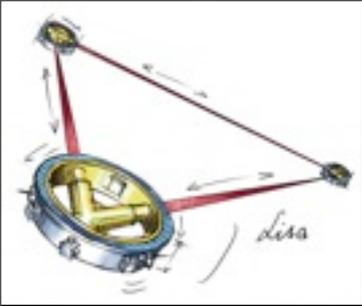


# Le projet LISA

un observatoire spatial pour  
l'étude des ondes gravitationnelles

Hubert Halloin  
APC / Université Paris Diderot





# Newton, Einstein et les autres

— [ Isaac Newton (1687) : la gravité est une force centrale, instantanée, variant comme l'inverse du carré de la distance

- conservation de l'énergie du système
- l'orbite d'un corps autour d'un autre est une ellipse, indéfiniment répétée ...
- le temps et l'espace sont indépendants

— [ Pierre Simon de Laplace (1805) : Et si la gravité se propageait à vitesse finie ?

- la force n'est plus centrale, il y a une composante de 'friction'
- l'énergie n'est pas conservée, une partie est dissipée (certes, mais comment ?)
- bonne intuition ... mais pas la bonne théorie

— [ Albert Einstein (1905/1916) : la force de gravité n'existe pas ...

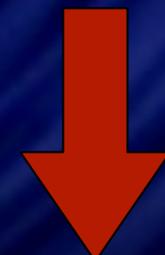
- Une masse déforme la géométrie de l'espace-temps
- Les corps se déplacent en ligne droite ... dans un espace courbe
- L'information gravitationnelle se propage à la vitesse de la lumière
- La dissipation d'énergie se fait par déformation de l'espace-temps : production d'une onde gravitationnelle



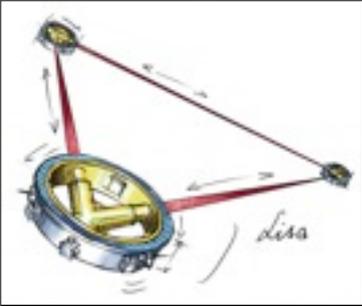
$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$



$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 4\pi G \rho$$

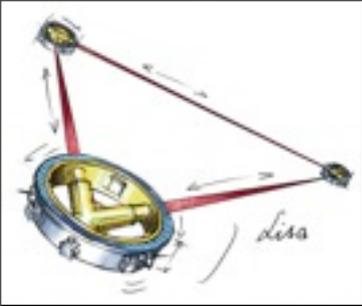


$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



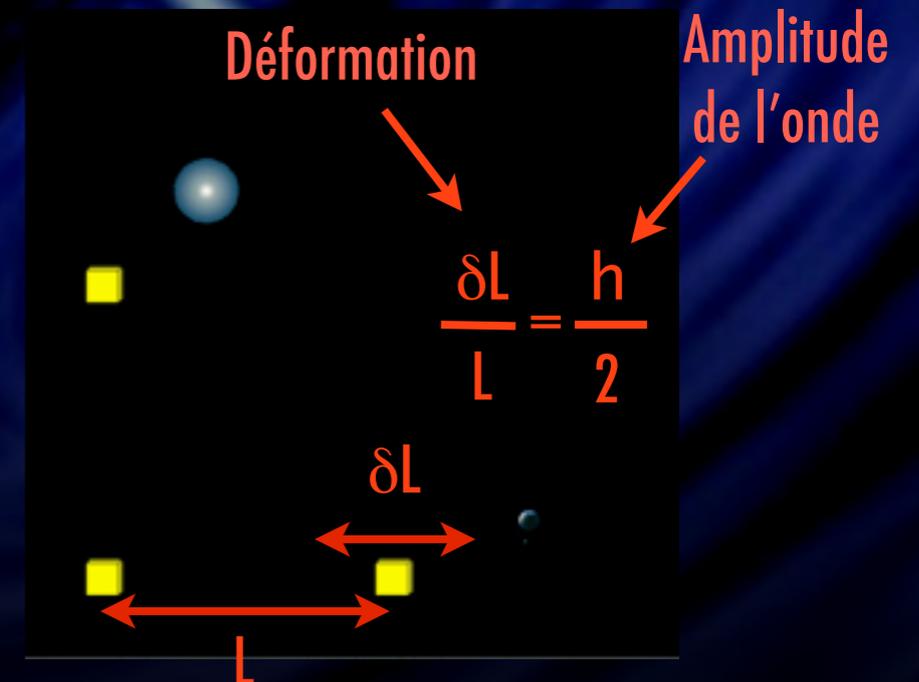
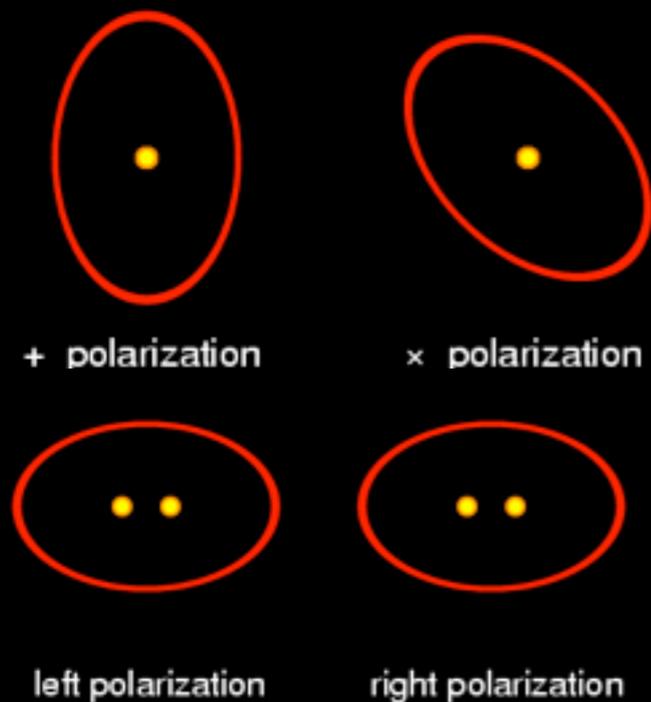
# Pourquoi les mesurer ?

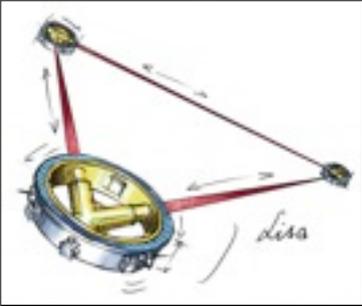
- [ Tester les fondements de théorie de la relativité générale
  - Quelles sont les lois de la gravitation en champ fort ?
  - Les trous noirs existent-ils (tels que prédits par la RG) ?
  - Si oui, un trou noir a-t-il des cheveux ?
- [ Notre compréhension des stades ultimes des étoiles massives est-elle correcte ?
  - Avec quelle fréquence se forment les astres compacts (trous noirs, étoiles à neutrons, naines blanches, etc.) ?
- [ Contraindre les modèles cosmologiques et de la physique fondamentale
- [ Ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation sur l'Univers (avec toutes ses inconnues...)



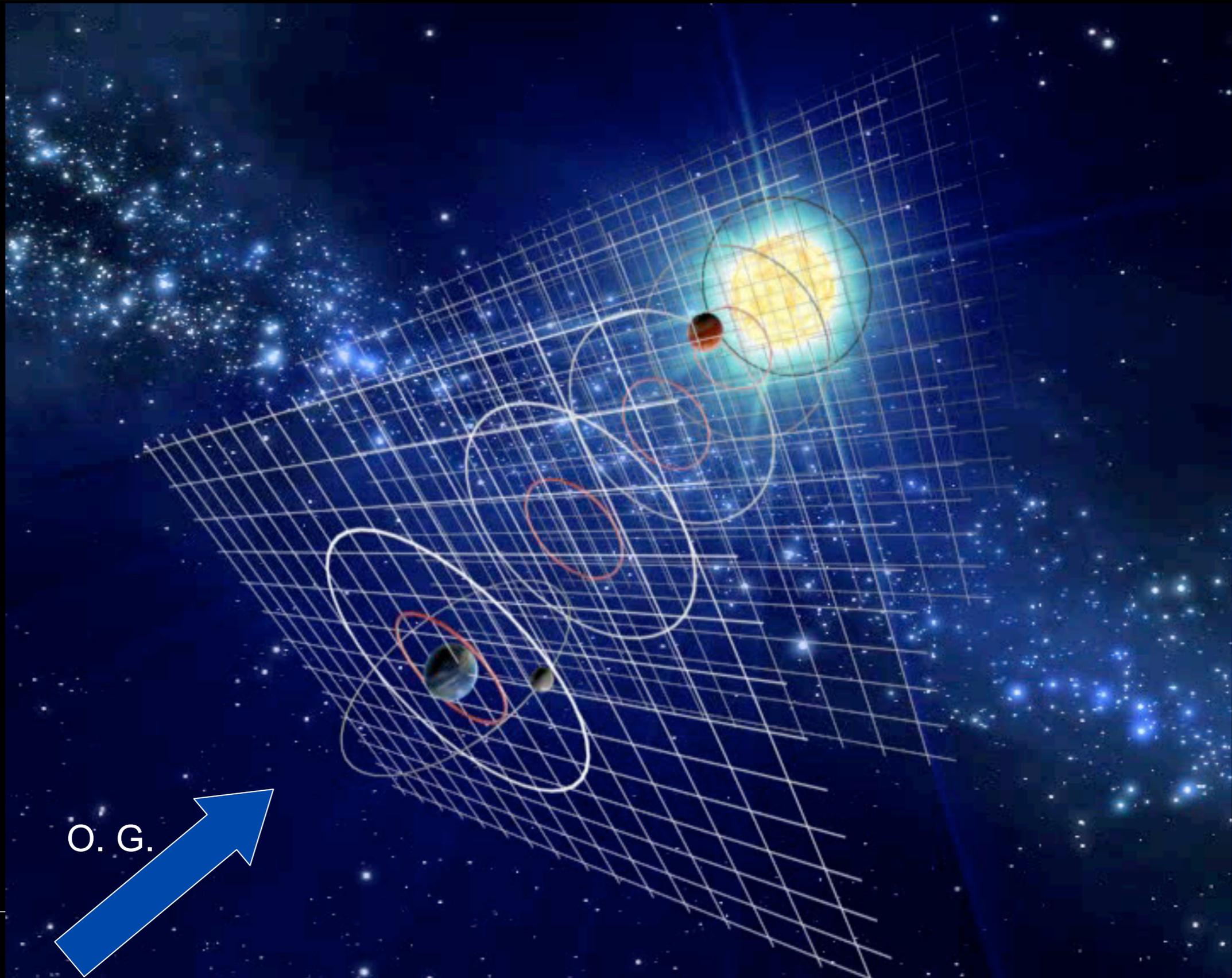
# Origine et effet d'une onde gravitationnelle

- Une onde gravitationnelle est créée lors d'une accélération non sphérique d'un ou plusieurs objets massifs
  - pas d'émission : corps isolé, sphérique, éventuellement en rotation, mouvements purement radiaux
  - émissions : effondrement asymétrique, corps orbitant ou en coalescence, etc...
  - analogie : rides à la surface de l'eau (juste une analogie ...)
- Observable : modification de la distance propre entre 2 objets
  - déformation élastique c.à.d proportionnelle à la distance entre les objets
  - déformation transverse c.à.d dans le plan perpendiculaire à la propagation (différent des rides sur l'eau !)

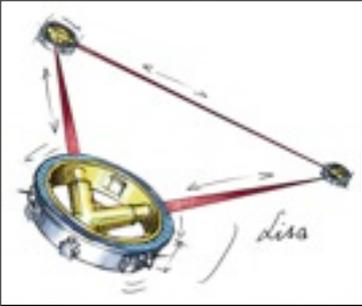




# Propagation d'une onde gravitationnelle



Hubert



# Estimations en ordre de grandeur

— [ Considérons une source de masse  $M$ , soumise à une vitesse  $v$  (composante non sphérique), observée à une distance  $r$  :

✓ Les objets astrophysiques sont les seules sources observables d'ondes gravitationnelles (pas de source artificielle !)

— [ Quelles sources astrophysiques ?

✓ Il faut des objets très massifs et très denses (relativistes)

✓ Les ondes gravitationnelles permettent «d'entendre» des objets très lointains

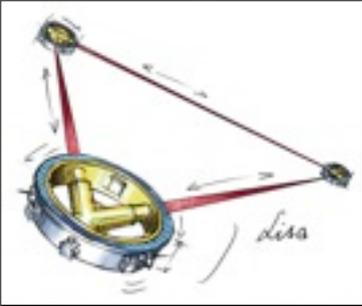
pour un objet relativiste :

✓ Les ondes gravitationnelles couvrent un domaine de fréquences très large ( $M \sim 1 - 2 \cdot 10^6 M_{\text{Soleil}}$ ,  $\kappa \sim 0 - 1$ )

Les effets sont toujours faibles !!

$\rho$  : densité moyenne de la source  $f \approx \sqrt{\frac{G\rho}{\pi}} \approx 2 \text{ Hz} \frac{M_{\text{Soleil}}}{M} \left(\frac{\kappa}{0,001}\right)^{3/2}$





L'amplitude d'une source ne suffit pas pour prédire sa 'déteçtabilité'

✓ La compacité (i.e. son degré de 'relativité') influe fortement sur le temps d'observation mais peu sur la déteçtabilité de la source

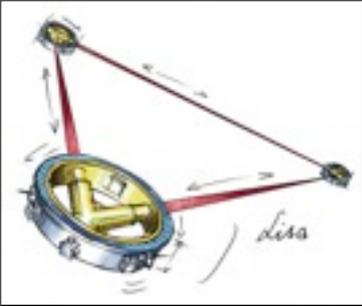
Estimations ...

✓ Plus la masse du système est importante, plus sa déteçtabilité est forte

✓ La déteçtabilité du signal décroît seulement en raison inverse de la distance (et non en raison de l'inverse du carré de la distance comme avec la lumière)

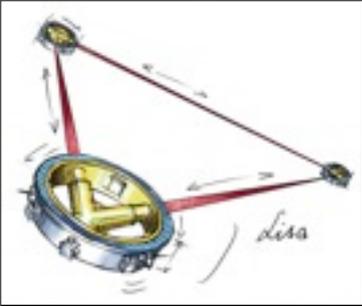
Les sources les plus 'faciles' à détecter sont à basses fréquences, mais le bruit des détecteurs y est plus important ...

