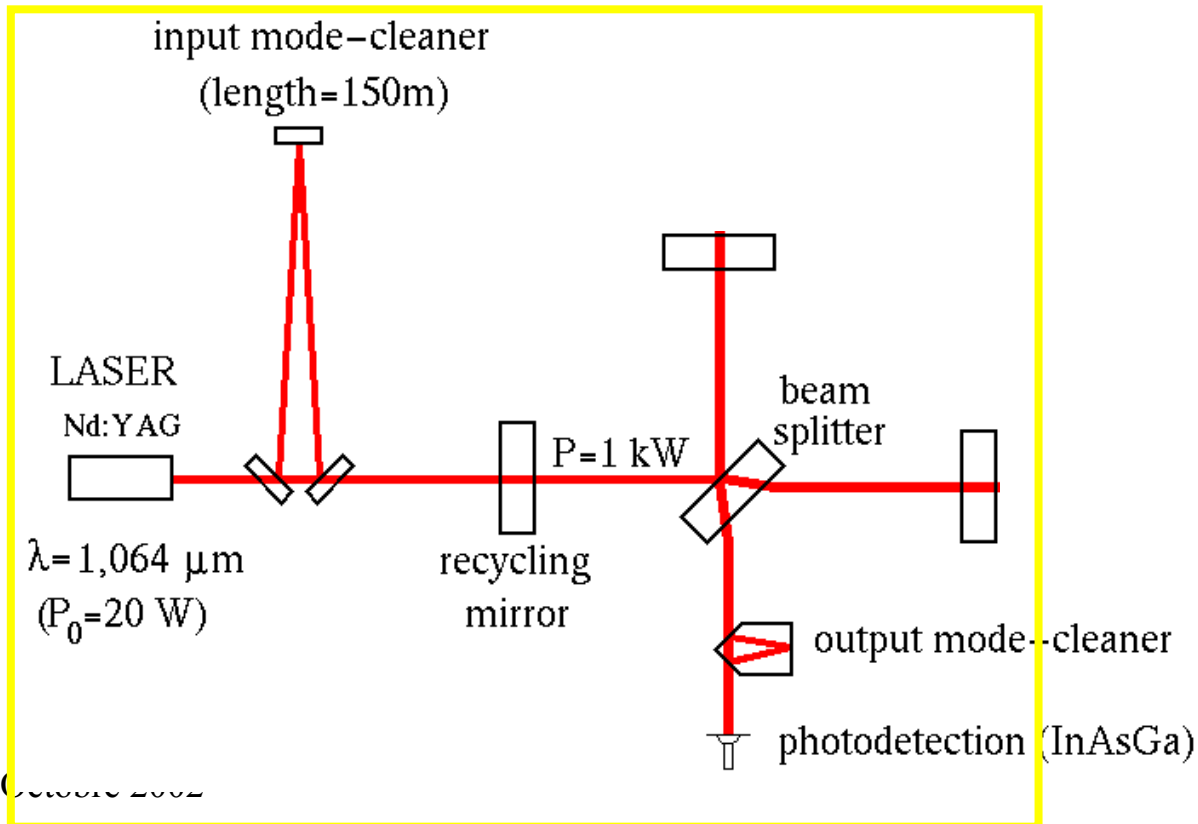
# *L'interféromètre central (CITF)*

Miroirs totalement réfléchissants remplacent

les miroirs d'entrée des Fabry-Perot

l'interféromètre de Michelson avec recyclage

Bras  $\sim 6$  m de long





# *CITF vs Virgo*

## Interféromètre central: premier test de Virgo

- *même* suspensions
- *même* système d'injection de la lumière
- *même* système de détection du signal
- *même* système de contrôle
- *même* monitoring de l'environnement
- *même* acquisition des données

## Différences principales

- pas de cavités Fabry-Perot !
- faisceau plus petit
- laser de 10 W (20 W dans Virgo)
- miroirs plus petits (fixés sur des supports de la même taille que les miroirs finaux)



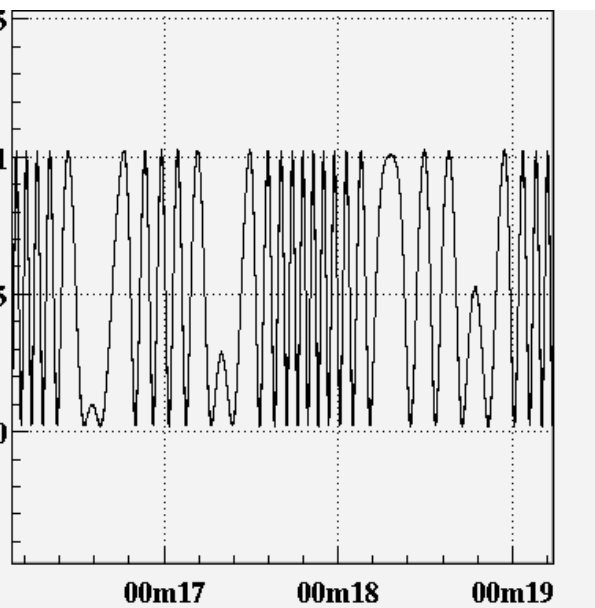


# Premières opérations avec le CITF

commencé en 2001 avec un laser de test  
(pré-commissioning du laser plus long que prévu)

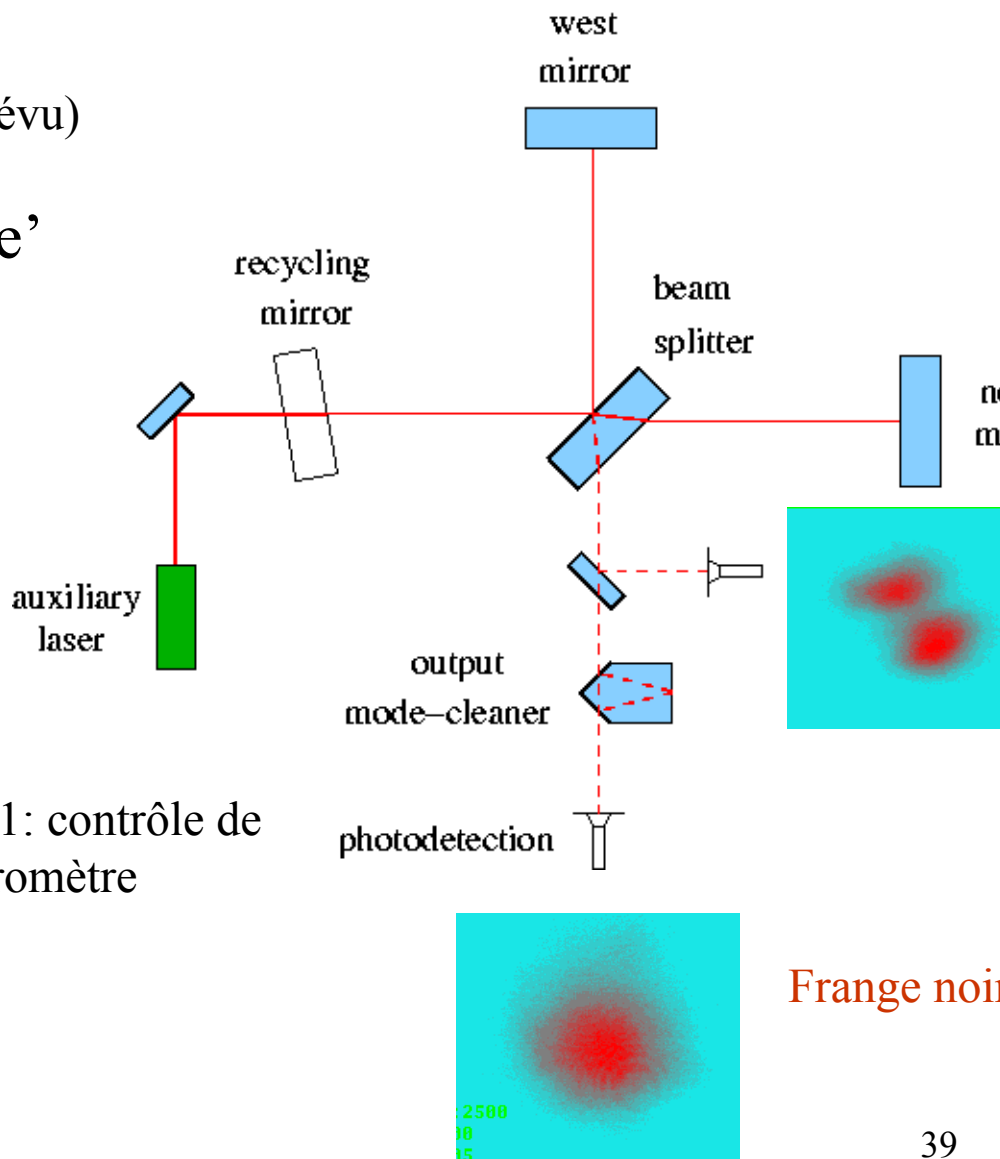
## Configuration 'Michelson simple'