$$S/B \propto \frac{M}{r \cdot \kappa^{1/4}}$$

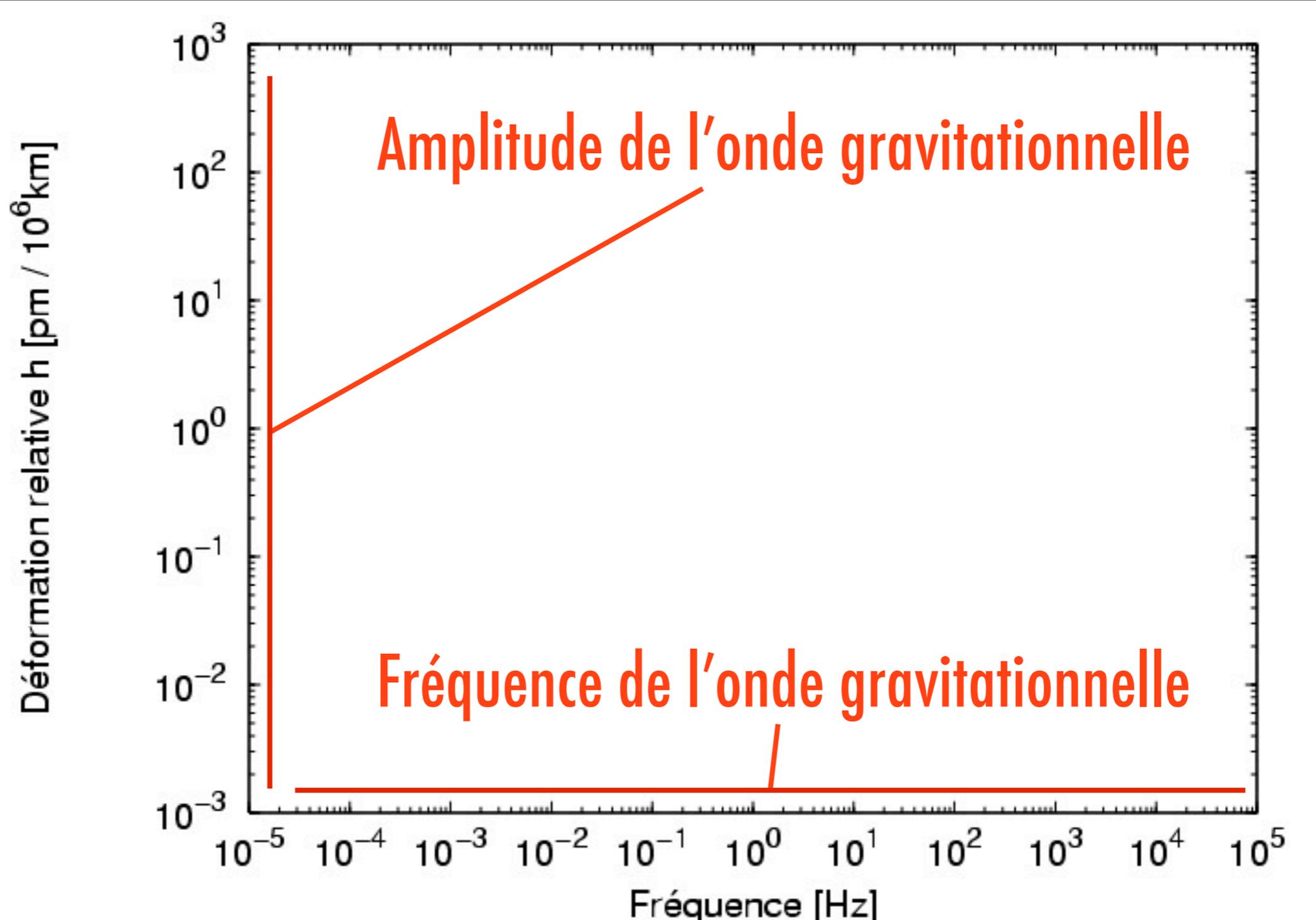


# Ordres de grandeur

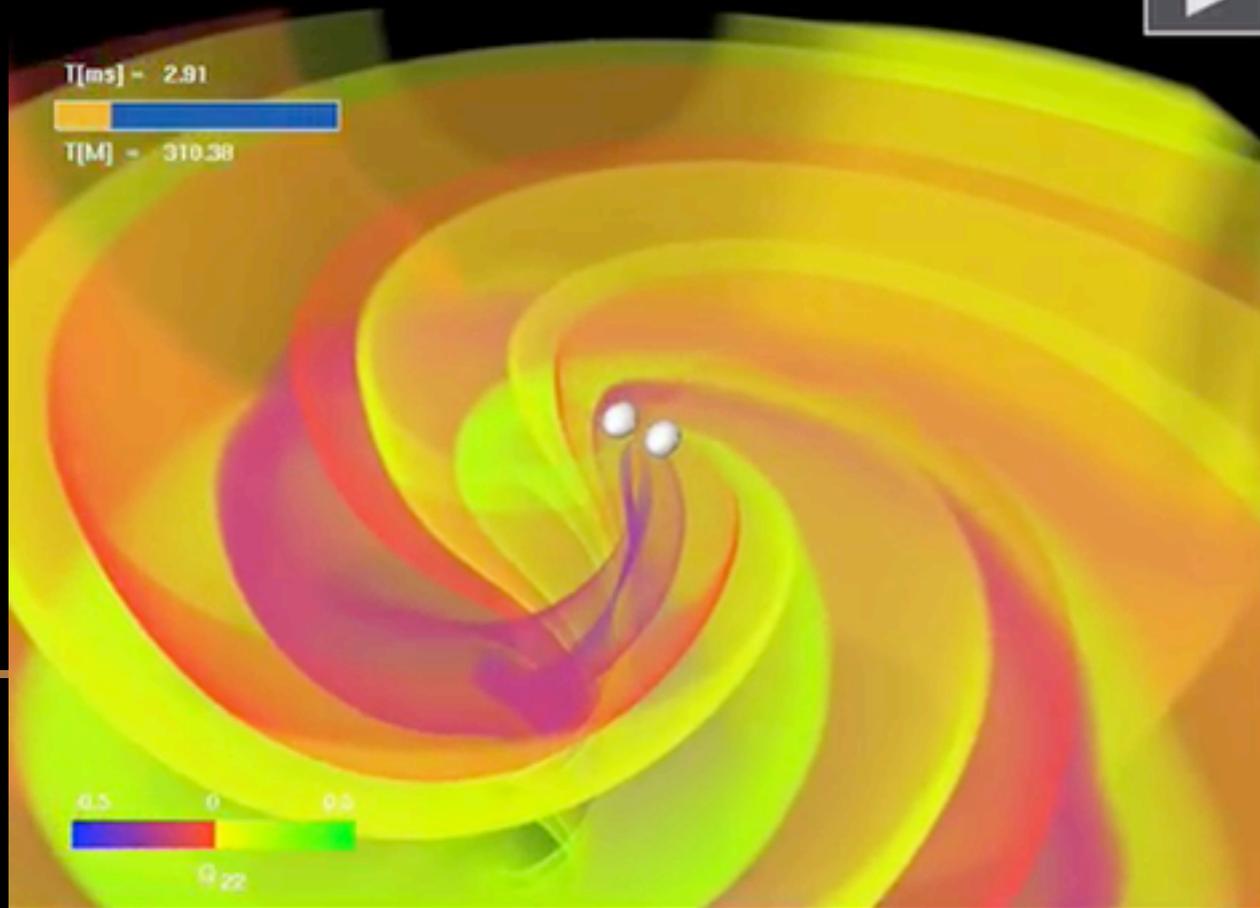
Paramètres	Binaire d'étoiles à neutrons	Binaire de trous noirs stellaires	Binaire de trous noirs super-massifs	Binaire de naines blanches (quasi-monochromatique)	Binaire de naines blanches (à la coalescence)
compacité $\kappa$ [1]	0,15	0,5	0,5	$10^{-5}$	0,01
Masse M [ $M_{\text{Soleil}}$ ]	2,8	20	$2 \cdot 10^6$	0,5	0,5
Distance [Ma]	66	3	22 000	0,03	0,03
amplitude h [pm/Mkm]	2	1 000	14 000	0,05	50
fréquence [Hz]	1 200	1 000	0,01	0,004	100
Temps d'évolution	10 ms	0,5 ms	50 s	$2 \cdot 10^6$ années	1 ms
Détectabilité [u.a]	0,01	0,7	10	XXXX	5



# Résumé des principales sources

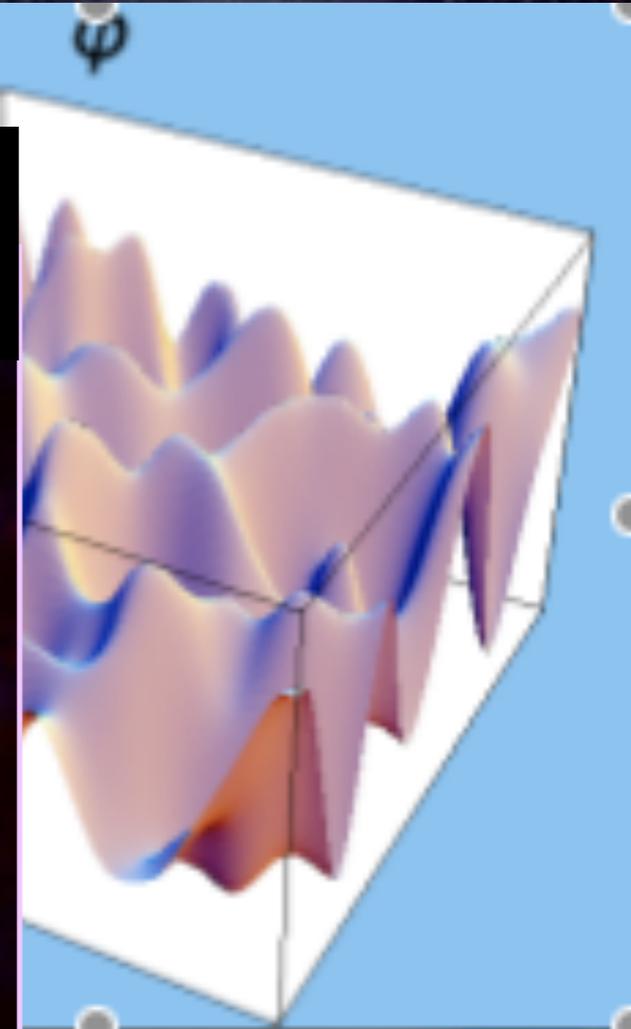


# Systeme binaire de trous noirs



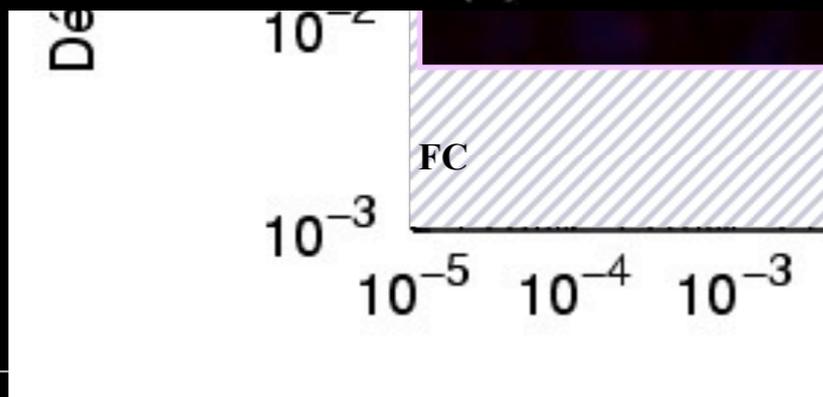
# Fluctuations de l'Univers primordial

## gravitationnel

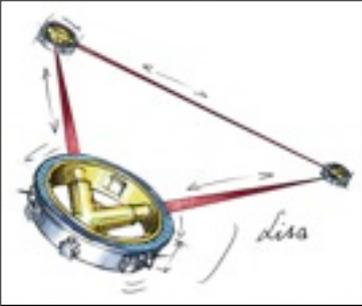


# Coalescence d'étoiles binaires compactes

Coalescence binaires compactes



Systemes binaires compact (ex : TN + étoile à neutrons)



# Coalescence de trous noirs super-massifs

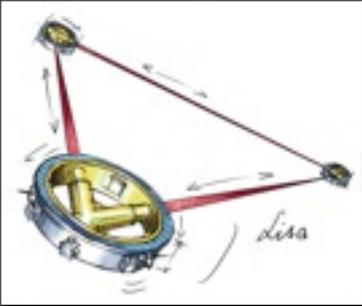
On pense qu'il existe un trou noir supermassif au centre de chaque galaxie

- Exemple : au centre de la Voie Lactée (notre galaxie...), un TN de 5 millions de masses solaires, à 27 mille a.l.
- 100 milliards de galaxies dans l'univers...

Lors de la collisions de 2 galaxies (assez fréquent...), les TN s'attirent et coalescent

- Il y a production d'ondes gravitationnelles intenses

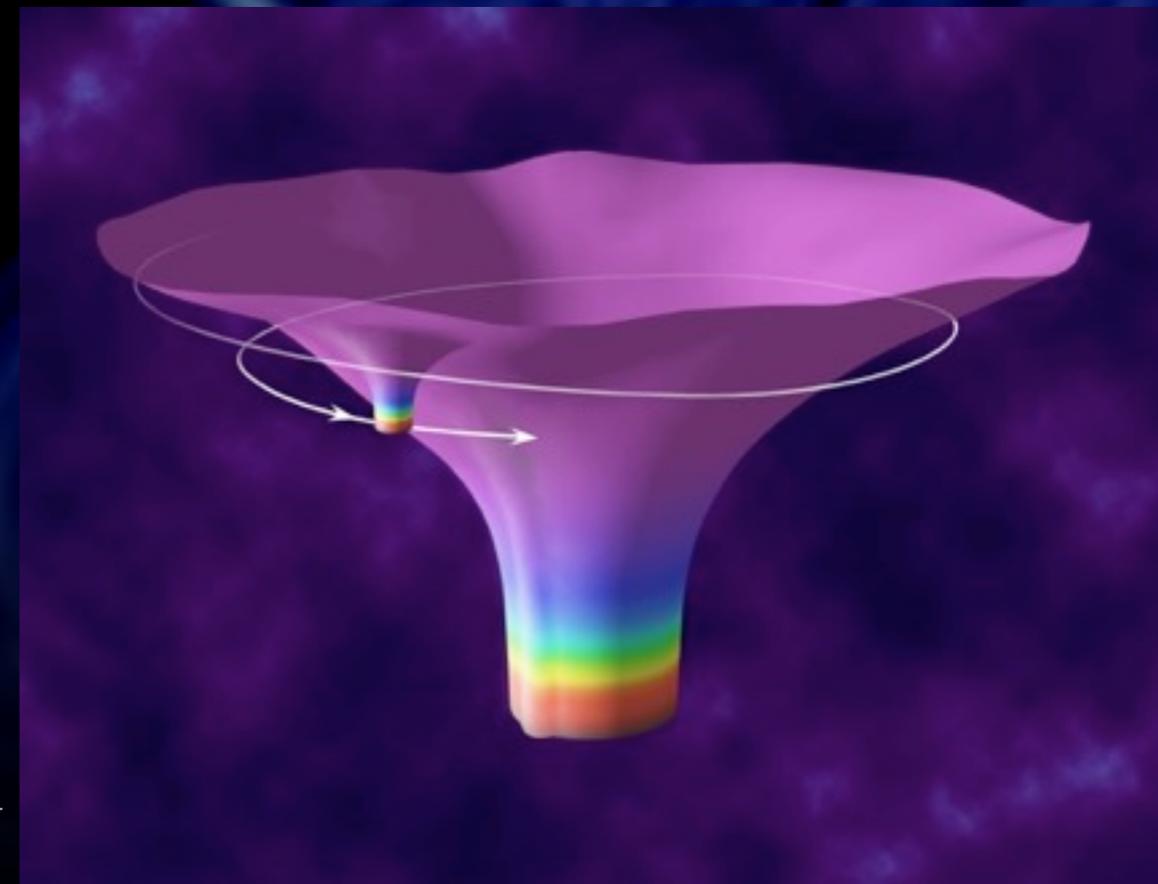


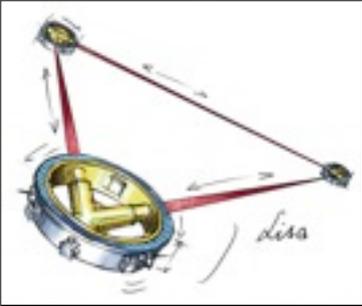


# Binaires de masses extrêmes

— Capture d'un 'petit' astre compact par un trou noir massif ( $\sim 100$  à  $1\,000\,000 M_{\text{soleil}}$ )

- rapport de masse  $>200$
- l'onde gravitationnelle renseigne sur la géométrie de l'espace à proximité du trou noir
- test précis de la RG en champ fort
- fréquence de l'onde : 1 mHz à 100 Hz.
- plusieurs sources observables en même temps avec LISA ?





# Binaires de masses extrêmes

## Effets relativistes très importants

- trajectoire du compagnon et signal gravitationnel complexe (!)
- simulation (analytique ou numérique) difficile (seulement des approximations)

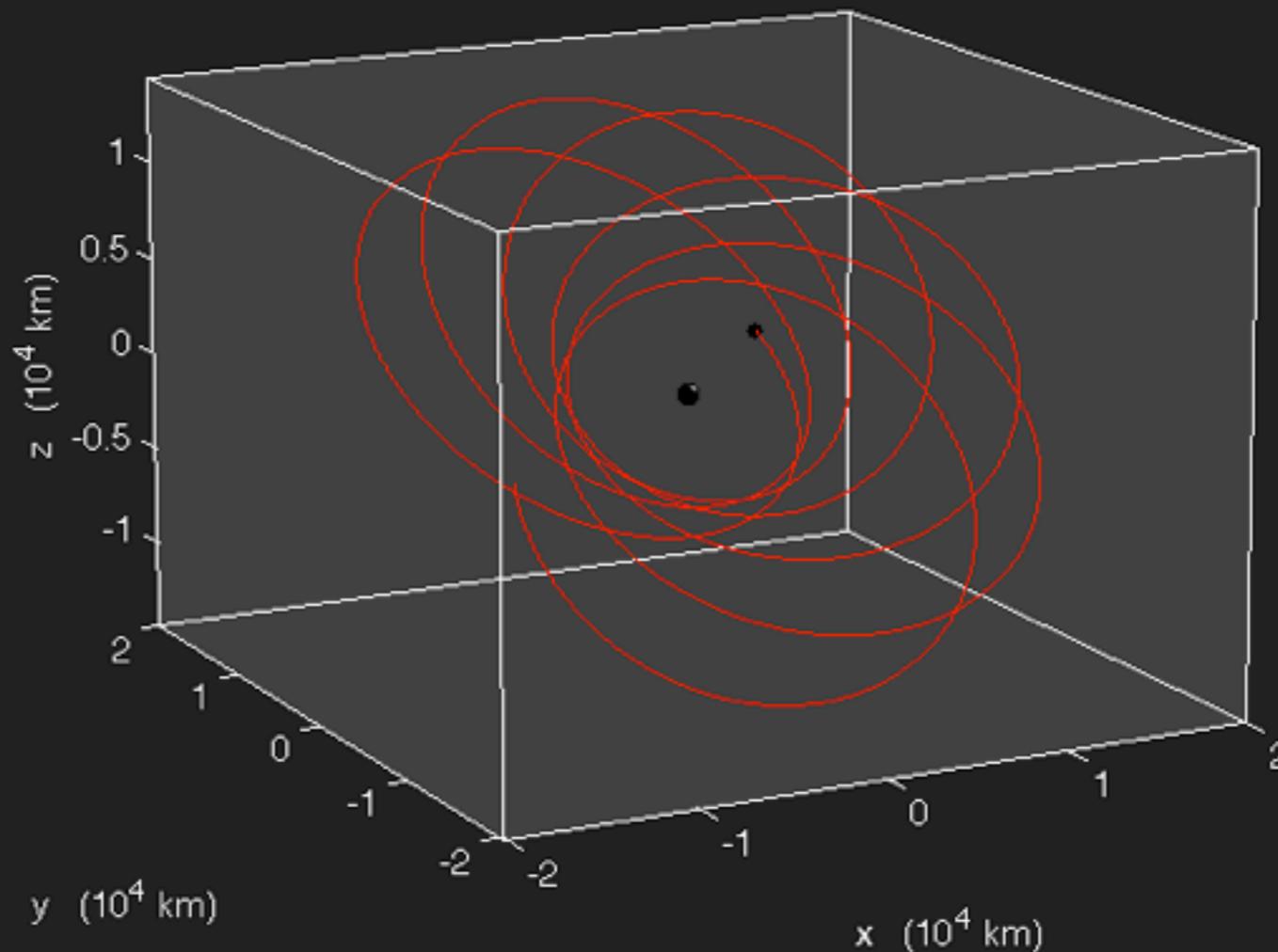
**250  $M_{\text{soleil}}$  + 1,4  $M_{\text{soleil}}$**

30 minutes before merger, current average speed 0.16 c

Large black hole:  
shown to scale  
250 solar masses  
80% maximal spin

Small black hole:  
shown enlarged  
1.4 solar masses  
no spin

Trace duration:  
10 seconds

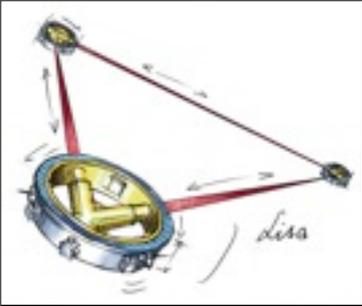


Steve Drasco  
Max Planck Institute  
for Gravitational Physics  
(Albert Einstein Institute)  
sdrasco@aei.mpg.de

"plus" waveform viewed  
from 45 degrees latitude

Hubert





# Binaires de masses extrêmes

## Effets relativistes très importants

- trajectoire du compagnon et signal gravitationnel complexe (!)
- simulation (analytique ou numérique) difficile (seulement des approximations)

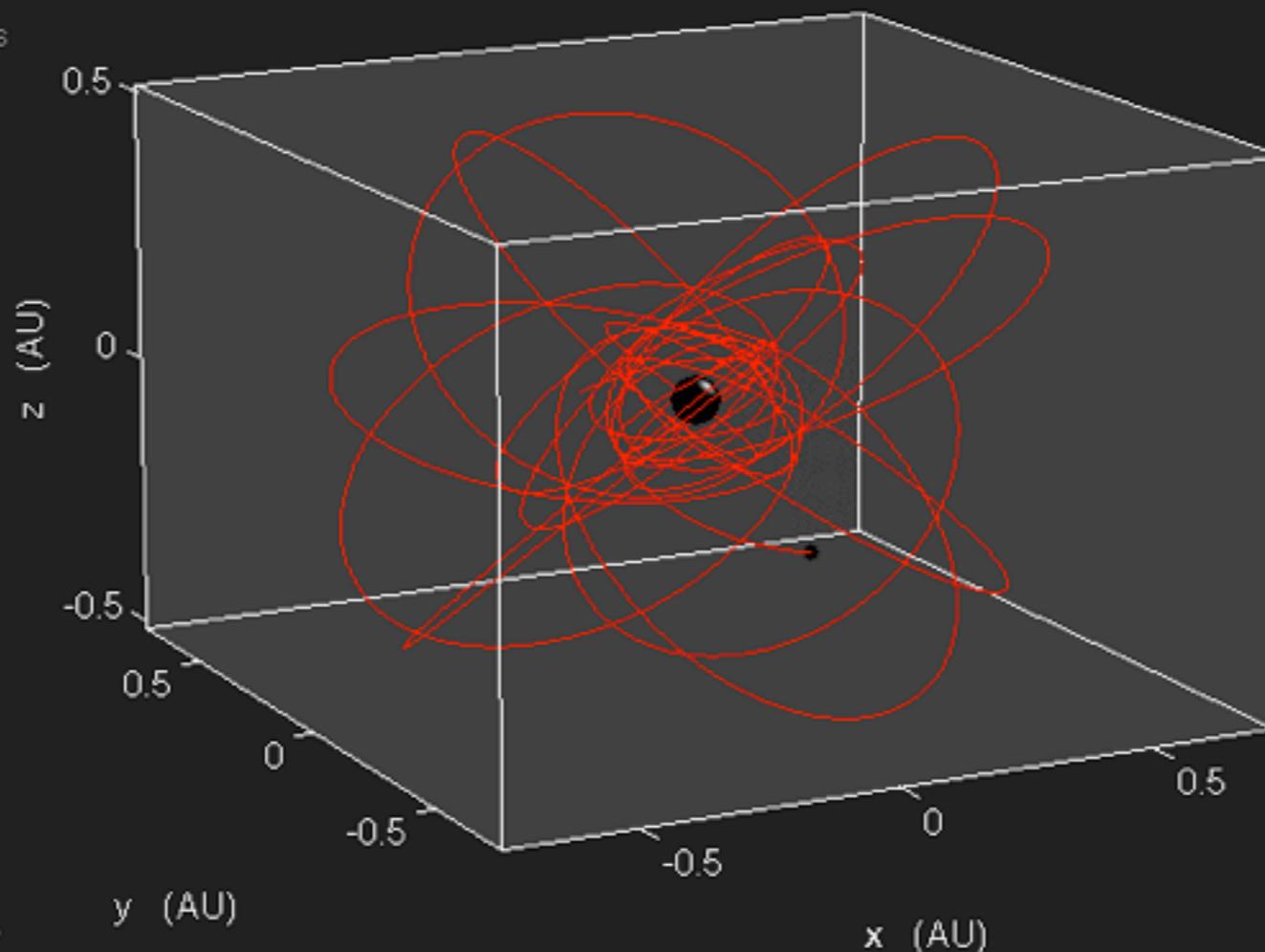
**3 000 000  $M_{\text{soleil}}$  + 270  $M_{\text{soleil}}$**

158 days before merger, current average speed 0.25 c

Large black hole:  
shown to scale  
3,000,000 solar masses  
90% maximal spin

Small black hole:  
shown enlarged  
270 solar masses  
negligible spin

Trace duration:  
1 day



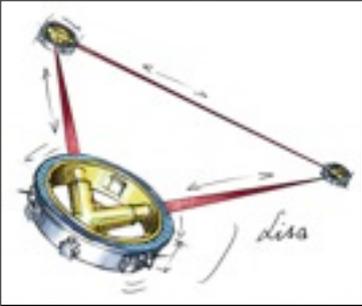
Steve Drasco  
Max Planck Institute  
for Gravitational Physics  
(Albert Einstein Institute)  
sdrasco@aei.mpg.de

"plus" waveform viewed  
from 45 degrees latitude



Hubert

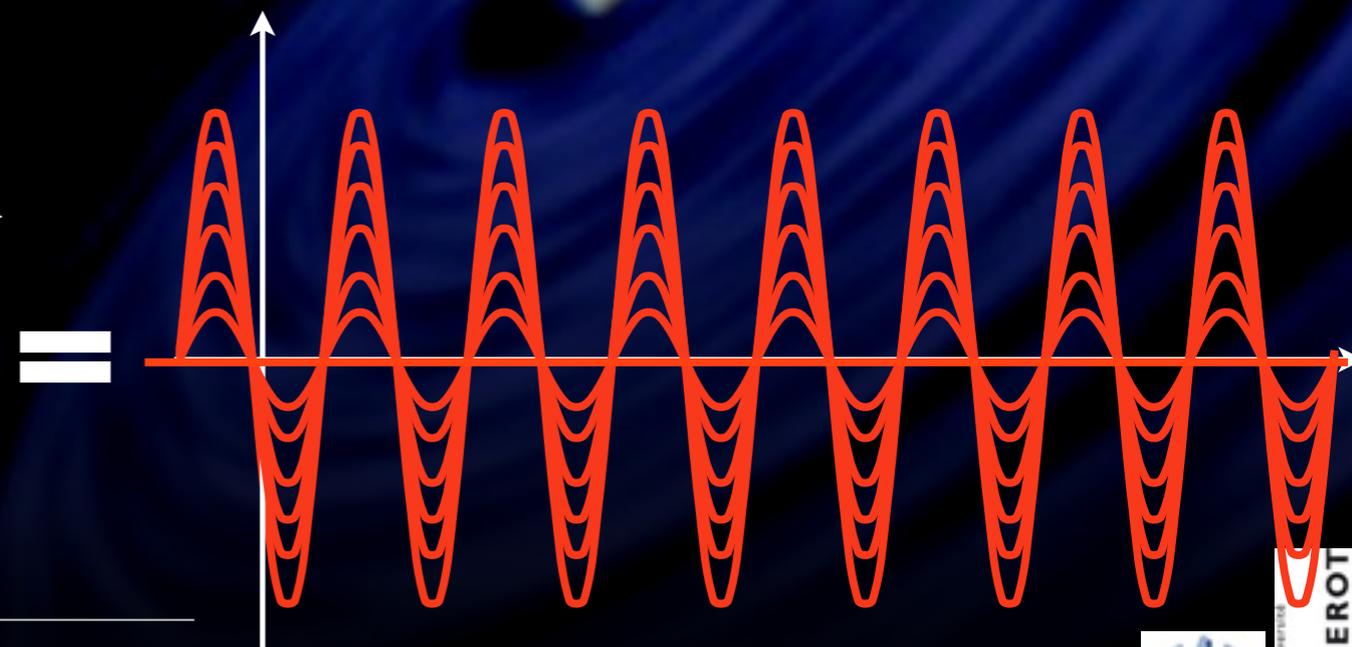
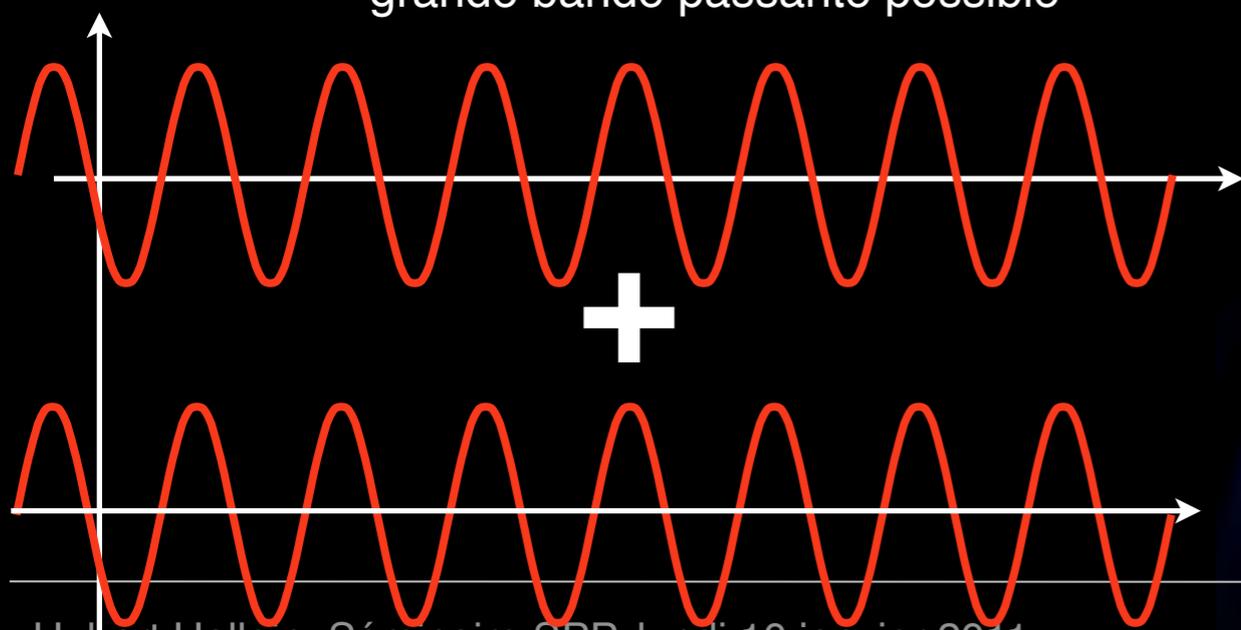
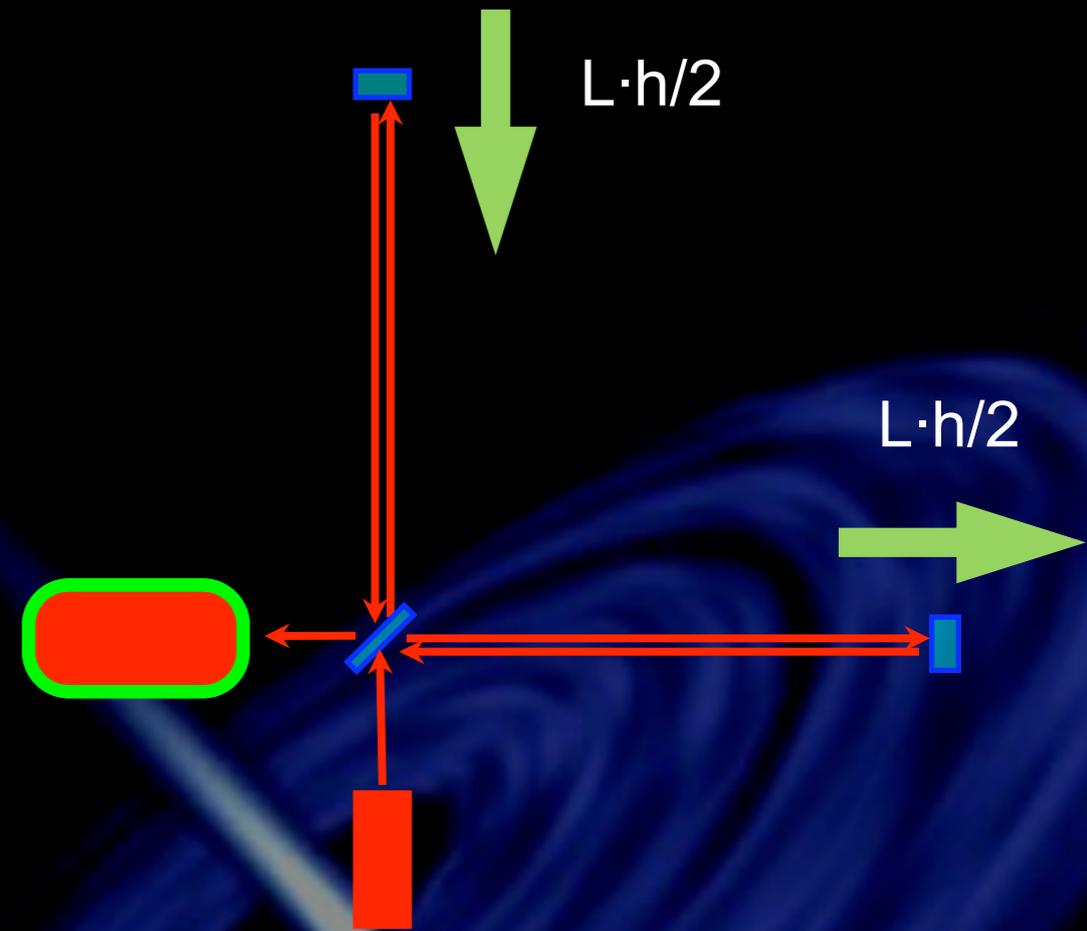




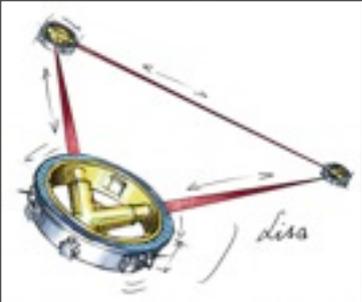
# Détecter les ondes gravitationnelles ...

## Différents types de détecteurs 'directs'

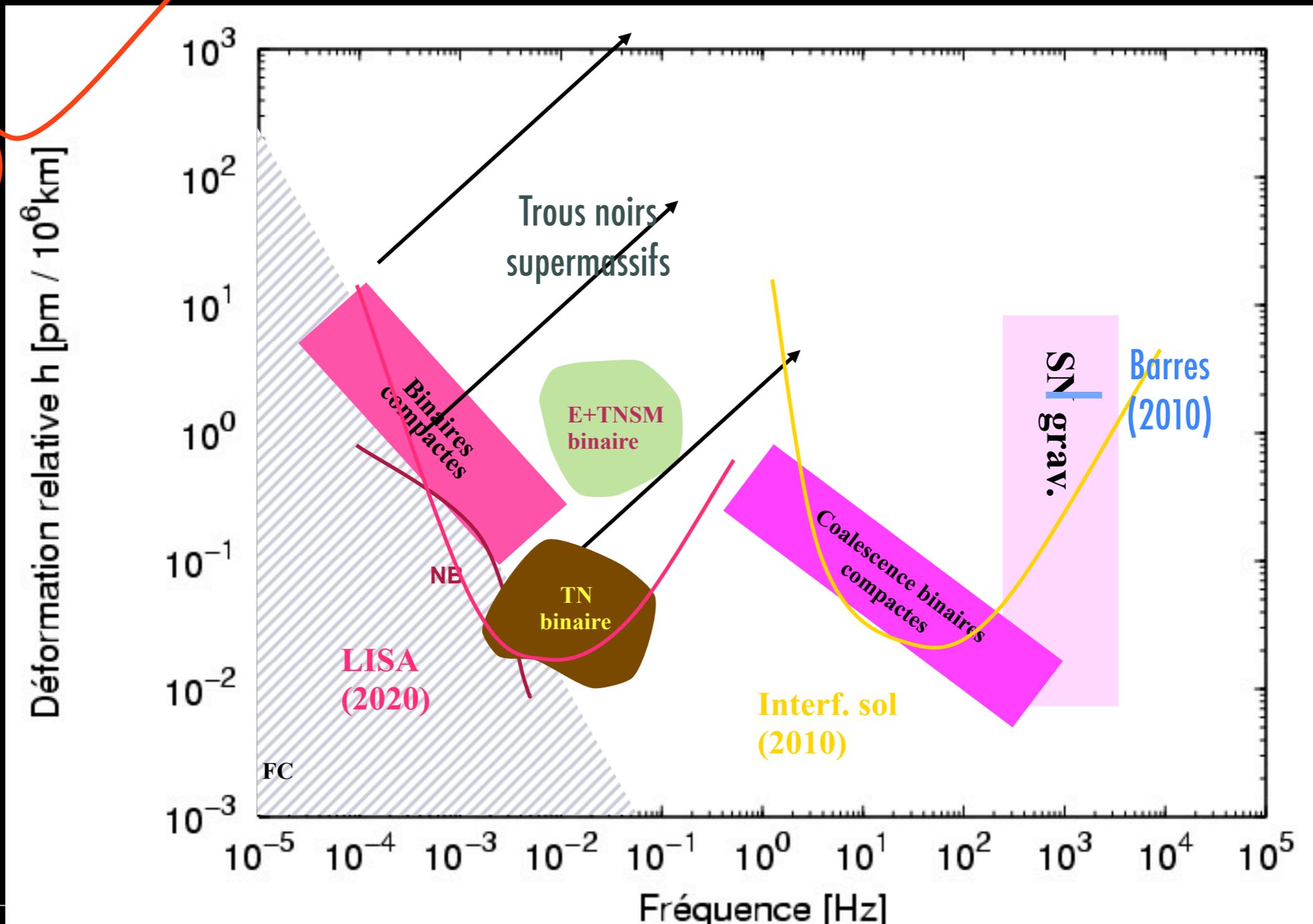
- corrélations des temps d'arrivée des signaux de pulsars
  - fréquences de l'ordre du nHz (projet SKA)
- barres et sphères résonnantes
  - fréquences de l'ordre du kHz (barres de Weber, Explorer, NIOBE, MiniGRAIL, etc)
- techniques interférométriques :
  - mesurer la variation de distance entre masses 'inertielles'
  - mesure différentielle entre 2 bras (moins de bruits ...)
  - grande bande passante possible

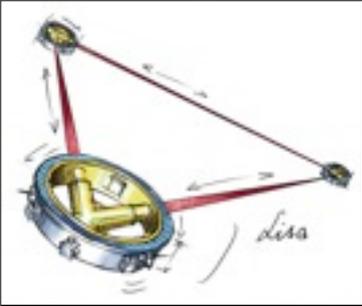


# Sources et détecteurs



SKA (2020)