juin 2001: premières franges d'interférences



ISN Grenoble, 31 Octobre 2002

Juin 2001: contrôle de l'interféromètre



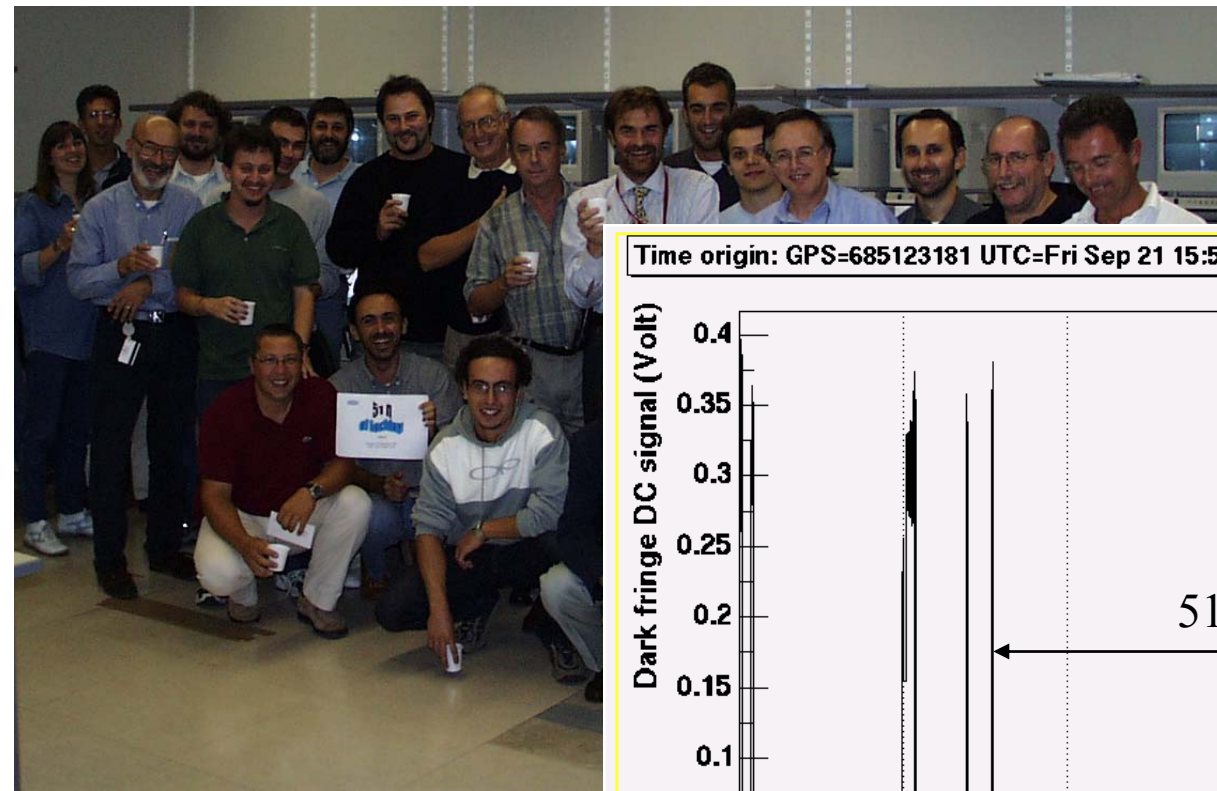
Frangé noir



# Tests à long terme: 'engineering runs'

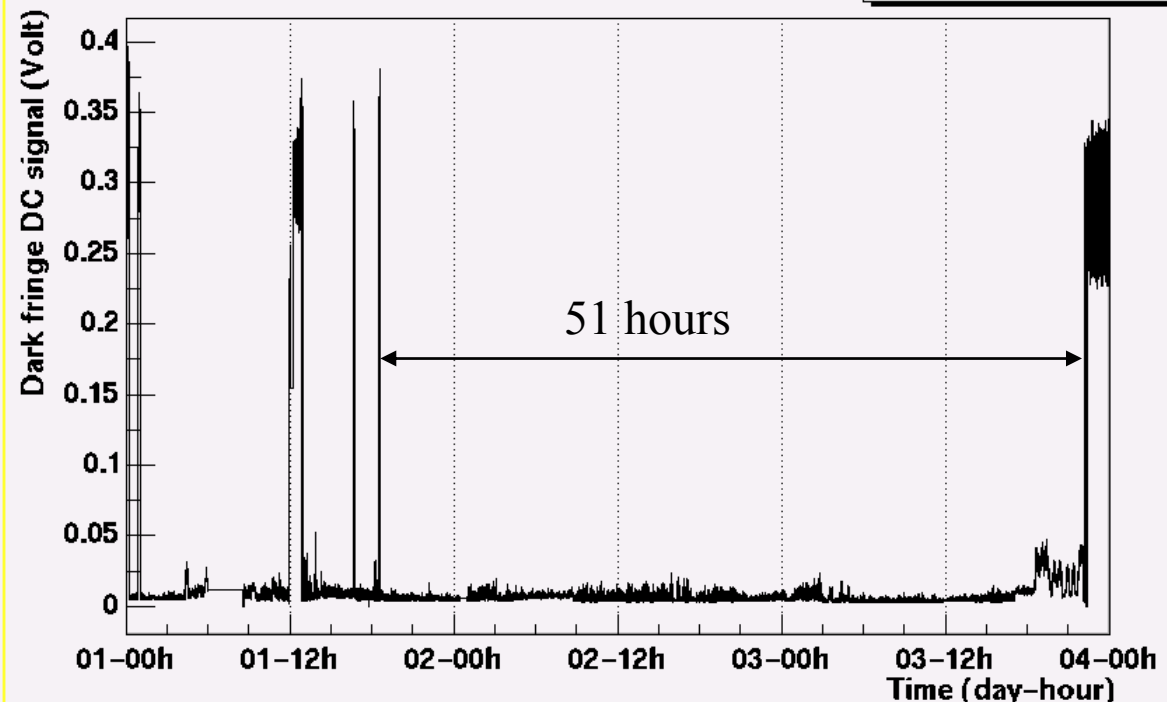
- Test de la fiabilité pendant les premiers runs techniques (3 jours, 24h/24h)
  - E0: Sep. 2001, E1 Déc. 2001