# De l'éther aux ondes gravitationnelles

## Expérience de Michelson & Morley (1887)

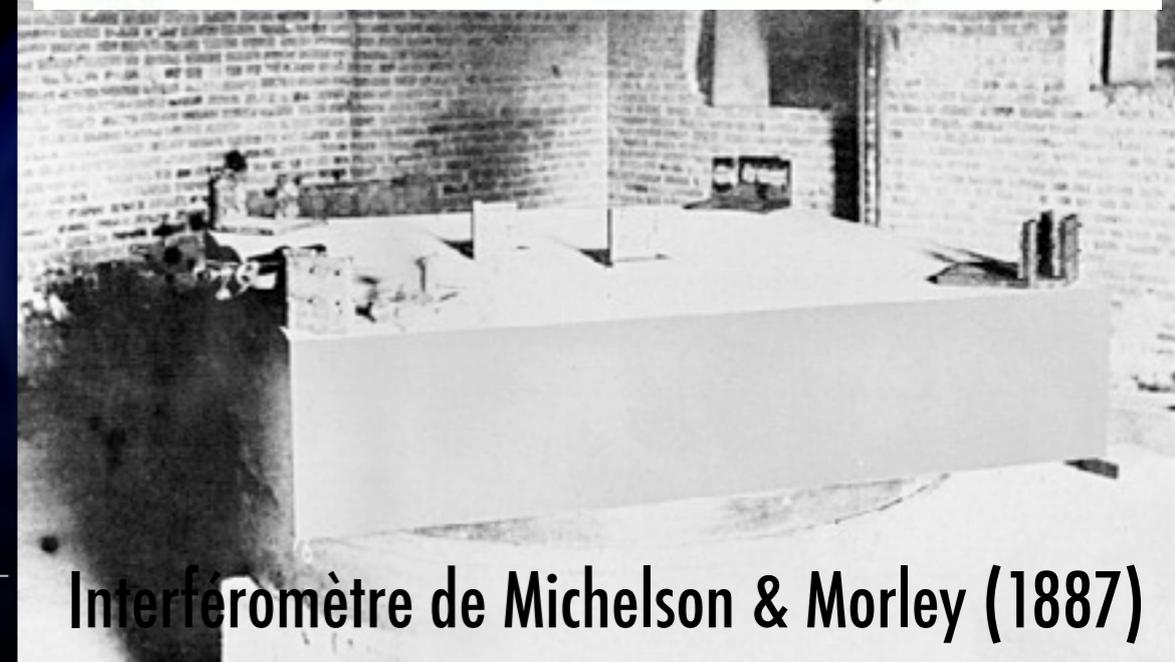
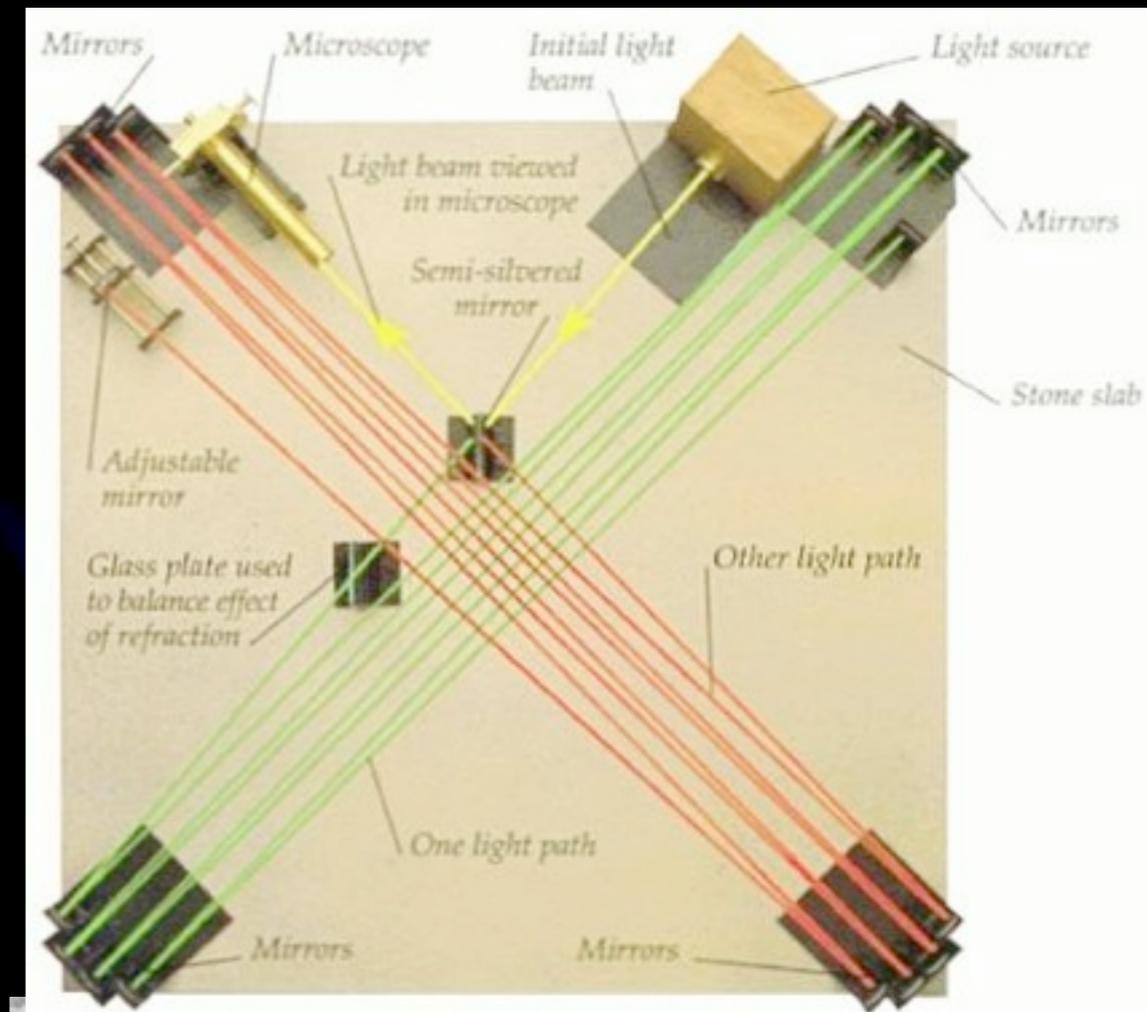
- A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle : hypothèse d'un support, absolument immobile, de la lumière : l'éther
- expérience interférométrique de Michelson & Morley : la lumière se propage à la même vitesse dans toutes les directions (hors la Terre se déplace par rapport à l'éther...)
- incompatible avec la théorie de l'éther
- Précision atteinte :  $6 \text{ nm} / 11 \text{ m} \approx 5 \cdot 10^{-10}$

## Einstein trouve la solution (1905)

- l'éther n'existe pas, la vitesse de la lumière est une limite absolue...
- début de la théorie de la relativité (restreinte puis générale)

## Aujourd'hui

- les mêmes expériences pour tester les théories d'Einstein...
- précision à atteindre :
  - $10^{-5} \text{ pm} / 32 \text{ km} \approx 10^{-22}$  (VIRGO, sol)
  - $1 \text{ pm} / 5 \cdot 10^6 \text{ km} \approx 2 \cdot 10^{-22}$  (LISA, espace)

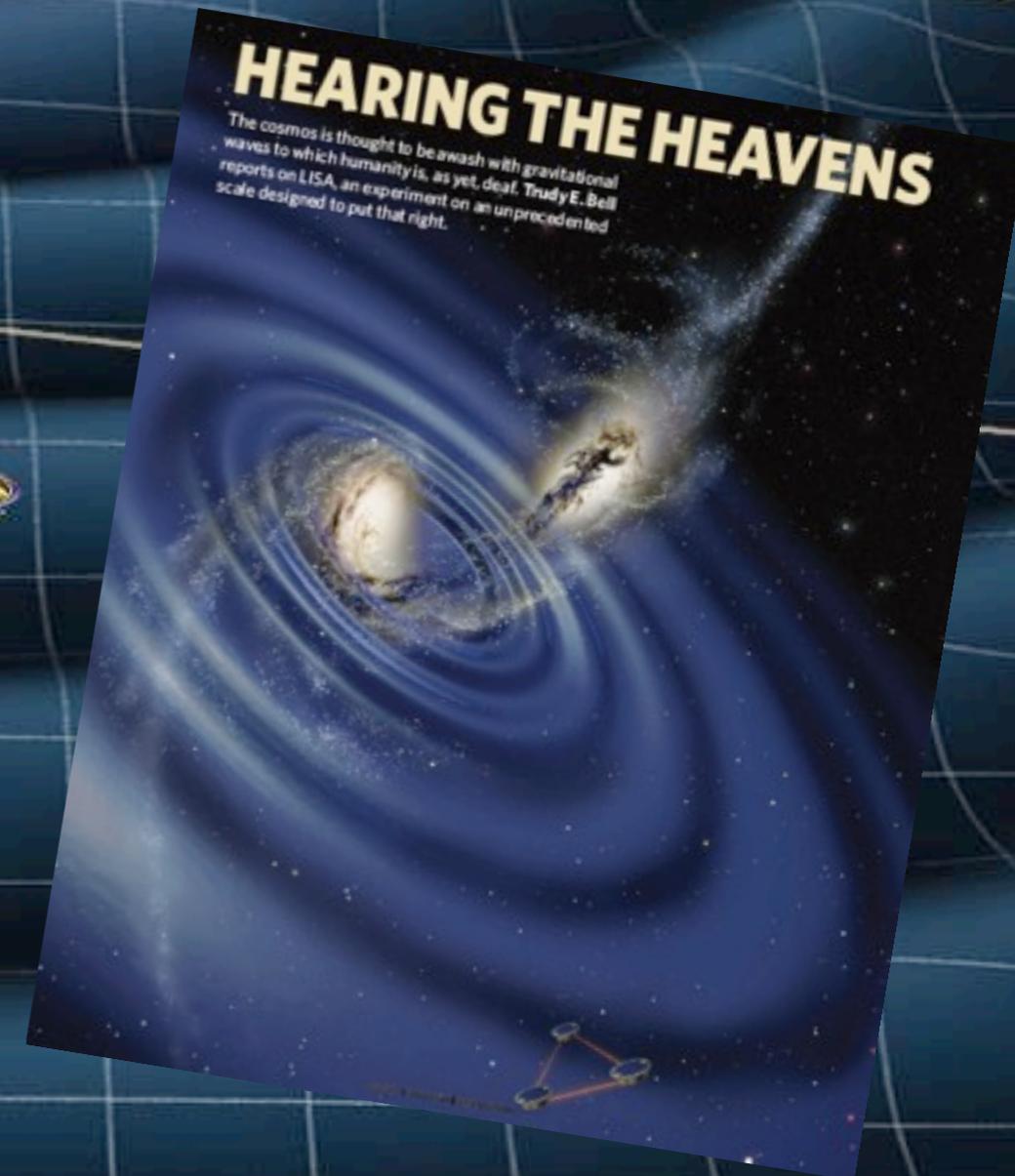
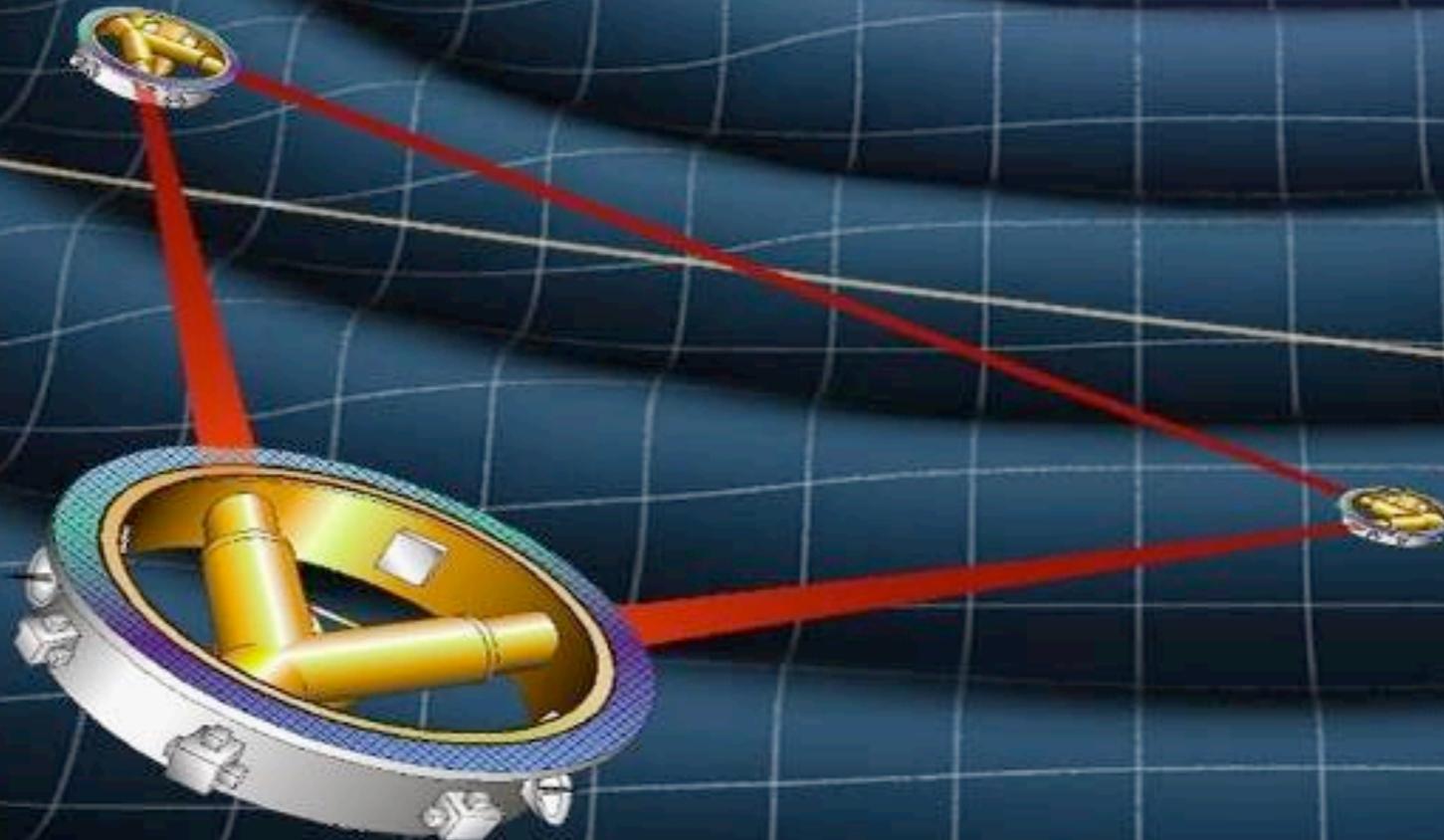


Interféromètre de Michelson & Morley (1887)



## Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

- projet spatial ESA-NASA
- s'affranchir des perturbations terrestres (vibrations)
- augmenter la distance entre les miroirs (donc la sensibilité)
- «écouter» dans une bande fréquentielle contenant (a priori...) beaucoup de sources



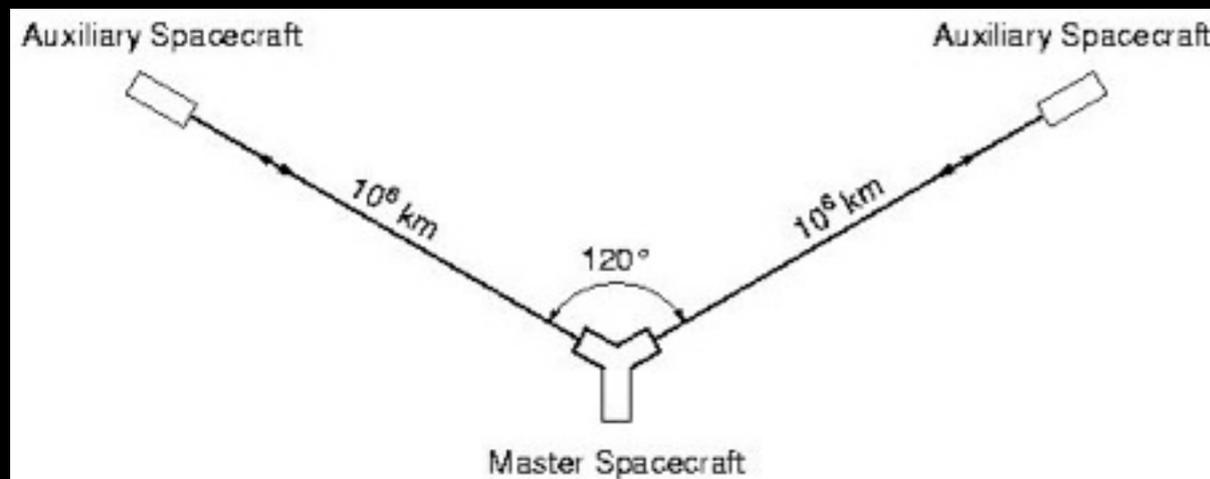
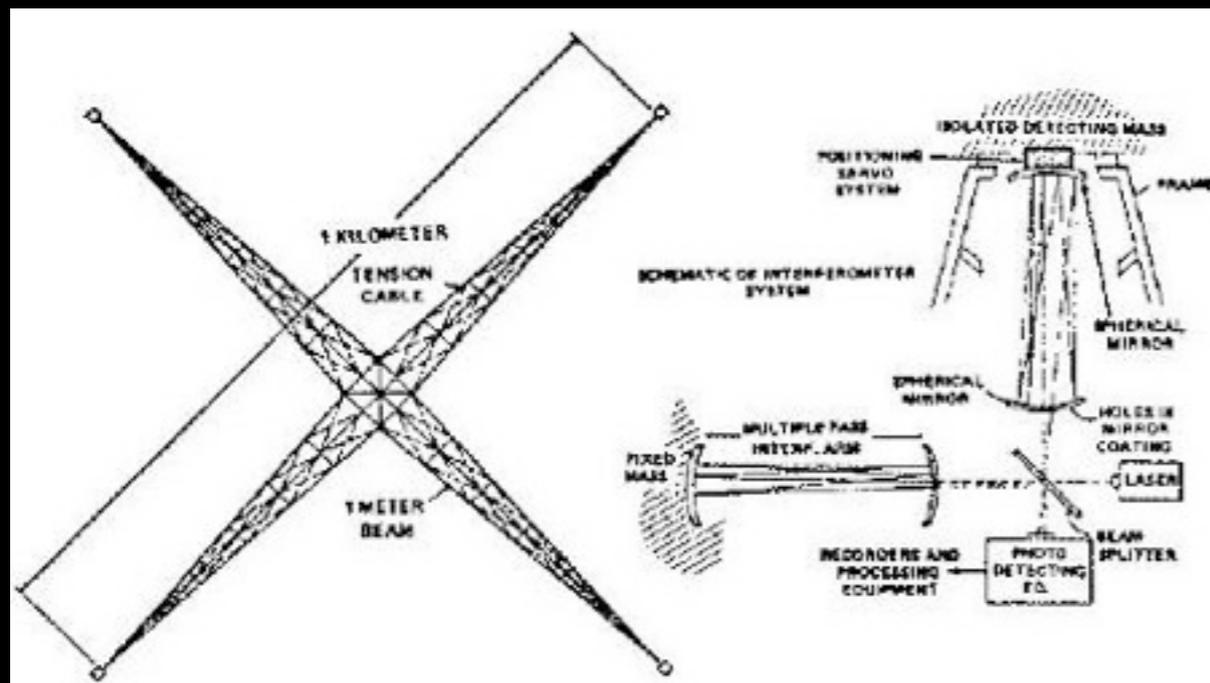
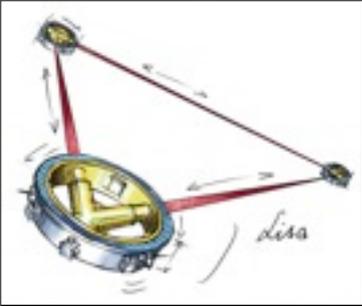
# Un peu d'histoire

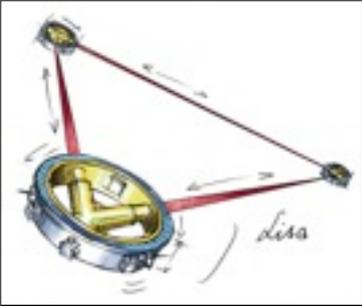
## Premières études NASA

— structure rigide 1x1 km (1978)

— 3 satellites en vol inertiel (années 80)

— Rq : vol inertiel  $\neq$  vol en formation ...





# Un peu d'histoire

## Proposition en 1993/94 :

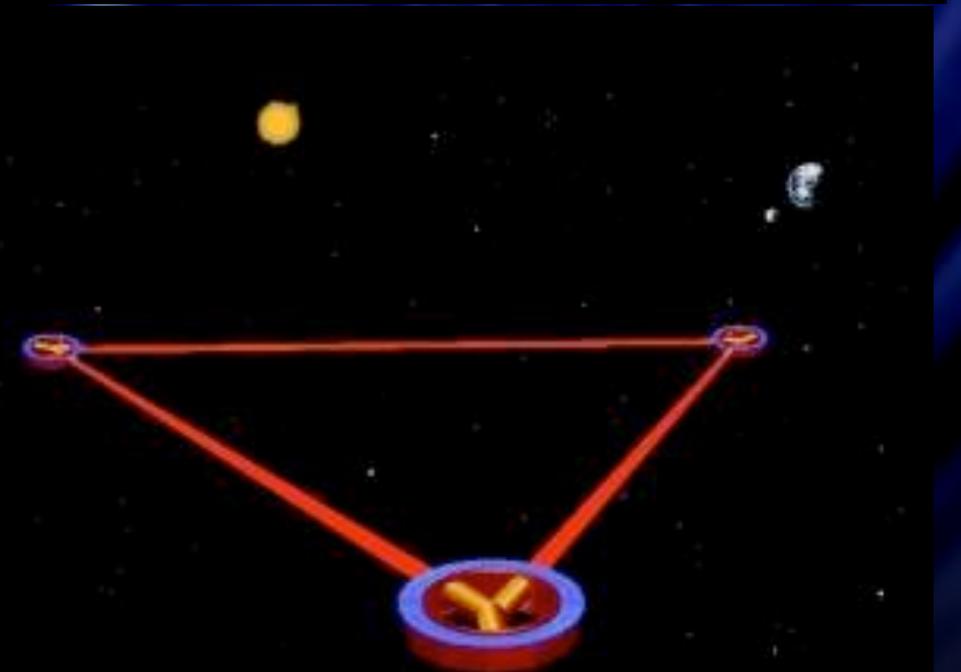
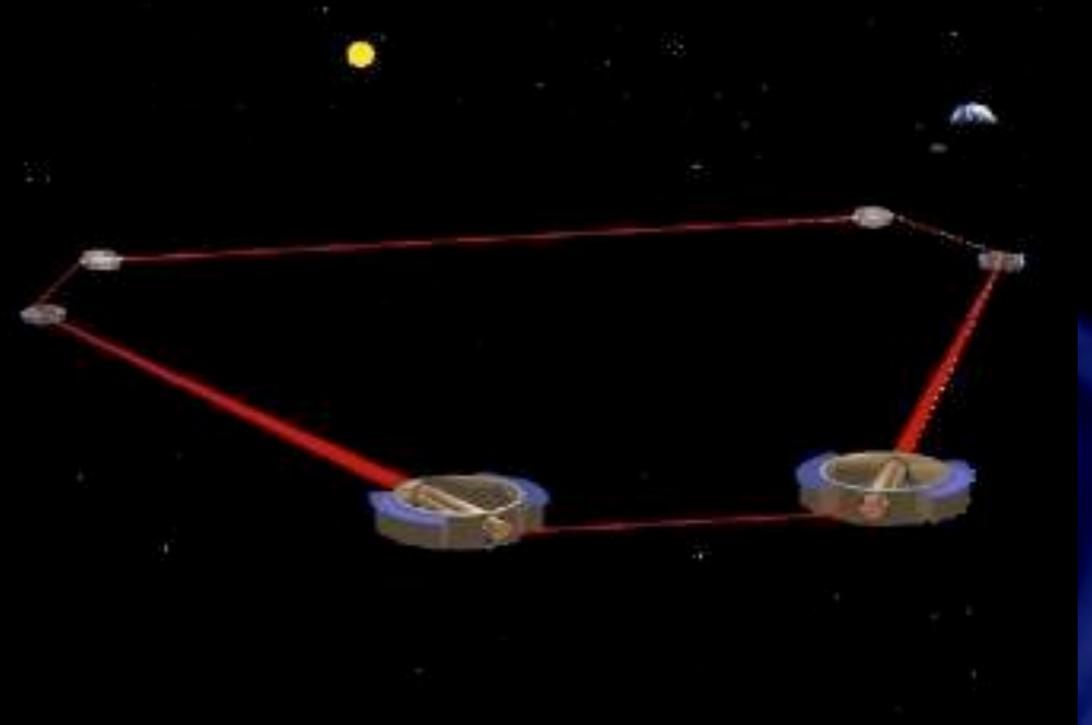
- 6 satellites en orbite héliocentrique
- Sélectionnée comme projet « pierre angulaire » par l'ESA

## 1997 : réduction à 3 satellites :

- en collaboration avec la NASA
- configuration finale ...

## Aujourd'hui, mission conjointe ESA-NASA :

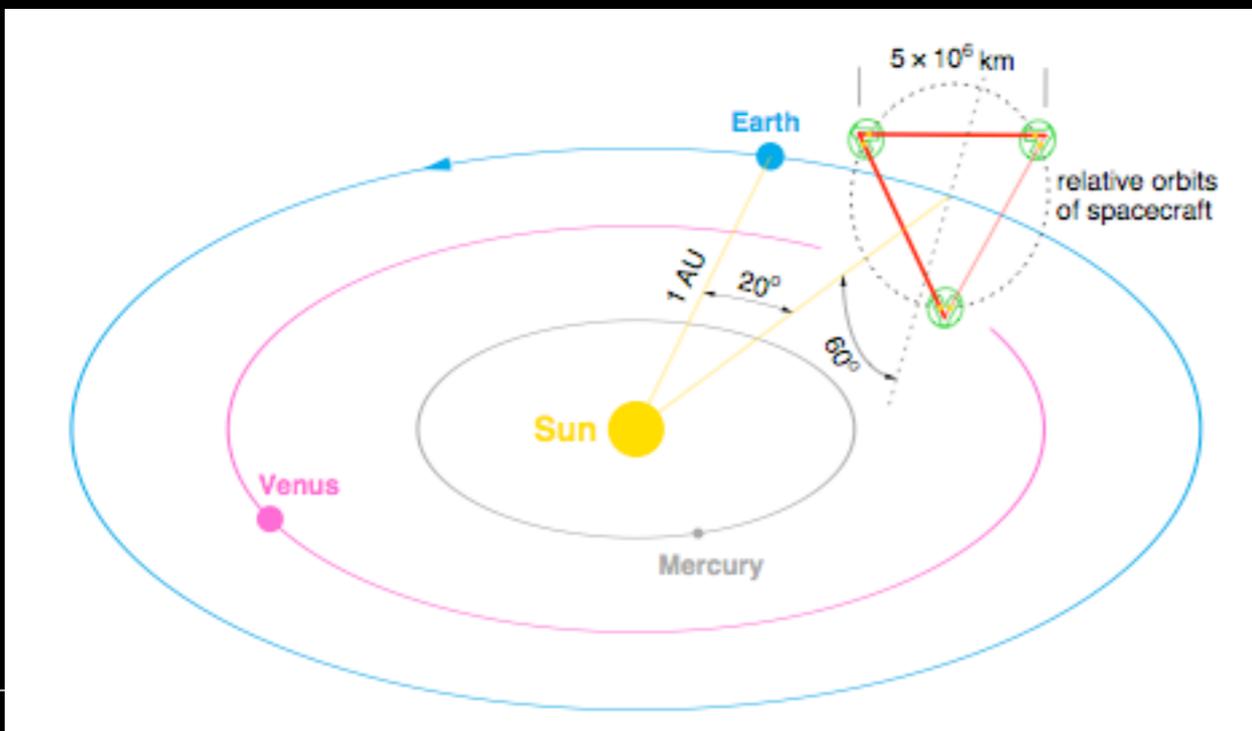
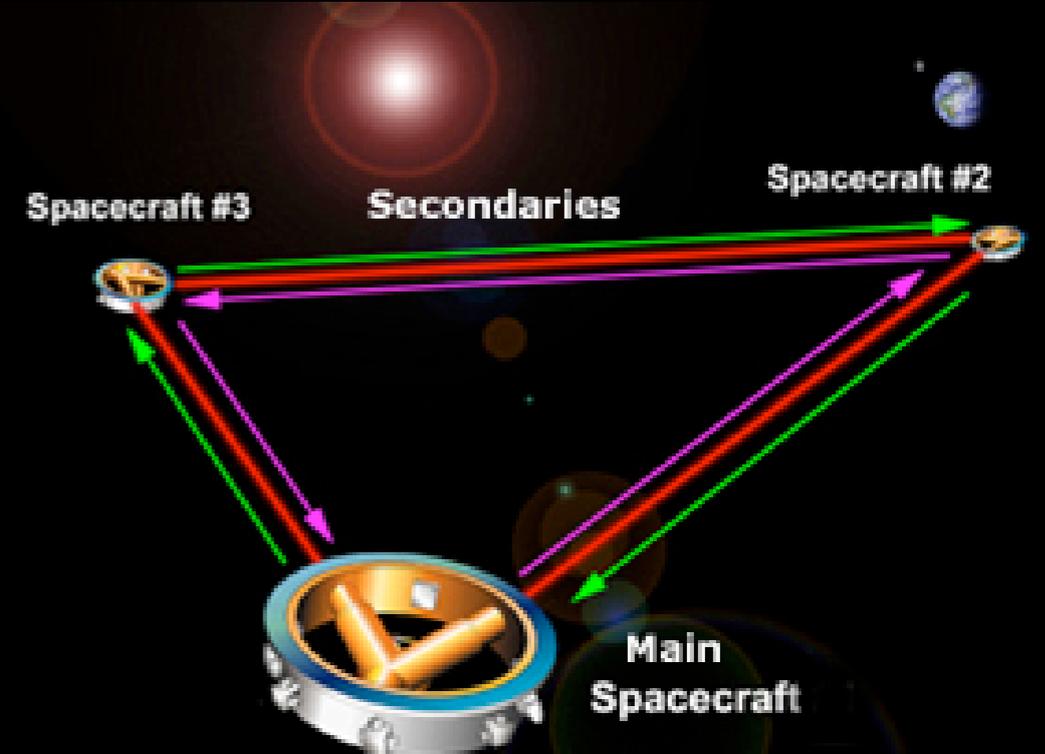
- mission L du programme Cosmic Vision à l'ESA
  - en concurrence avec IXO et Laplace
- recommandée en 2010 par le Decadal Survey de l'Académie des Sciences américaine (avec WFirst)



# Principe

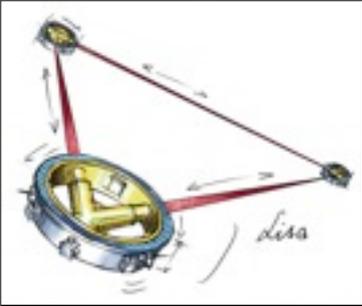
## Principe de fonctionnement :

- 3 «miroirs» (1 par satellite) en chute libre (c.à.d. soumises uniquement à la gravité) suivant un triangle équilatéral
- distance entre satellites : 5 000 000 km !
- 1 faisceau laser d'un satellite vers les 2 autres
- mesure de distance par interférométrie
- détection d'ondes gravitationnelles entre 0,1 mHz et 1 Hz



Hubert Halloin, Séminaire SPP, lundi 10 janvier 2011

2

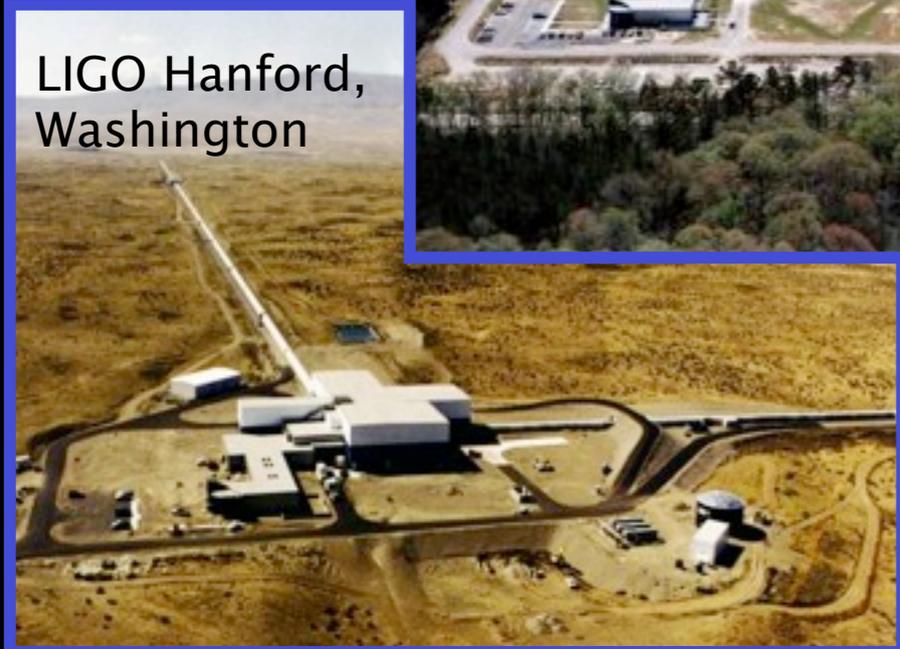


# Mesurer 0.000 000 000 000 1 m sur 5 000 000 000 m ?

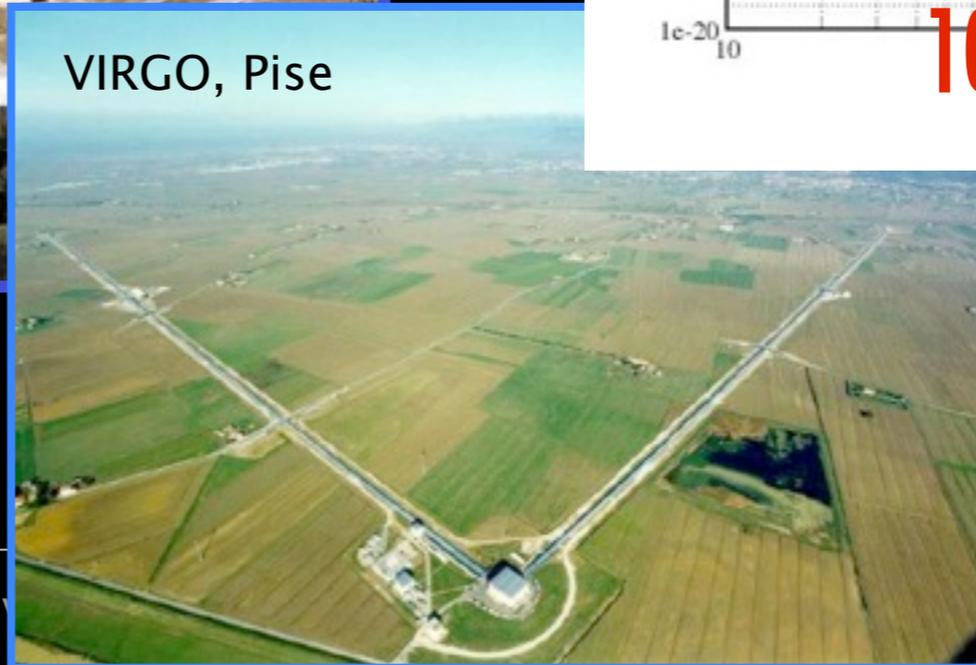
- La science de LISA nécessite de mesurer d'infimes variations de longueur :
  - périodes entre 1 et 1000 s
  - amplitudes de l'ordre de 0,1 pm ( $\sim 1/100$  atome)
  - durée d'intégration :  $\sim 1$  an
  - Impossible ?
  - On fait (beaucoup !) mieux sur Terre !