ITF verrouillé sur la frange noire pendant plus de 50h



Time origin: GPS=685123181 UTC=Fri Sep 21 15:59:28 2001

Pr B1p DC mean



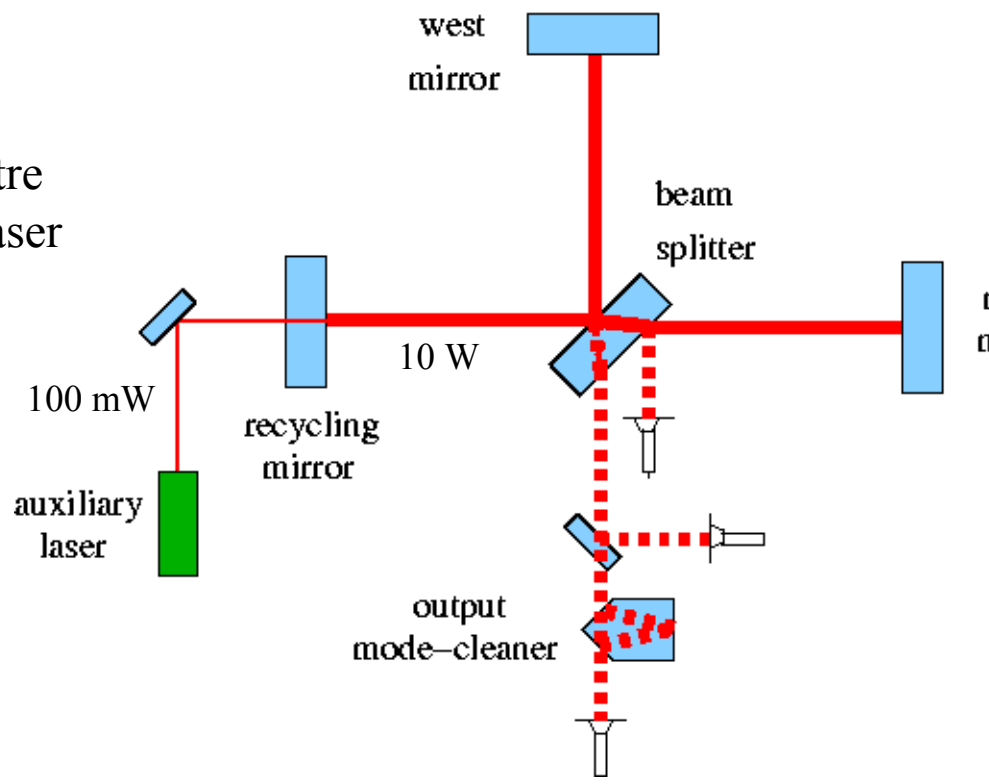
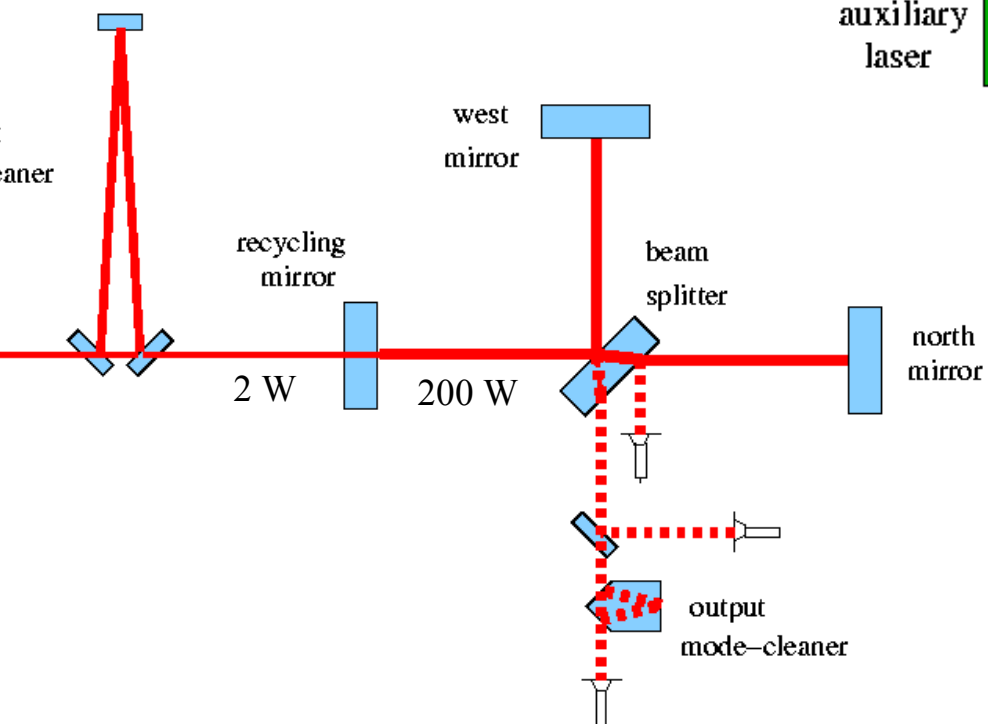




# La suite des opérations avec le CITF

## Configuration 'Michelson recyclé'

- Décembre 2001 verrouillage interféromètre
- Février 2002 stabilisation fréquence laser
- Avril 2002 alignement automatique



## Utilisation du système d'injection

- Juin 2002 alignement faisceau
- Juillet 2002 contrôle de l'ensemble l'interféromètre



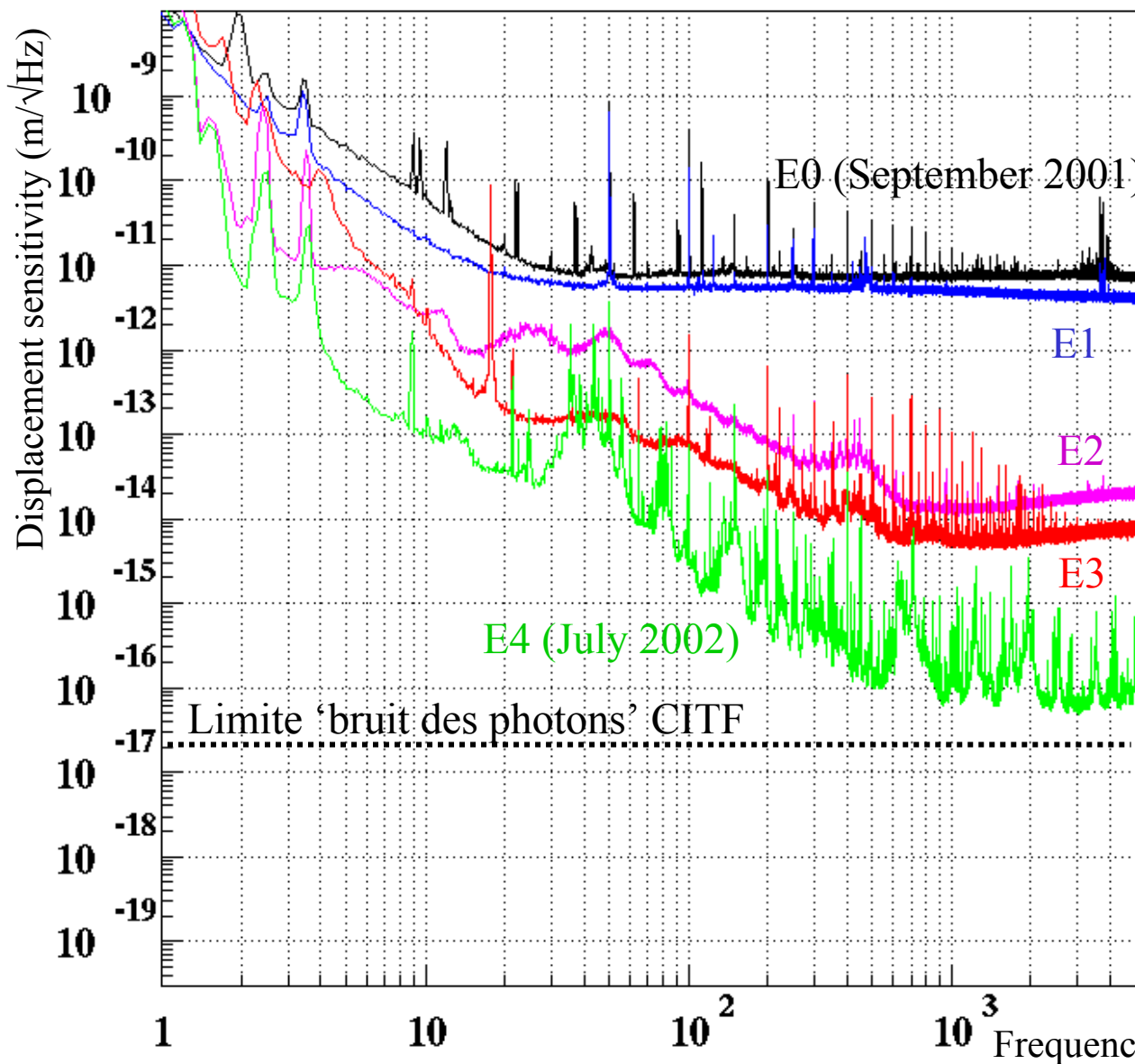
# *Sensibilités obtenues avec le CITF*

E1: Simple Michelson

Michelson recyclé

E2+alignement automatique

E3+injection 'finale'