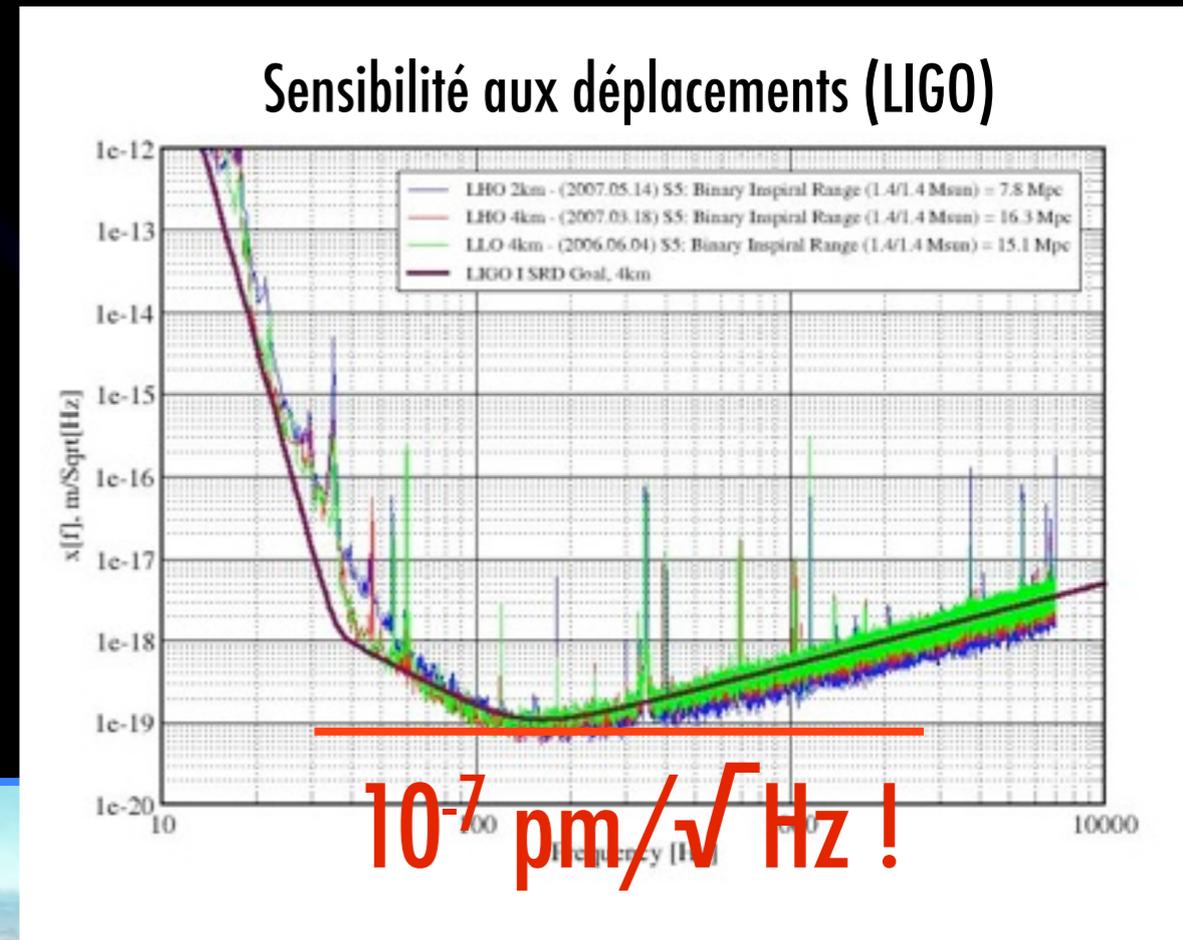
LIGO Livingston, Louisiane

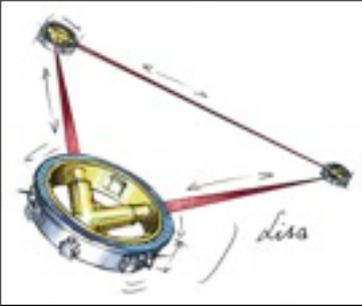


LIGO Hanford, Washington



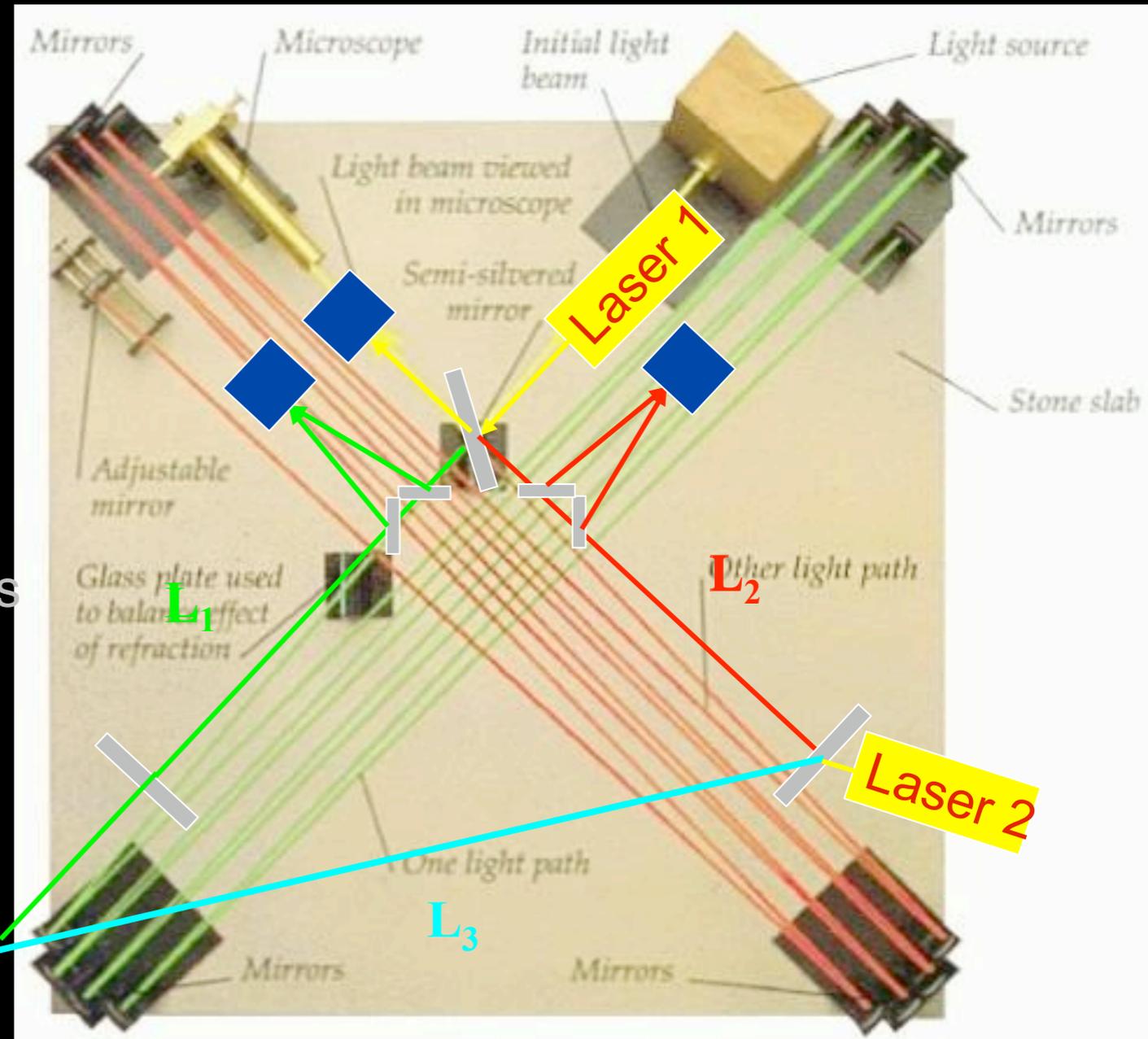
VIRGO, Pise

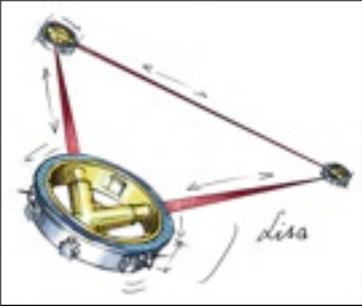




# Un interféromètre de 5 Mkm ...

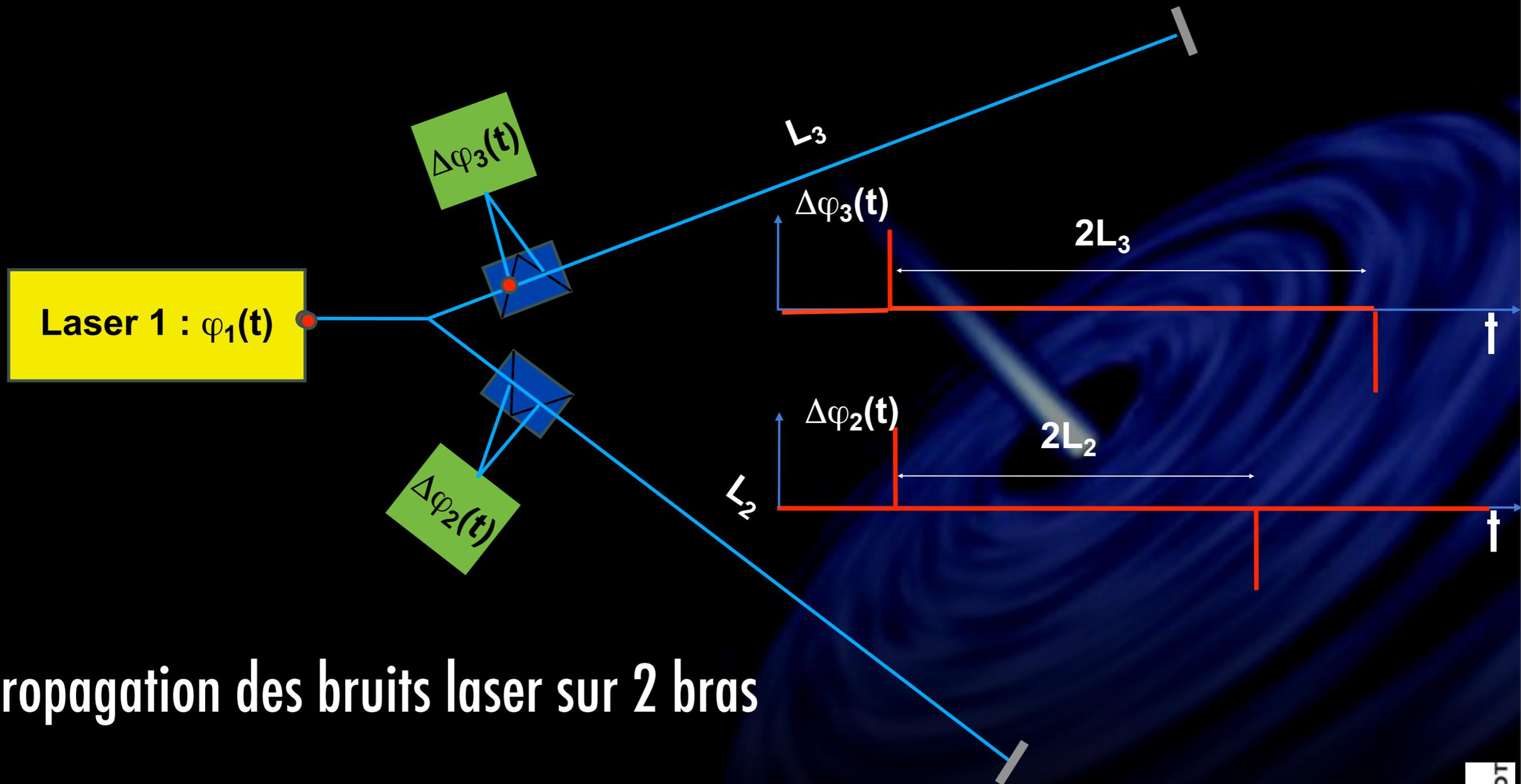
- [ Michelson = bras égaux, une mesure
- compensation 'naturelle' du bruit de phase du laser
- [ Etape 1 : 2 mesures indépendantes
- [ Etape 2 : bras inégaux
- 5  $10^6 \pm 25 \cdot 10^3$  km (orbites purement képlériennes !)
- [ Etape 3 :
- 6 lasers (équivalent à 3)
- 6 mesures de phase
- [ Comment réduire le bruit de phase des lasers ? :
- Combinaison des mesures retardées (16 s) : Time Delay Interferometry ou TDI
- Asservissement de la fréquence sur la longueur des bras
- Lasers intrinsèquement stables !



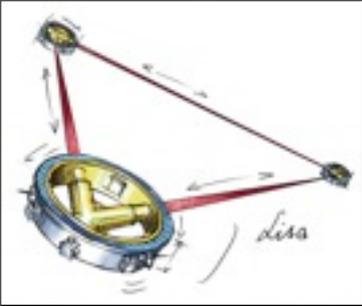


# Interférométrie retardée

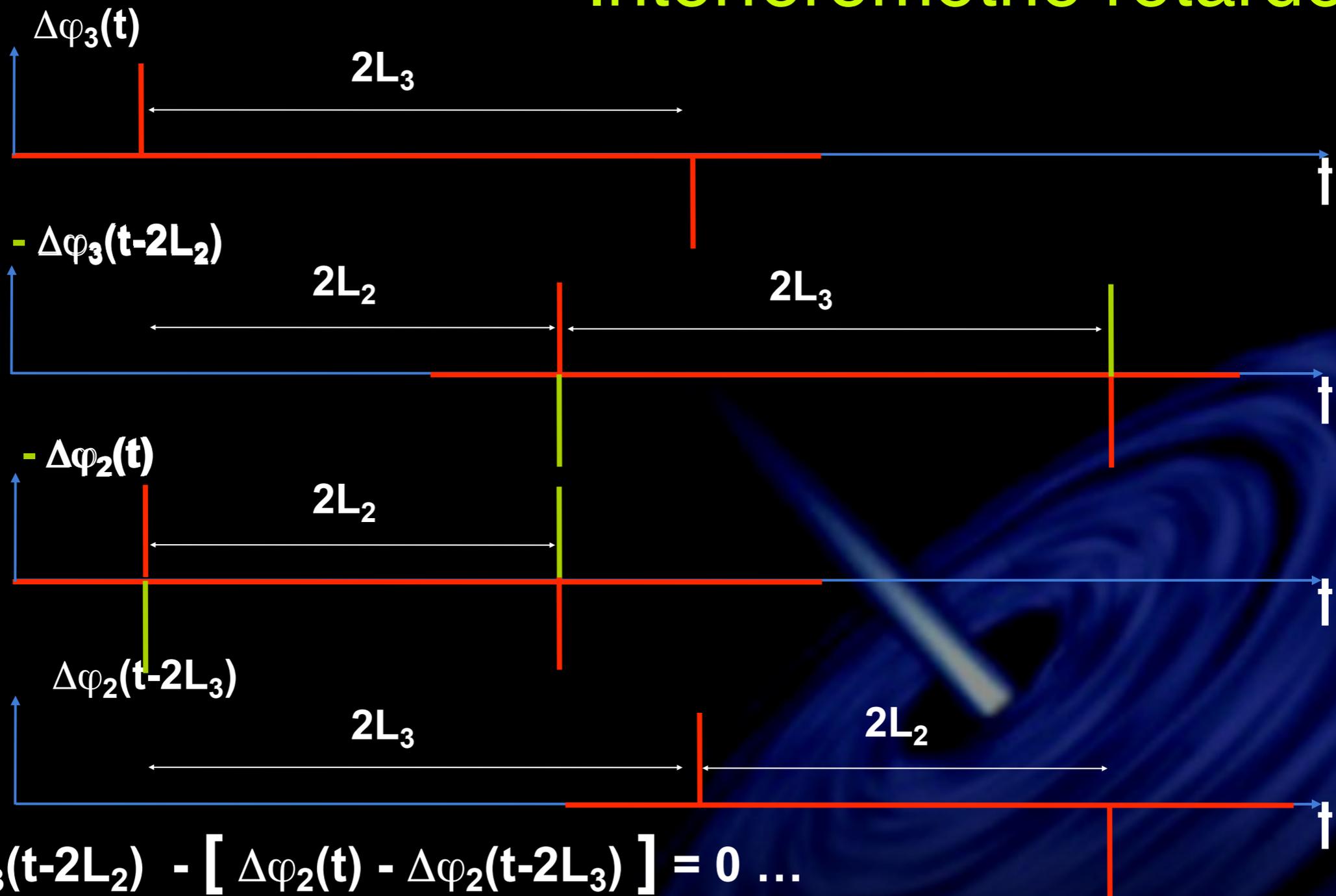
— [ Comment compenser le temps de parcours d'un satellite à un autre ?



## Propagation des bruits laser sur 2 bras



# Interférométrie retardée

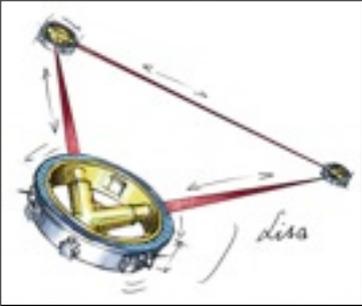


$$\Delta\varphi_3(t) - \Delta\varphi_3(t-2L_2) - [\Delta\varphi_2(t) - \Delta\varphi_2(t-2L_3)] = 0 \dots$$

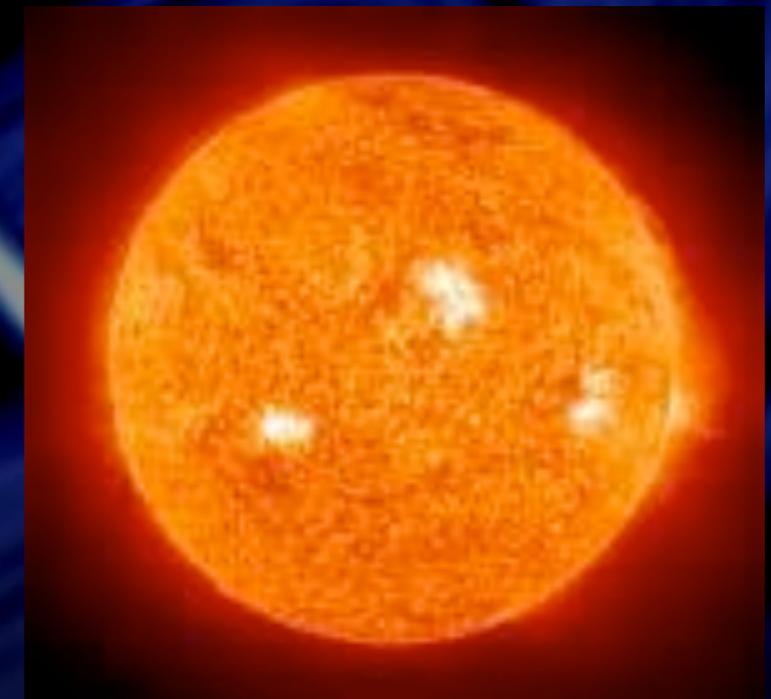
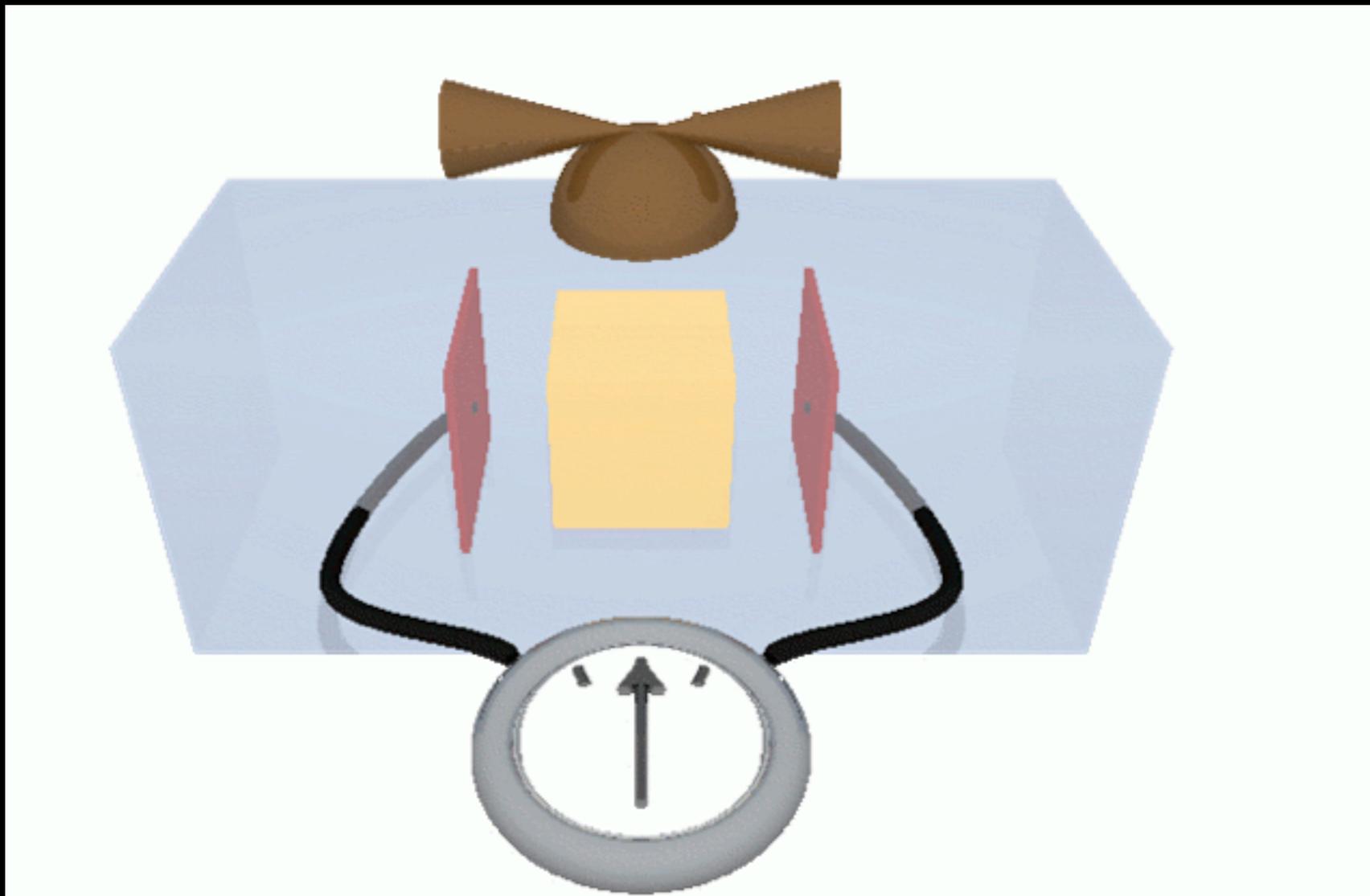
⇒ **Annulation du bruit laser ... mais pas de l'onde gravitationnelle**

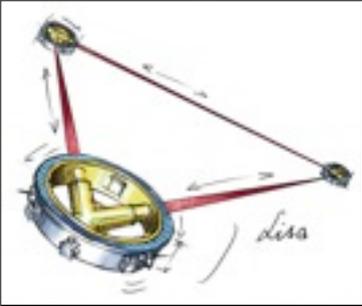
L'incertitude sur la connaissance de L1 et L2 donne un résidu de bruit de phase des lasers ⇒ il faut des sources stabilisées

# Vol inertiel



- Dans l'espace, la principale perturbation à un mouvement purement gravitationnel est le vent solaire
- Le satellite sert de 'bouclier' contre le vent solaire et doit suivre en permanence la masse de référence.