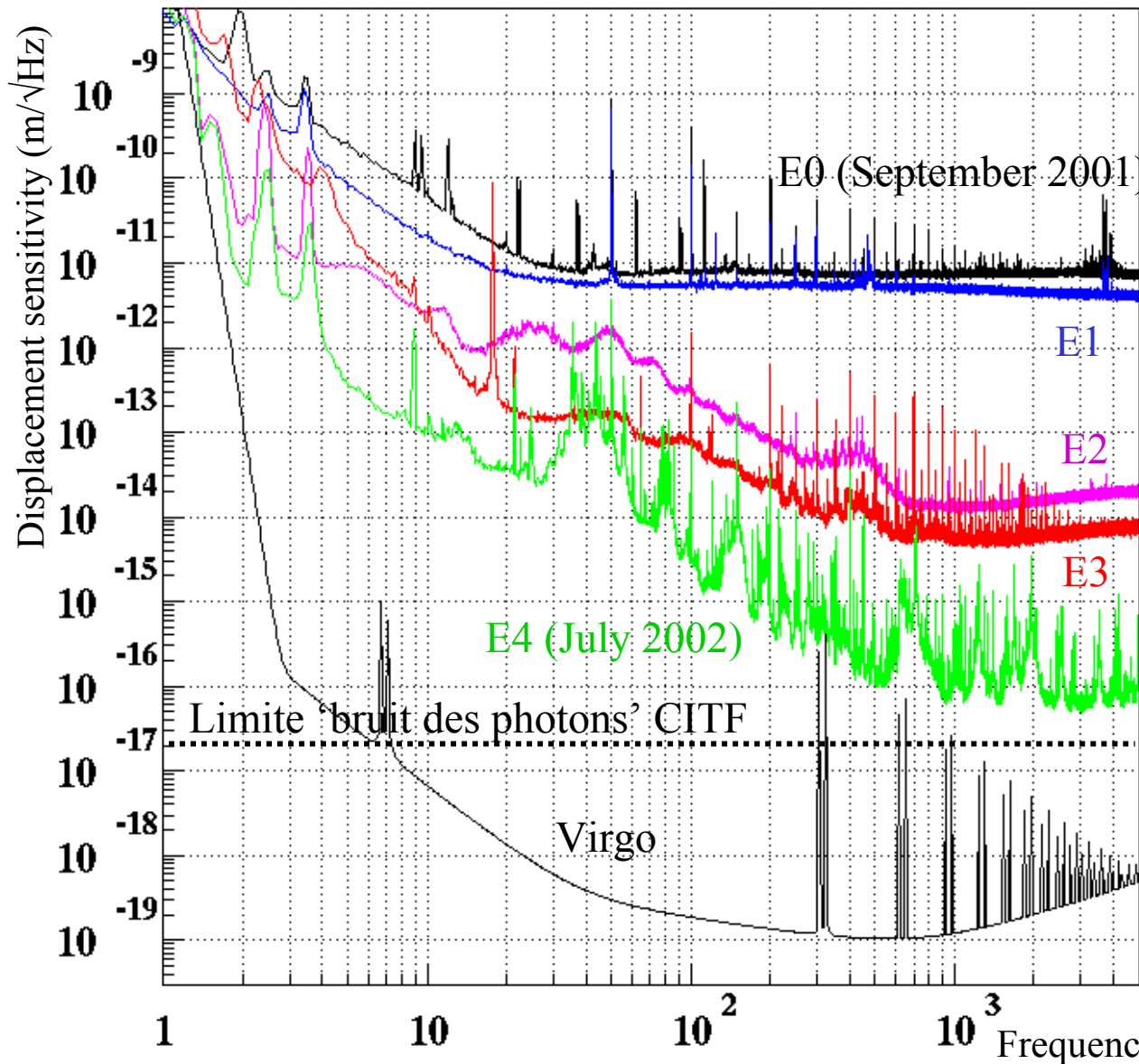
# *Sensibilités obtenues avec le CITF*

E1: Simple Michelson

Michelson recyclé

E2+alignement automatique

E3+injection 'finale'





# *E4: étude de la sensibilité*

Identification du bruit

10 Hz

Tit du contrôle angulaire

Hz < f < 200 Hz

Tit du mode-cleaner d'entrée

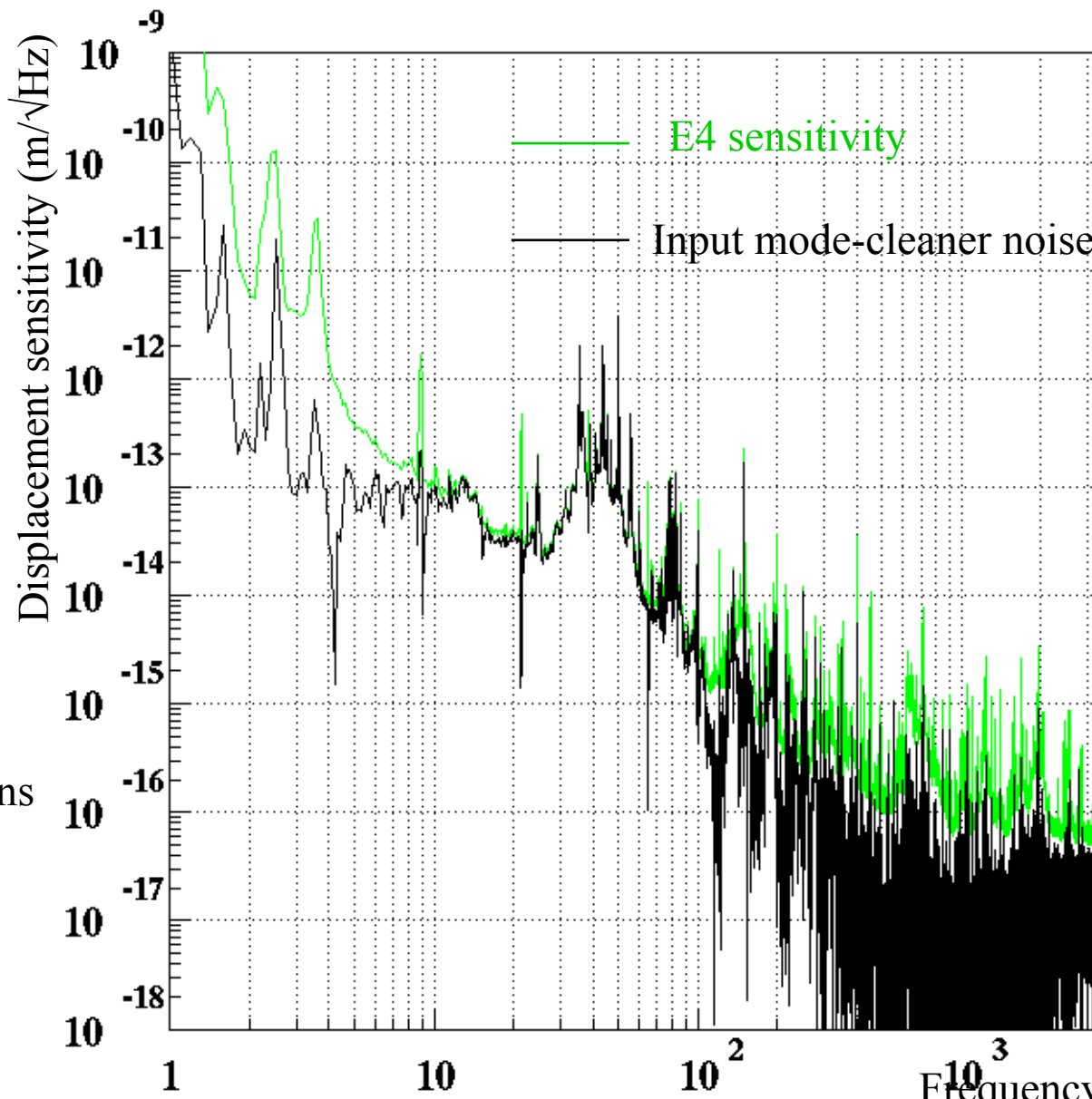
200 Hz

Plusieurs pics dus aux résonances

supports des miroirs

bonne compréhension de la  
stabilité

Plusieurs changements/améliorations  
opérés par l'expérience du CITF





# *Prochaines étapes*

Installation du tube à vide: début 2003

Installation des suspensions d'extrémités  
Nord disponible, Ouest prête en Décembre

Modification injection

Nouveau laser en Novembre  
Nouvelle suspension mode-cleaner en Janvier

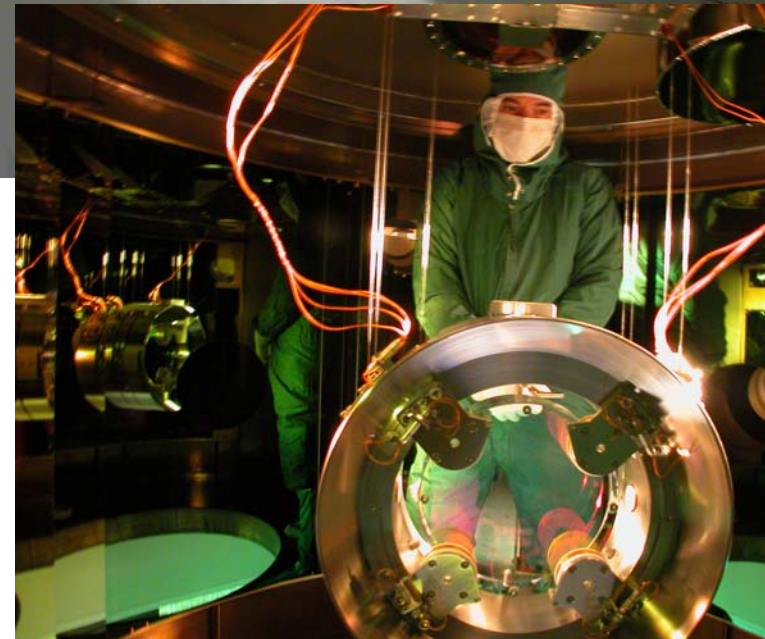
Installation des miroirs finaux

Beam splitter installé, dernier miroir en Mars 2003

Printemps 2003: début du commissioning de Virgo  
Premières données techniques en 2003

2004: premier 'Science run'

ISN Grenoble, 31 Octobre 2002





# *Analyse des données (I)*

- Signaux permanents

  - Signaux périodiques des pulsars

    - Effet Doppler dû à la rotation de la terre autour du soleil

    - ⇒ détection possible par un seul interféromètre

    - Sensibilité limitée par la puissance de calcul

    - ⇒ recherche d'algorithmes plus efficaces

- Signaux transitoires

  - 1) Signaux de binaires coalescentes

    - forme d'onde assez bien connue

    - ⇒ technique de filtrage optimal

  - 2) Signaux impulsifs (effondrement d'étoiles)

    - seulement la durée est connue ( $\sim 1$  ms)

    - ⇒ problème du bruit non gaussien

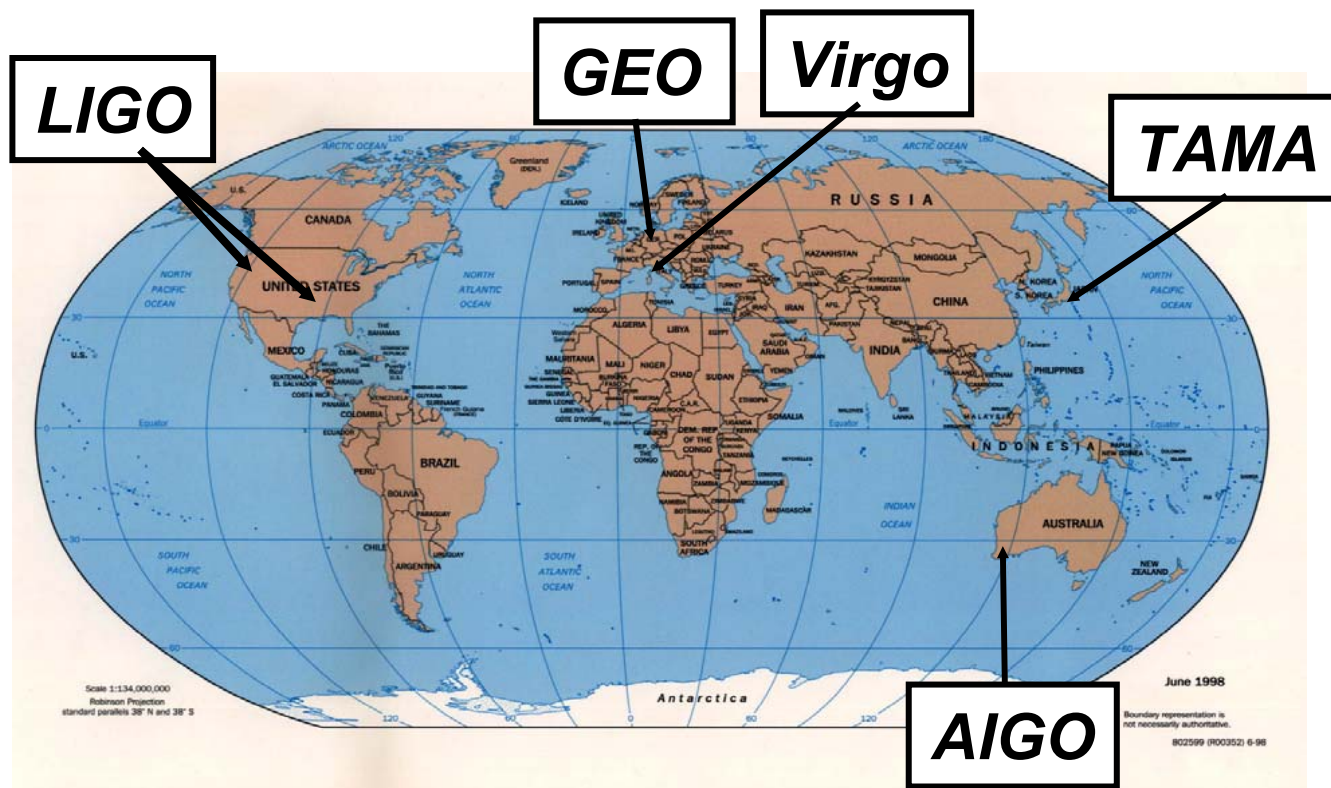


# *Analyse des données (II)*

- Recherche d'événements rares
  - ⇒ L'identification et l'élimination du bruit non gaussien sont cruciaux
- Deux stratégies à suivre:
  - 1) ' Monitoring ' détaillé du détecteur et de l'environnement
    - grande quantité de données ( $\sim 4$  Mbytes/s)
    - stratégie: sélection des données en ligne
  - 2) Coïncidence avec les autres détecteurs
    - nécessité de collaboration
    - même format des données adopté par tous les projets (développé au LAPP)



# *Vers un réseau mondial des détecteurs*



- Recherche d'événements en coïncidence





# *Aux Etat Unis: LIGO*

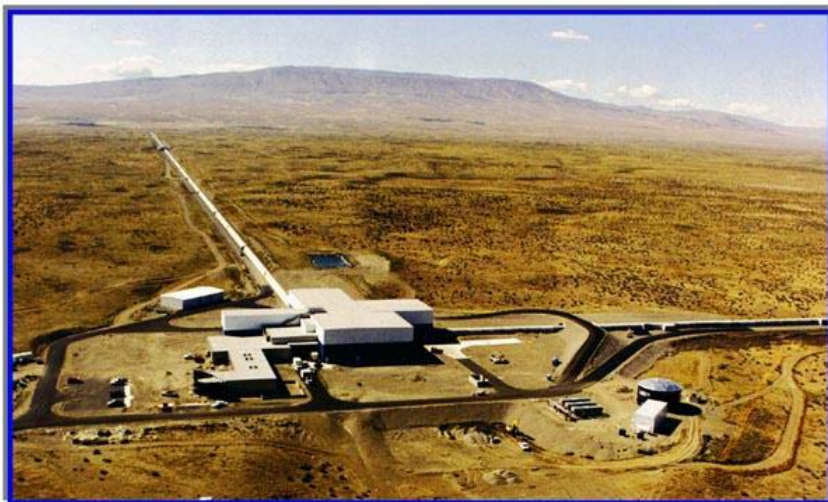
Deux sites:

- Hanford (Washington): 1 interféromètre de 4 km + 1 interféromètre de 2 km
- Livingston (Louisiana): 1 interféromètre de 4 km

Même schéma optique que Virgo

Suspensions moins évoluées

'Commissioning' commencé en 1999, 3 interféromètres opérationnels aujourd'hui



Hanford (Washington)

Livingston (Louisiana)