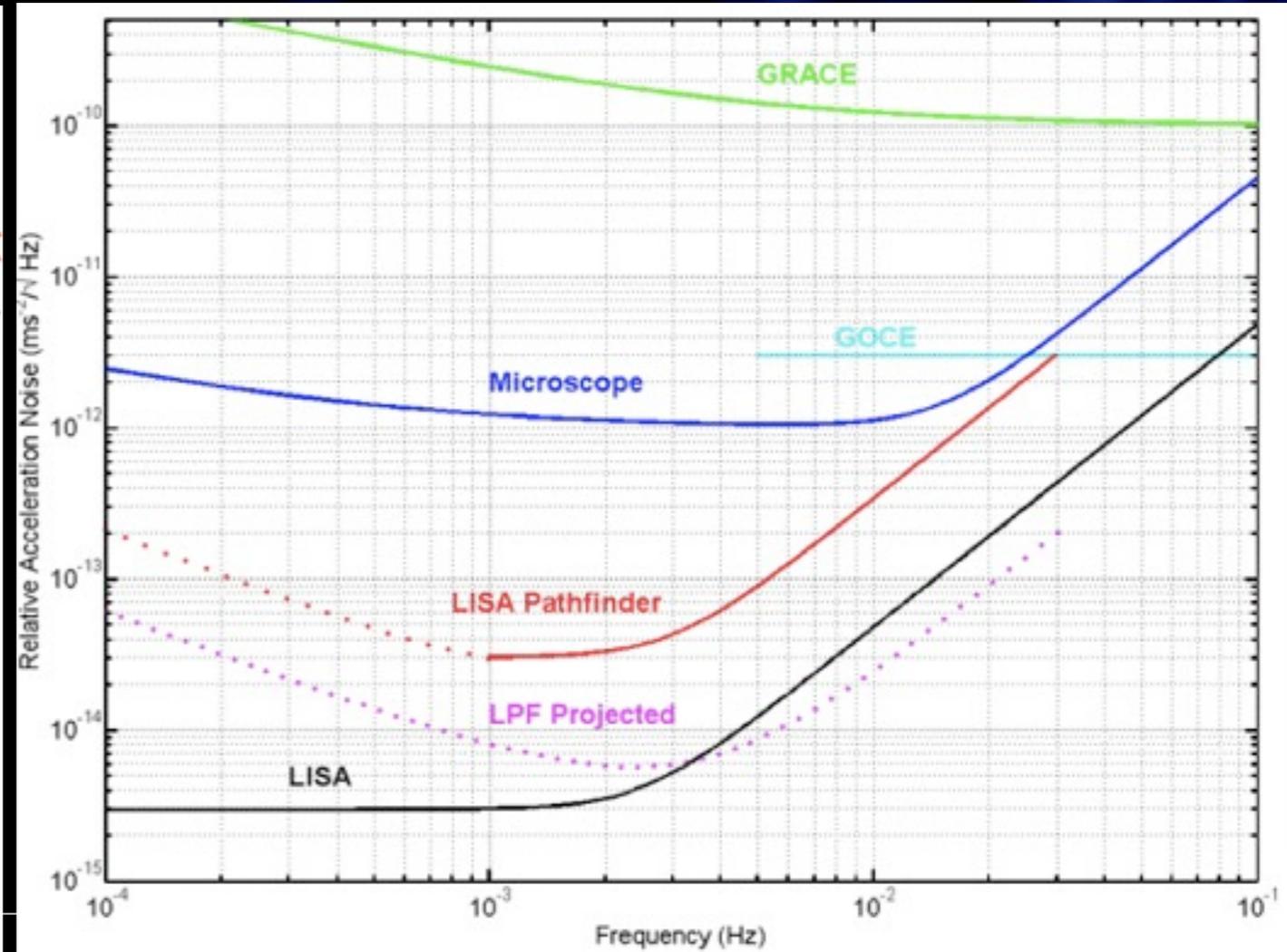
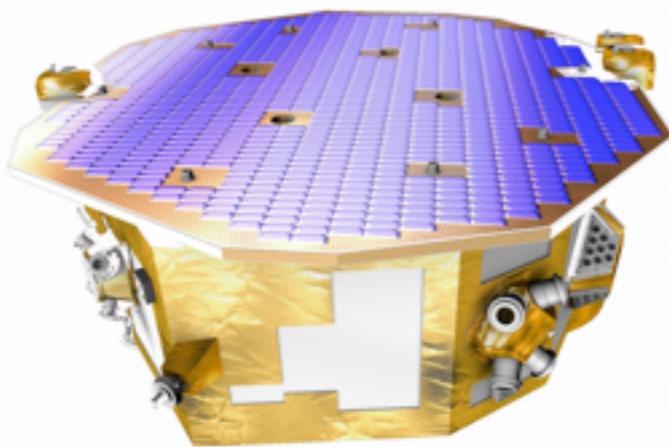
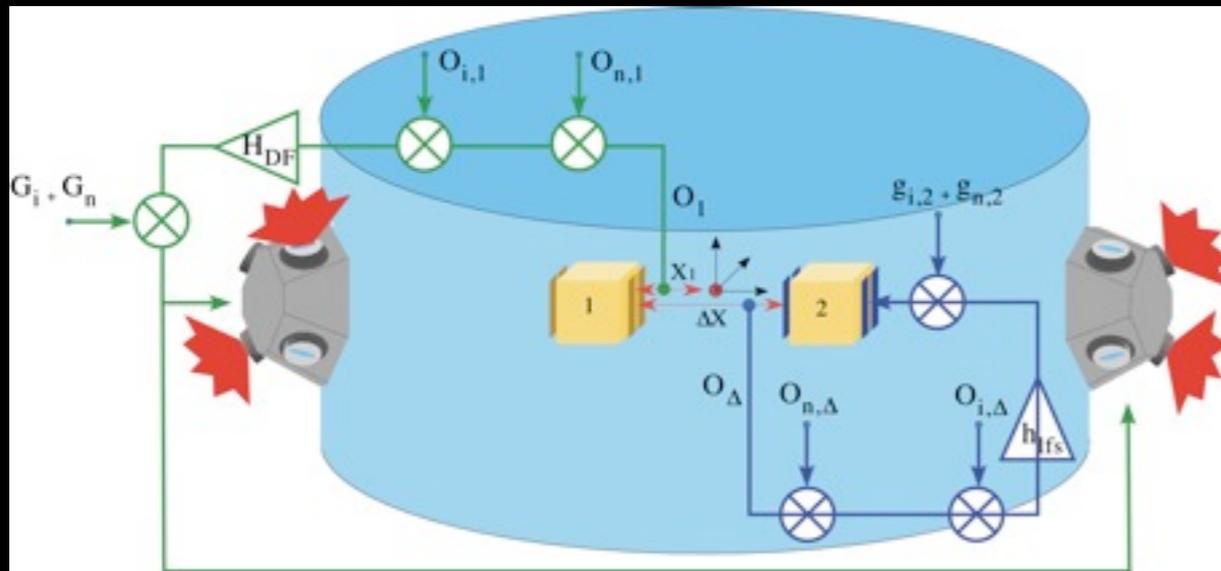


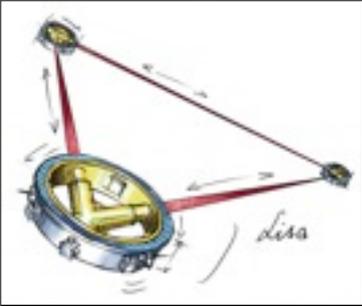


# Tester le vol inertiel : LISA Pathfinder

Objectif de LISA Pathfinder : tester des technologies clés pour LISA :

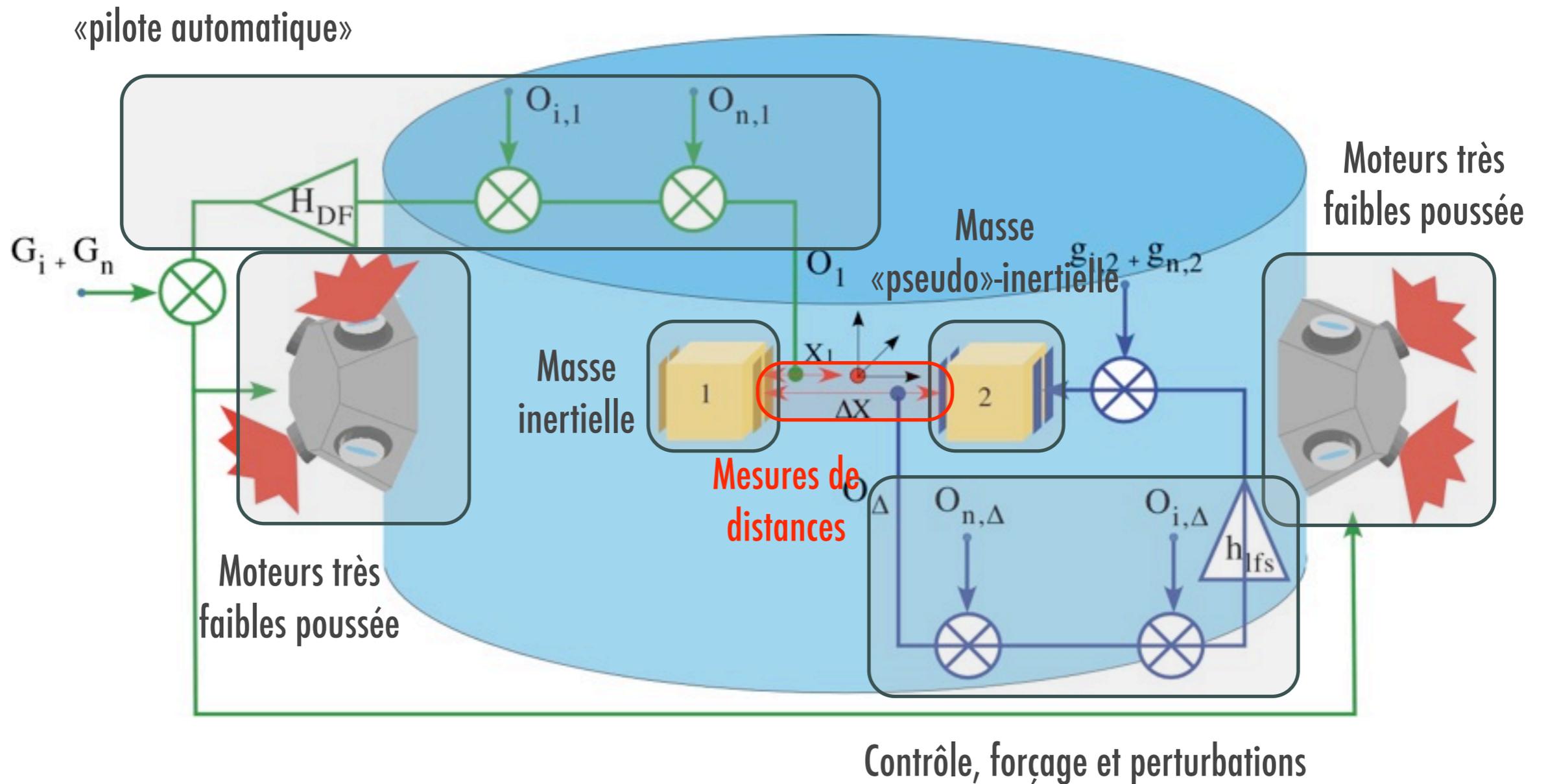
- Sait-on suivre une orbite purement gravitationnelle ?
- Comment tenir (très) fermement la masse de référence au décollage, puis la relâcher (quasiment) sans vitesse initiale ?
- Est-il possible de mesurer la distance entre 2 masses inertielles avec une précision du pm ?
- Sous maîtrise d'oeuvre ESA
  - Contribution NASA : système de contrôle + micro-propulseurs redondants

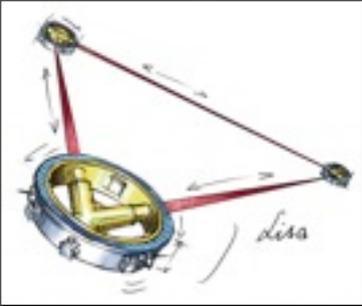




# Tester le vol inertiel : LISA Pathfinder

## Schéma de principe





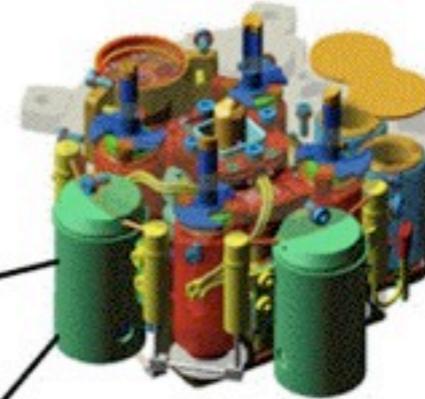
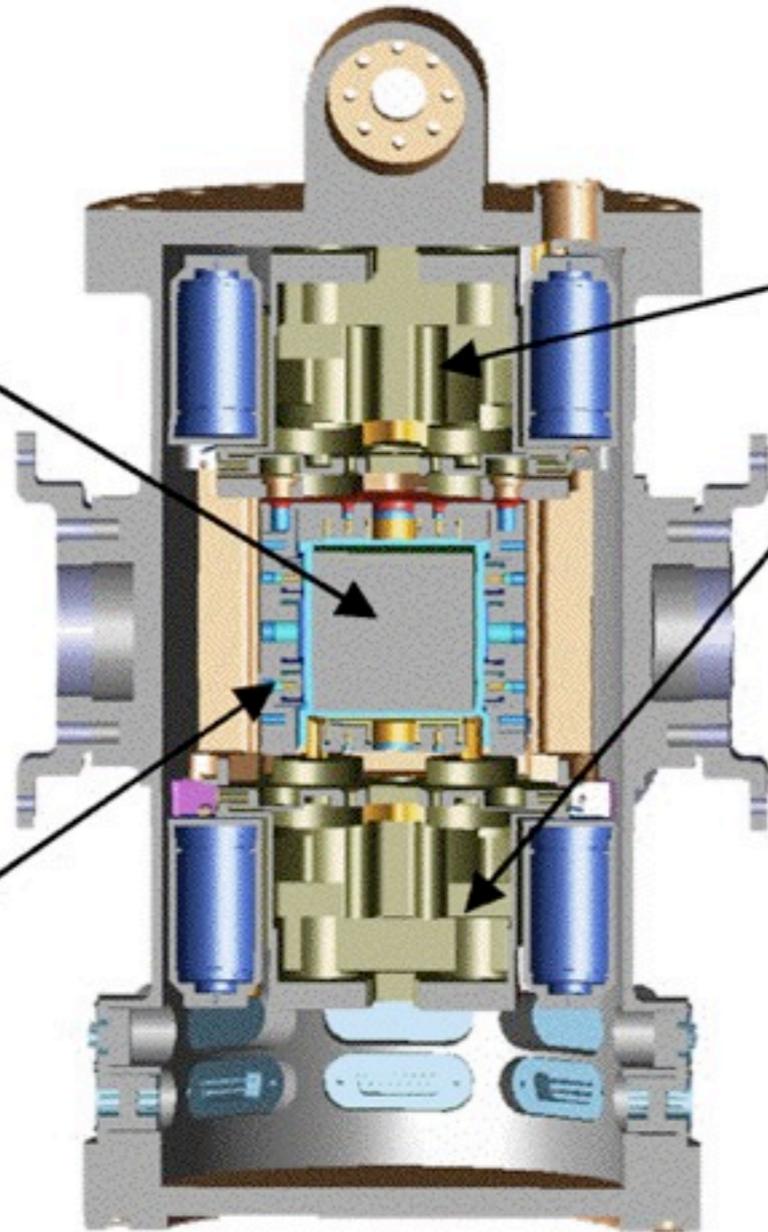
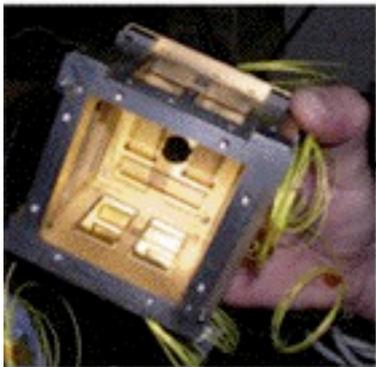
# Confinement des masses inertielles

## Système de maintien des masses



Masse test 5x5x5 cm<sup>3</sup>  
2 kg, Ti/Au

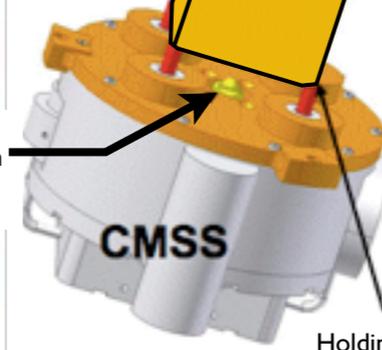
Actuateurs/capteurs  
électrostatiques



CMSS Finger holds  
Test Masses during  
launch



GPRM piston  
(in recess)



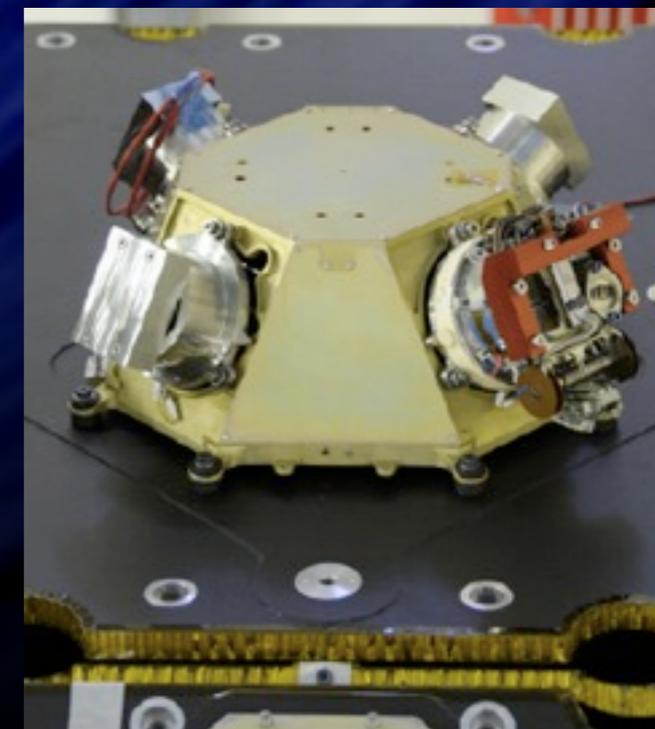
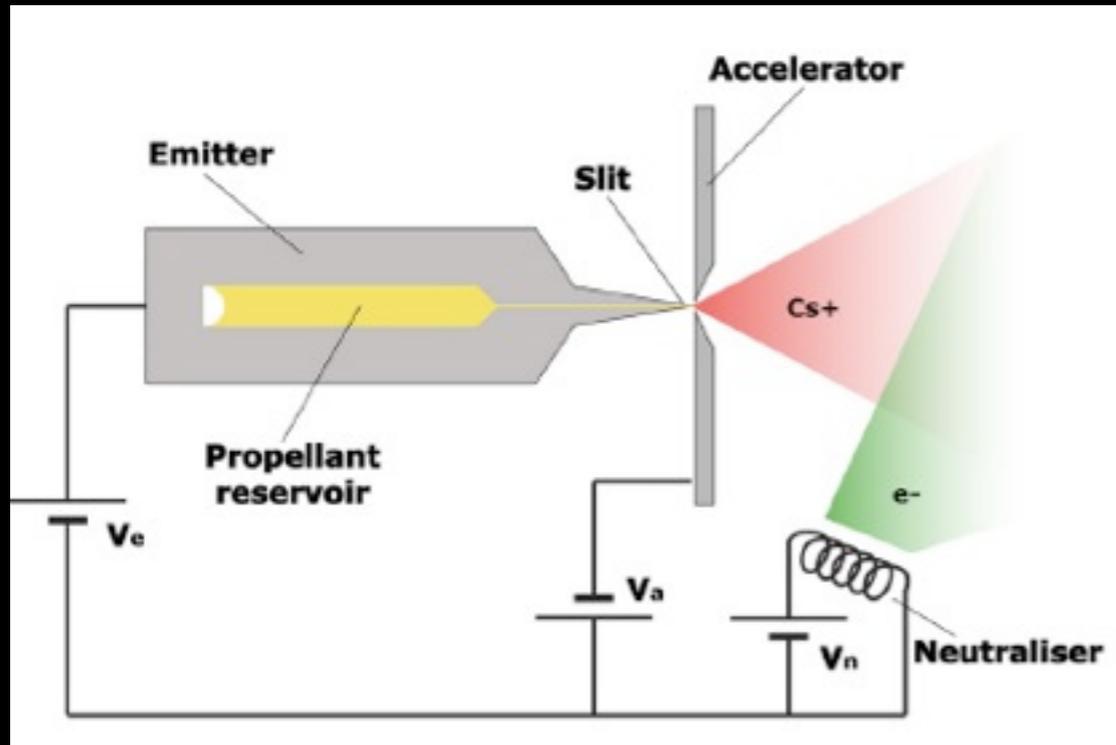
Holding Force up to 3000 N