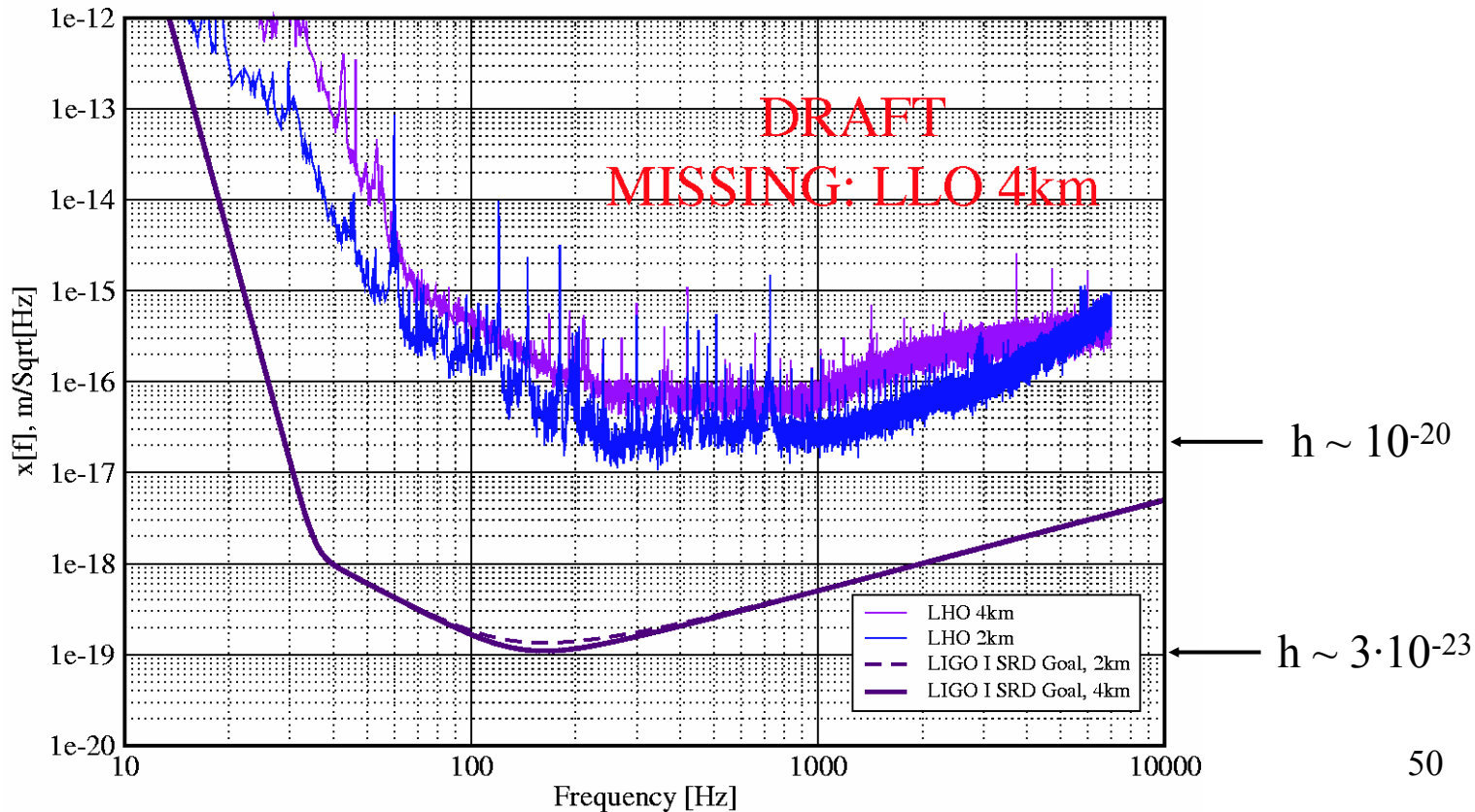
# Aux États Unis: LIGO

Premier “run scientifique” en août dernier

Suspensions très simples: problèmes de contrôle dus au bruit sismique

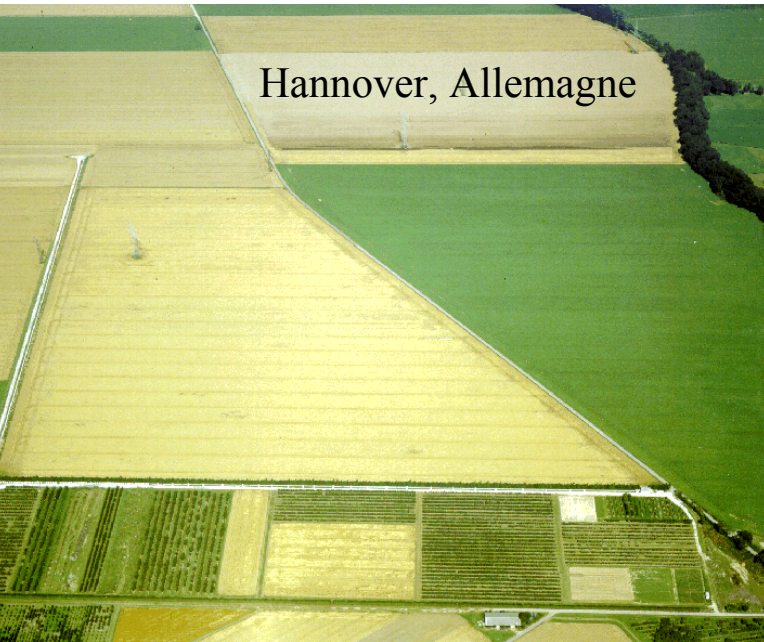
Displacement Sensitivities for the LIGO Interferometers for S1

23 August 2002 - 09 September 2002 LIGO-G020462-DRAFT-E





# En Europe: GEO



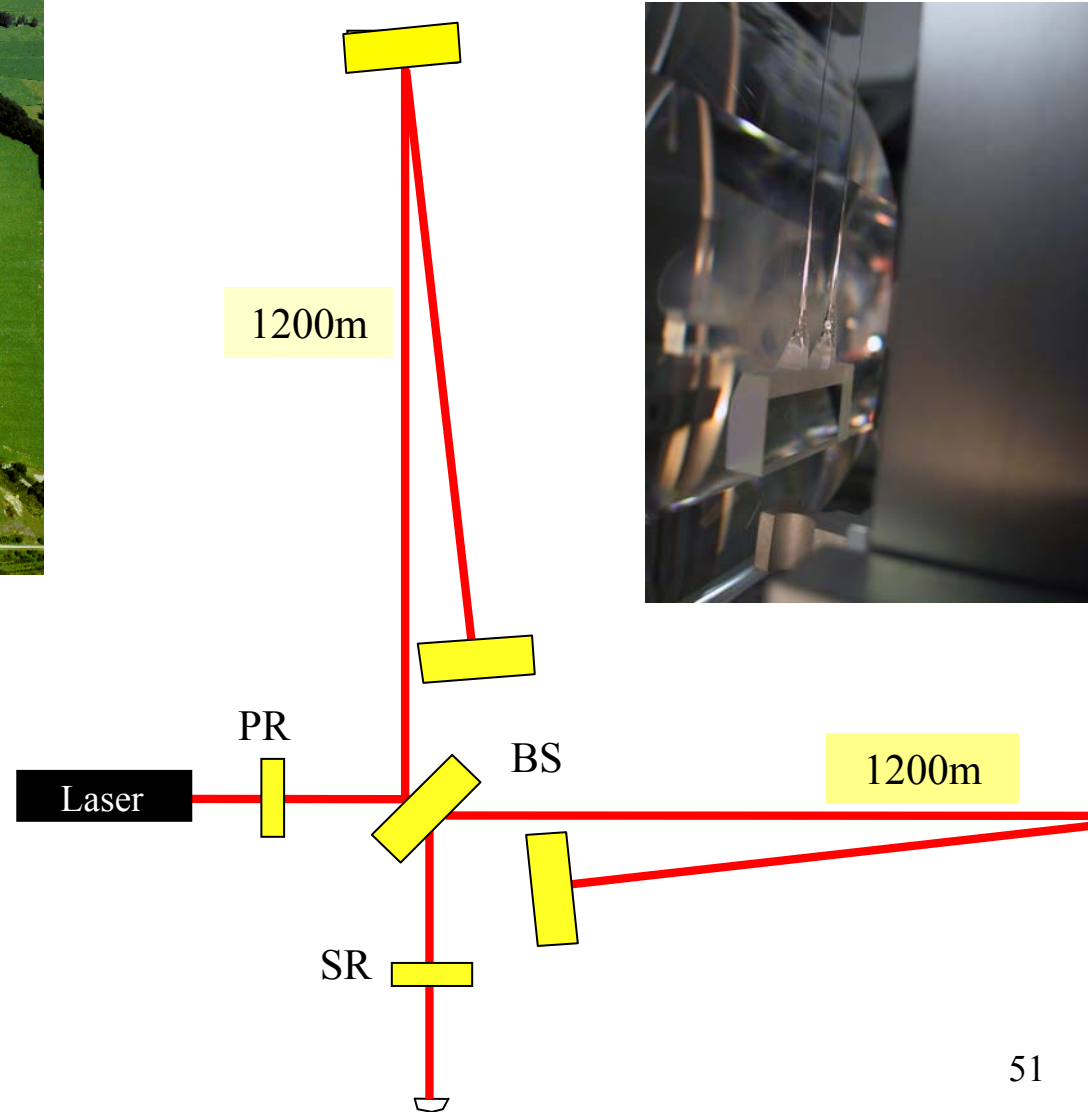
Collaboration anglo-allemande  
interféromètre avec bras de 600 m

Techniques innovantes:

- recyclage du signal
- suspensions monolithiques

Commissioning' en cours

ISN Grenoble, 31 Octobre 2002



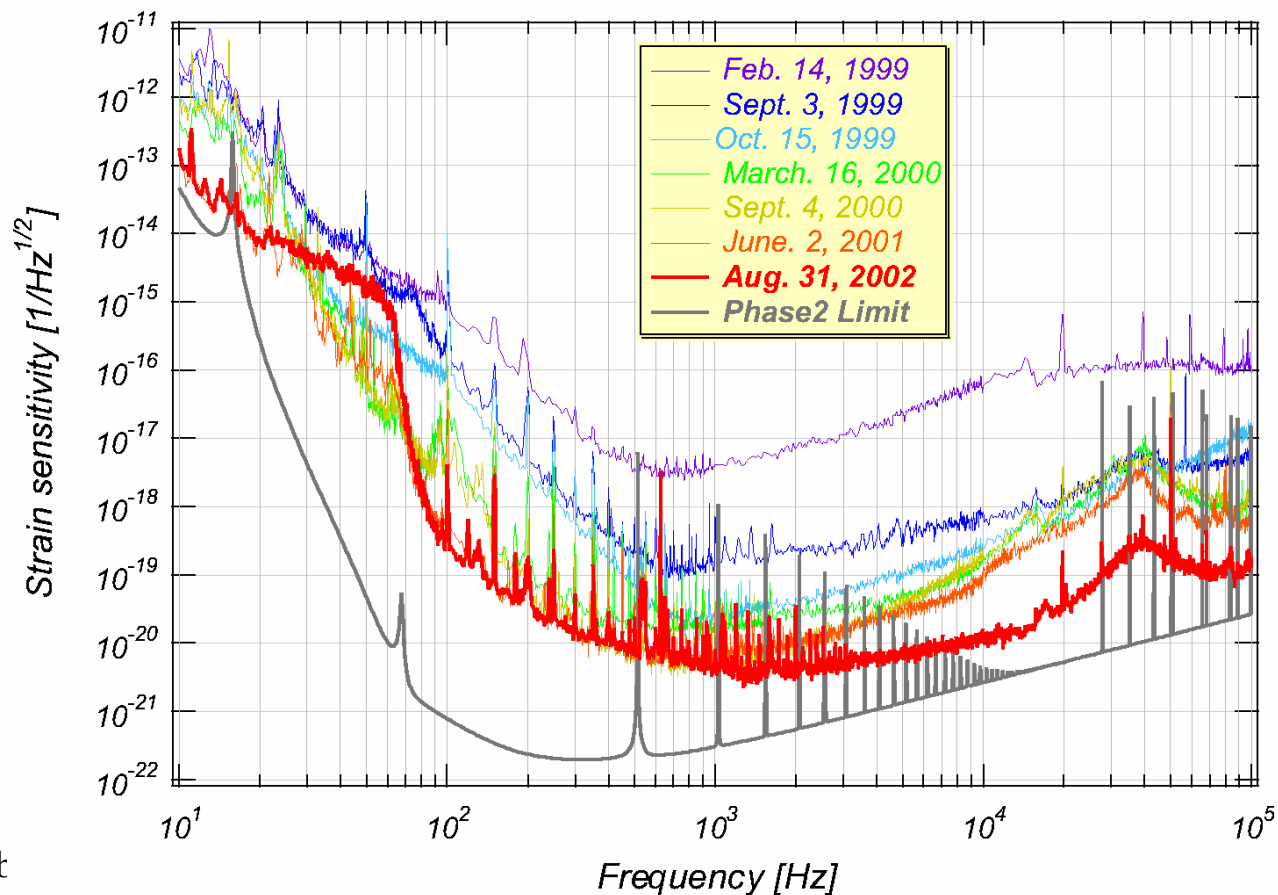


# *Au Japon: TAMA, ...*

Prototype construit à Tokyo

Interféromètre avec bras de 300 m (Fabry-Perot + Recyclage)

Début du 'commissioning' en 1997: meilleure sensibilité au monde  $3 \cdot 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$





# *Le futur: comment améliorer la sensibilité ?*

bruit thermique la principale limite

resonance monolithique en quartz

optiques en saphir

hydrogène

bruit de photon

lasers plus puissants

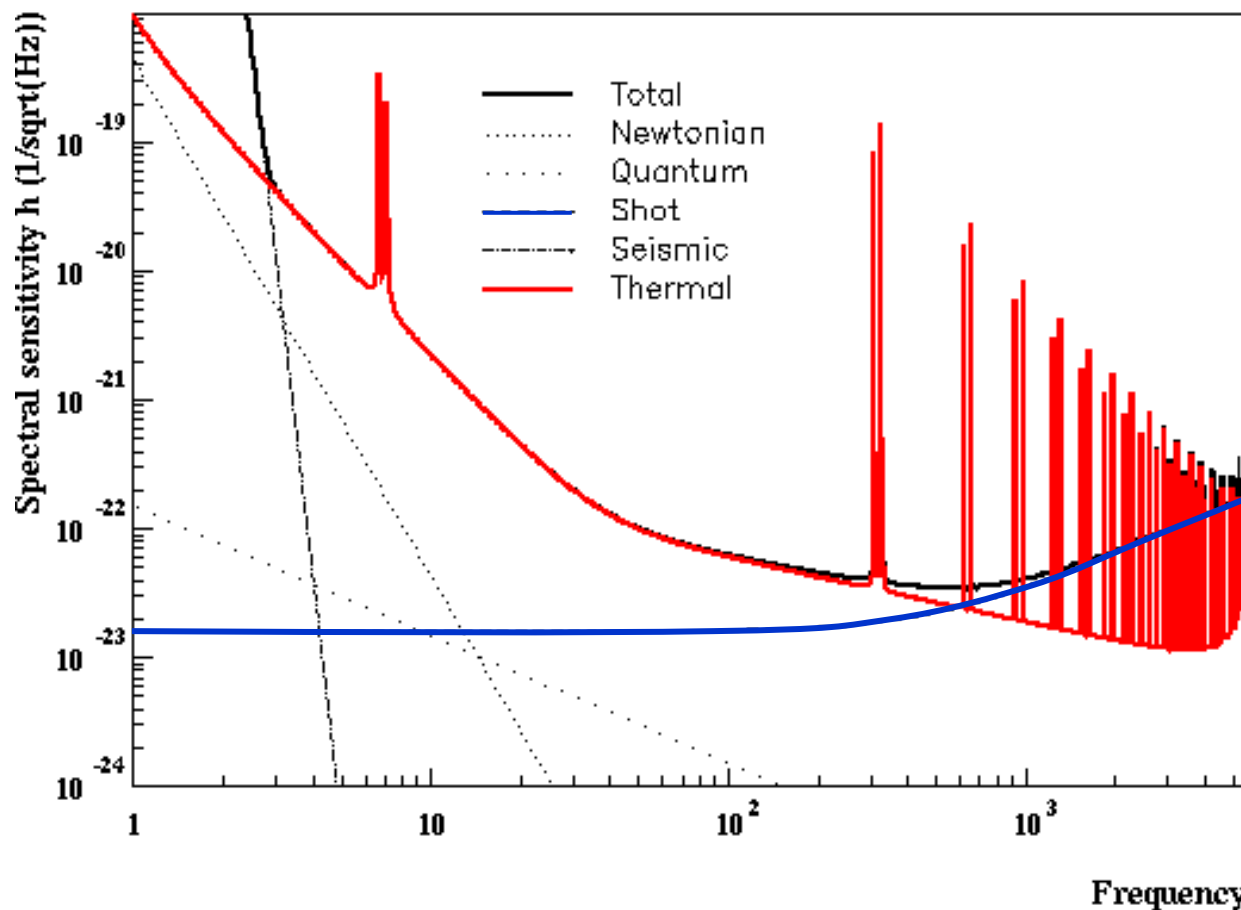
meilleures optiques

bruits techniques

meilleurs senseurs

meilleure électronique

meilleurs systèmes de contrôle





# *Le futur: actions en cours*

Aux États Unis: Ligo Science Collaboration (LSC)

10 scientifiques (participation  
équipes allemandes et anglaises)

Préparation de LIGO II

Programme de R&D financé par la NSF

Au Japon: Projet LCGT

Projet d'interféromètre cryogénique souterrain (à coté de Kamiokande)

En Europe: premiers pas

appel d'offre R&D de la part du consortium EGO

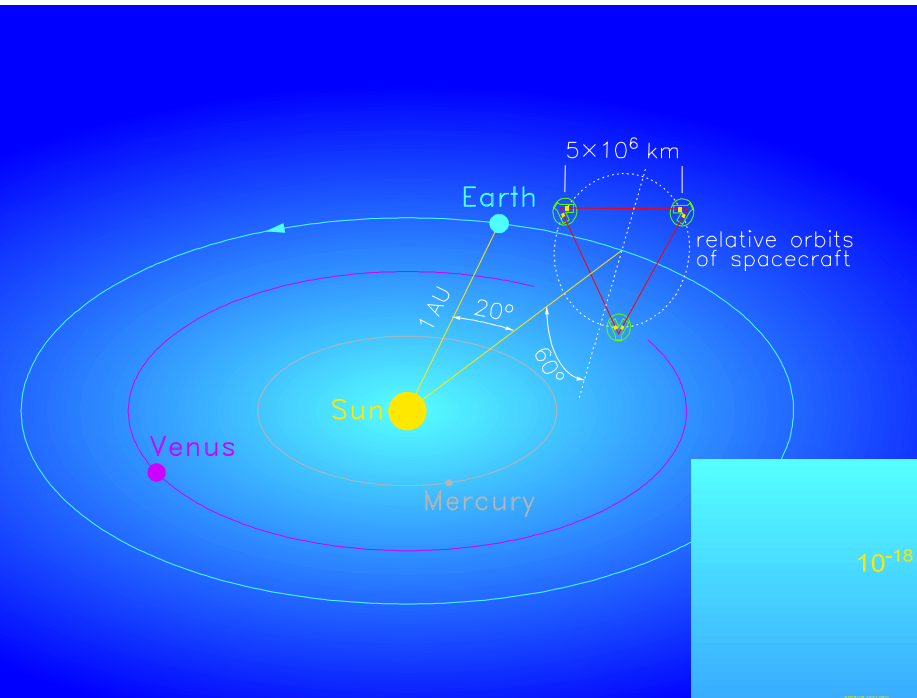
Approchement VIRGO-GEO pour un réseau+JRP dans le cadre de ApPEC

Proposition VIRGO-GEO pour un nouveau interféromètre: Euro

	GRAV	LIGO	LSC	OT
FY2000	33.62	21.10	6.91	5
FY2001	36.25	22.9	7.54	5
$\Delta(\%)$		+8.6	+9.1	+

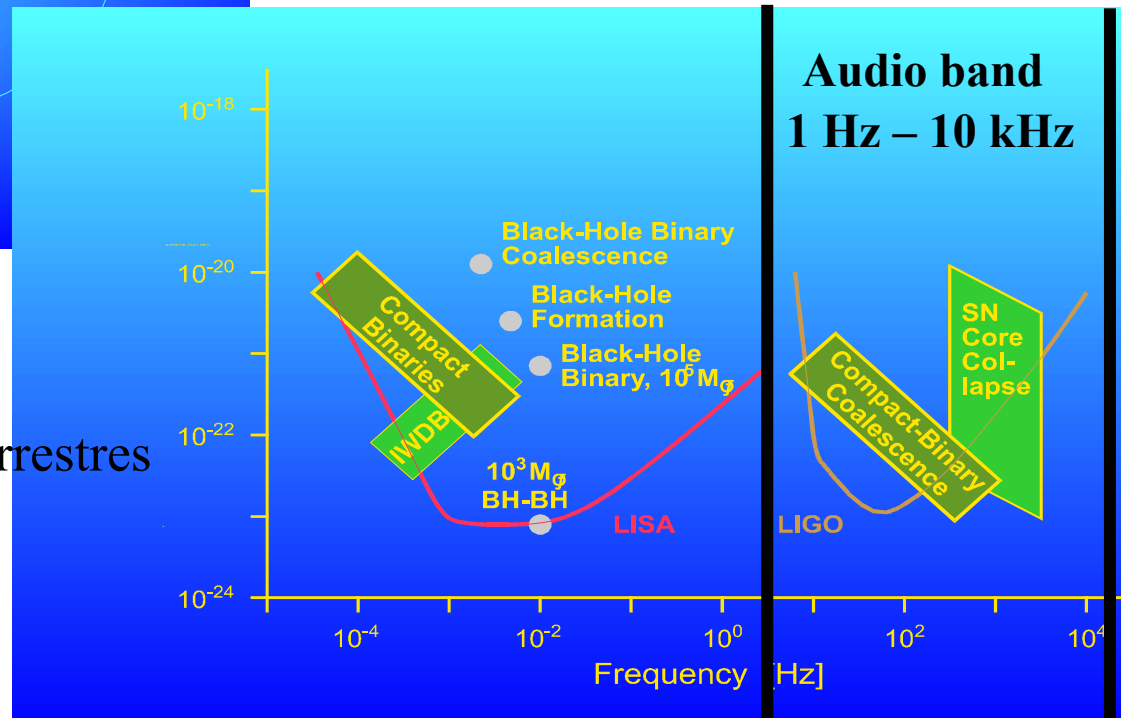


# Le futur: LISA



- Interféromètre spatial (ESA-NASA)
- Orbite héliocentrique
- Triangle avec  $L=5 \cdot 10^6$  km
- Lancement en 2011

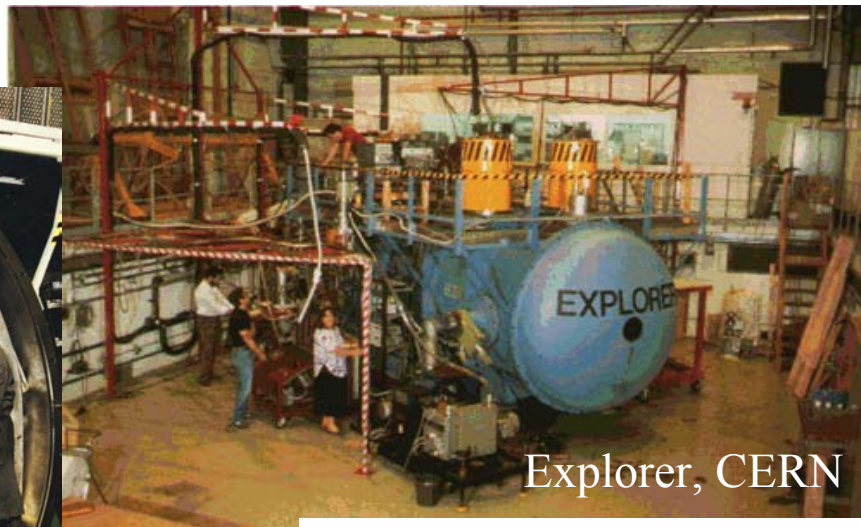
insible à plus basse fréquence  
complémentaire aux détecteurs terrestres  
SA n'est pas la suite de Virgo





# *Nouvelles des barres: phénomène exotique ou OG ?*

Nautilus, Frascati (Italy)

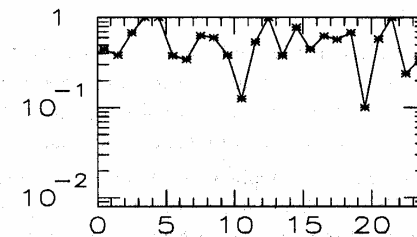
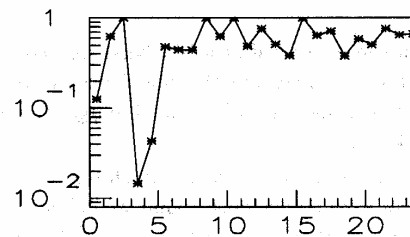
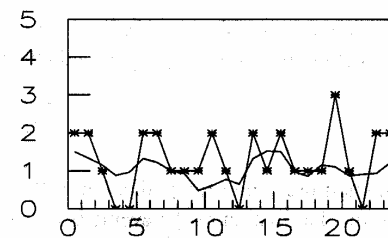
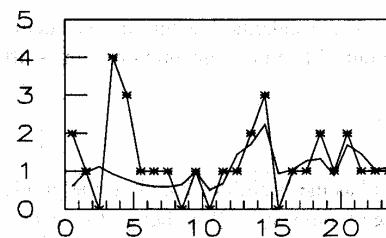


Explorer, CERN

- Analyse des coïncidences entre les deux barres (données 2001)

[P.Astone et al gr-qc/0210053]

ISN Grenoble, 31 Octobre 2002



heure sidérale

heure solaire





# *Conclusions*

- Virgo

- premiers tests achevés avec succès
- assemblage complet au printemps prochain
- l'expérience acquise avec le CITF va aider le démarrage de Virgo
- premières données techniques en 2003, scientifiques en 2004

- Un réseau de détecteurs de nouvelle génération en train de démarrer

- amélioration sensibilité de 2-3 ordres de grandeur
- fonctionnement permanent

Plusieurs sources galactiques et extra-galactiques deviendront accessibles

- Un programme de R&D est en train de se mettre en place en Europe

Moment propice pour de nouveaux acteurs