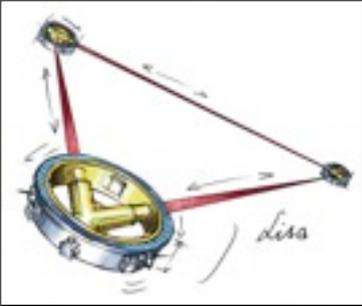


# Micro-propulseurs -FEEP

FEEP : Field Emission Electric Propulsion

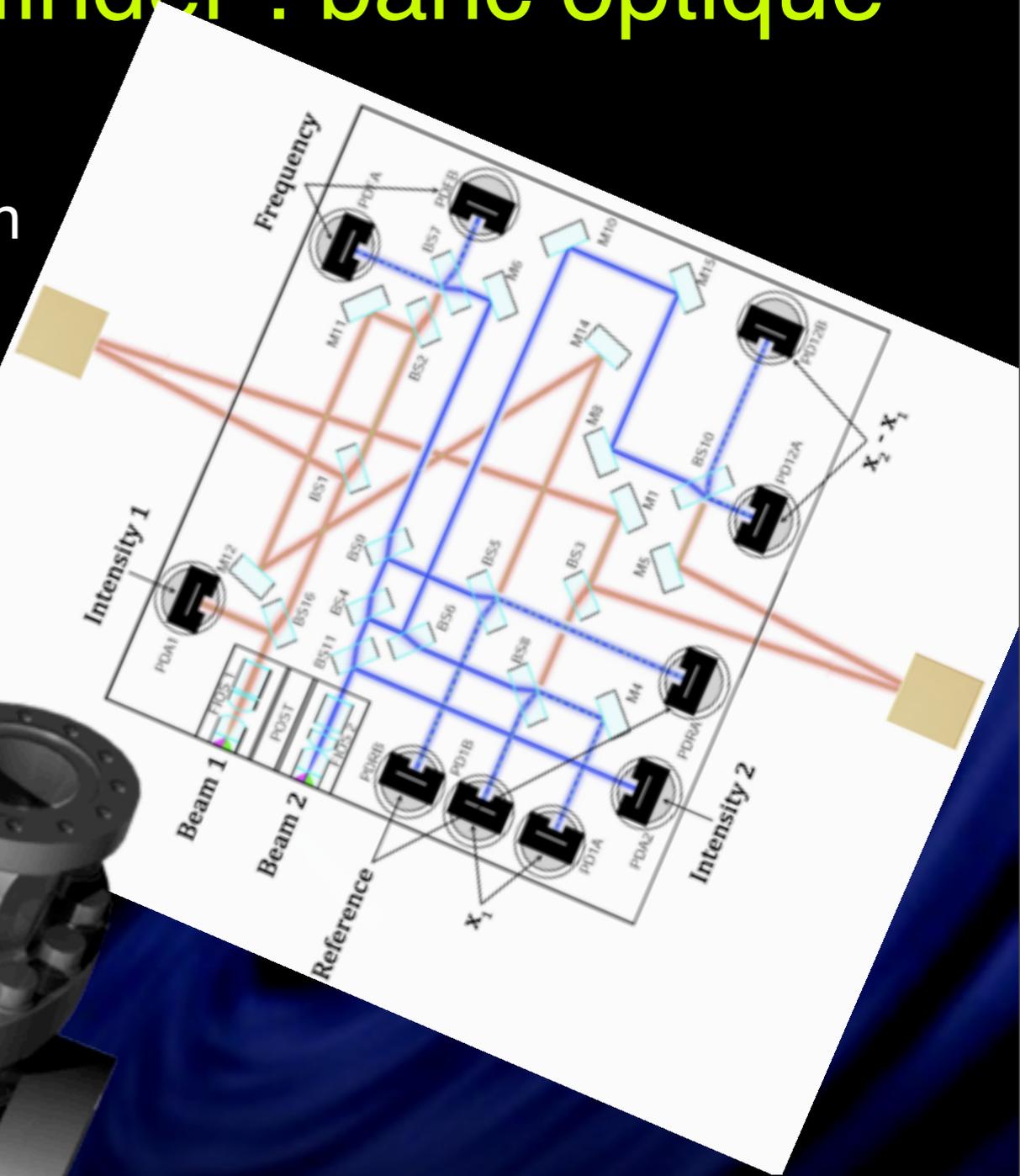
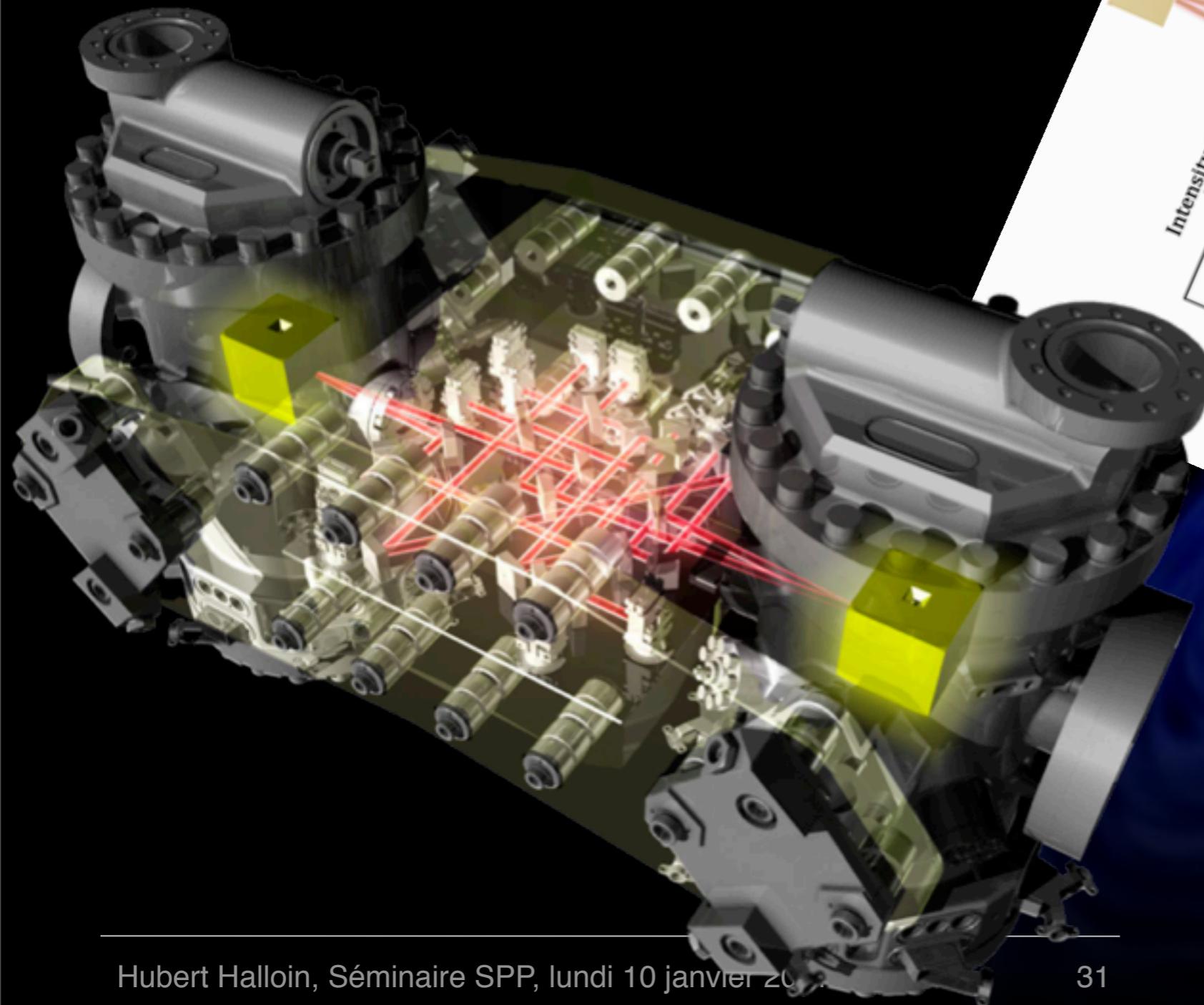
accélération et éjection d'ion Cs  
poussées entre 0,3 et 150  $\mu\text{N}$

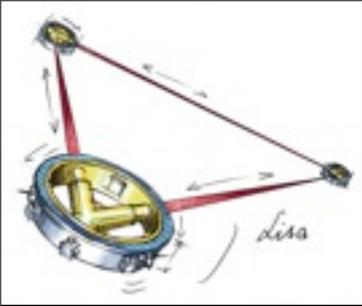




# LISA Pathfinder : banc optique

Mesures interférométriques de précision





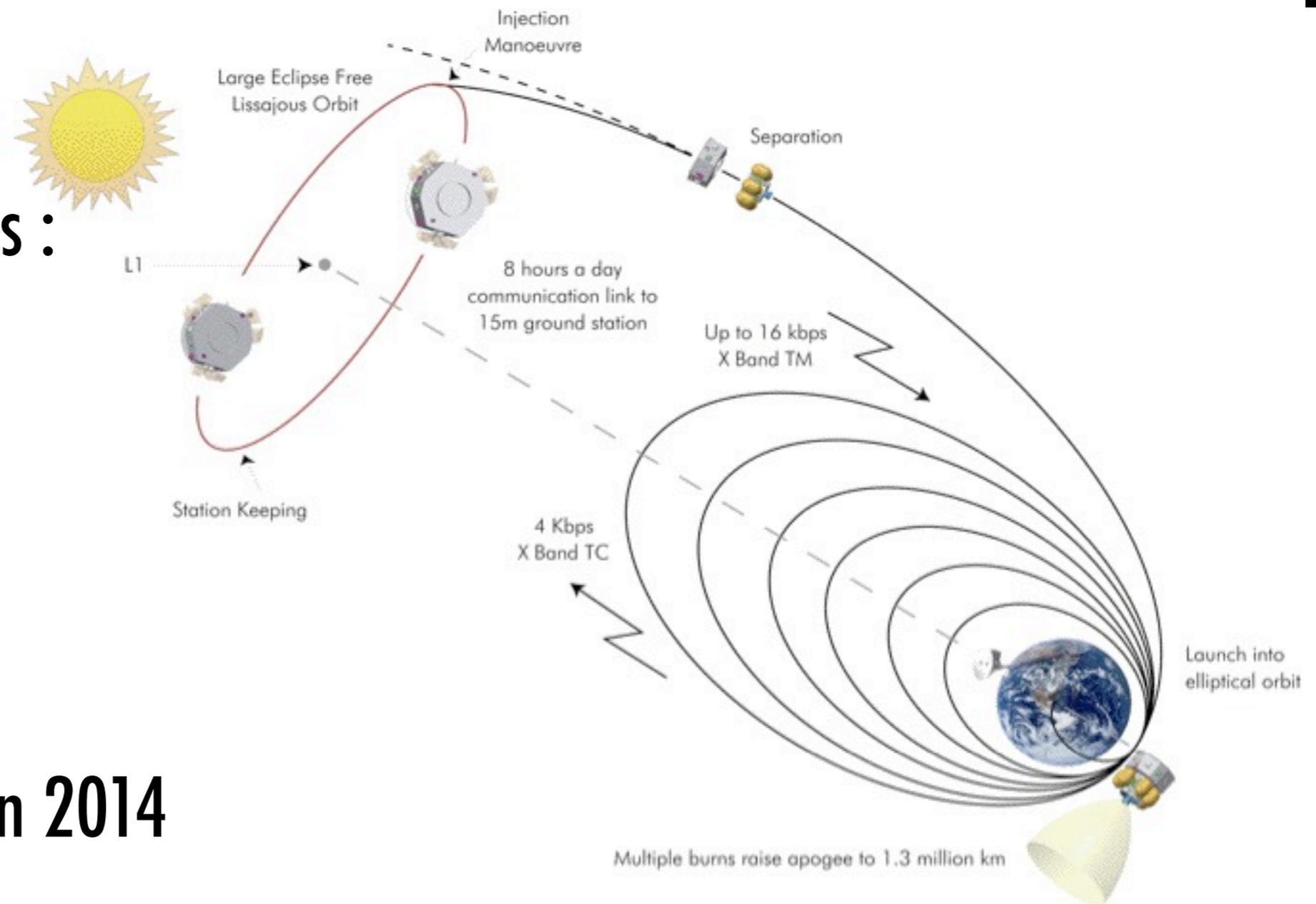
# LISA Pathfinder : lancement et orbite

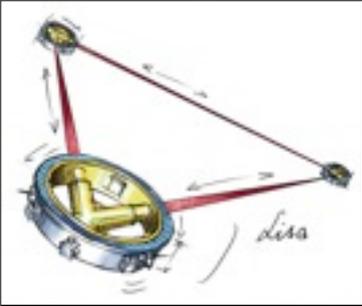
- [ Position choisie (si lanceur VEGA): point de Lagrange L1 (système Terre-Soleil)
- [ Alternative : lanceur Rockot et HEO

## Pays collaborateurs :

- France
- Allemagne
- Italie
- Pays-Bas
- Espagne
- Suisse
- Royaume Uni
- Etats-Unis

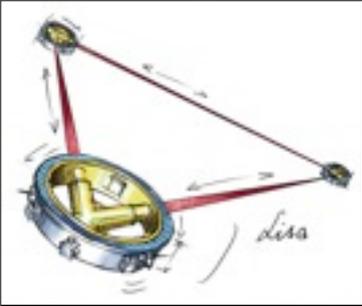
Lancement prévu en 2014



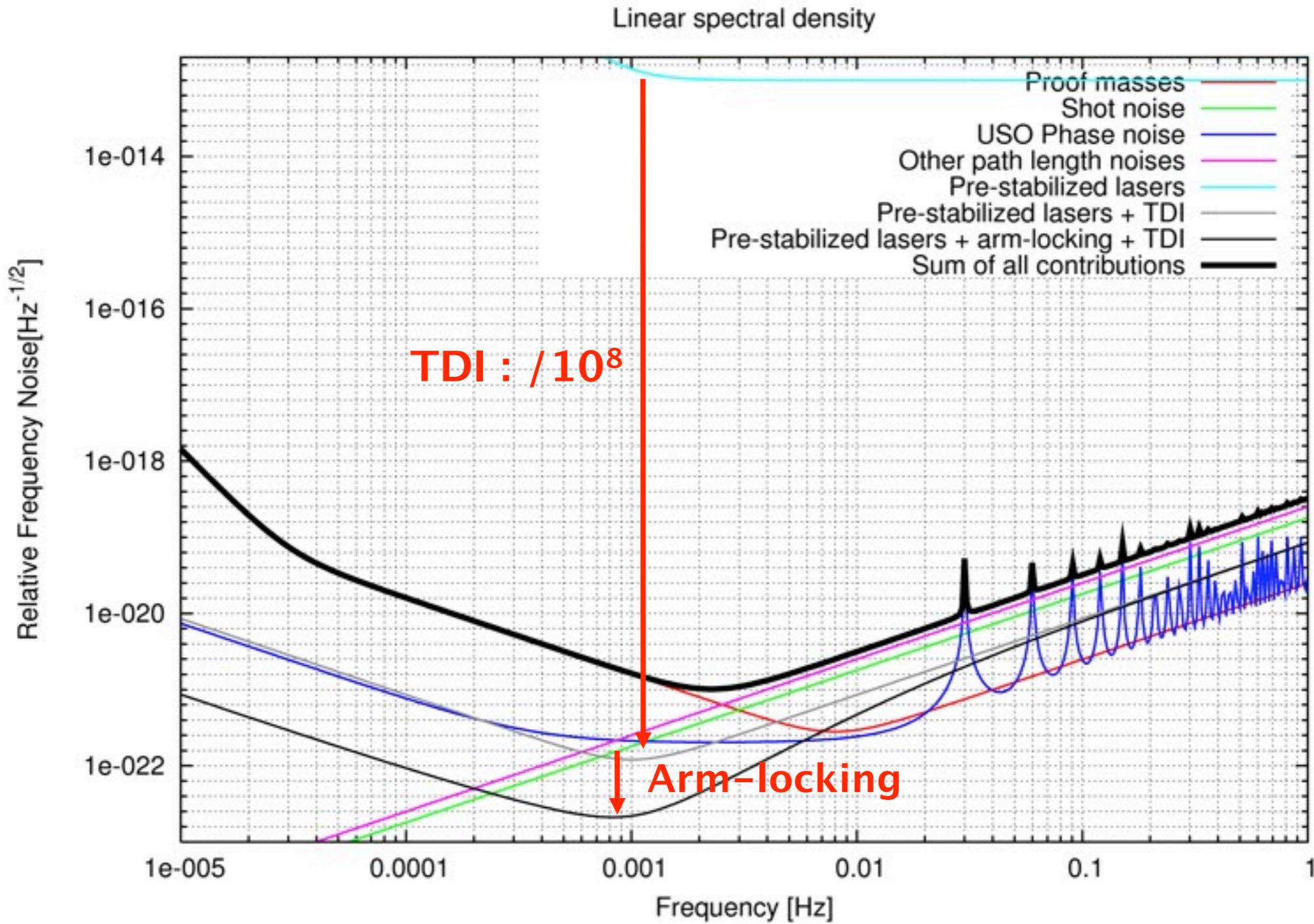


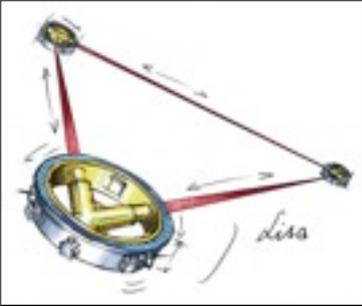
# LISA et LISA Pathfinder

- [ Points technologiques du projet LISA vérifiés sur LISA Pathfinder (en gras) :
  - Masses inertielles sans perturbation externe :
    - **Contrôle de compensation de traînée du satellite**
    - **Micro-propulseurs à faible bruit de poussée**
    - **Distance de garde importante, masses lourdes et système de verrouillage**
    - **Haute stabilité des commandes électriques**
    - **Neutralisation sans contact de la charge résiduelle des masses**
    - **Stabilité thermo-mécanique du satellite**
    - **Annulation du champ gravitationnel interne dû au satellite**
  - Interférométrie de précision, mesures *locales* inter-masses et masse-satellite :
    - **résolution pm en distance, sub-mrad pour les alignements optiques**
    - **assemblages optiques monolithiques de grande stabilité**
  - Mesures de précision inter-satellites :
    - *Phasemètre de haute résolution*
    - *Stabilisation de fréquence de hautes performances*
    - *Mise à poste de la constellation*
    - **Précision des algorithmes de contrôle d'attitude**



# Budget de bruits pour LISA





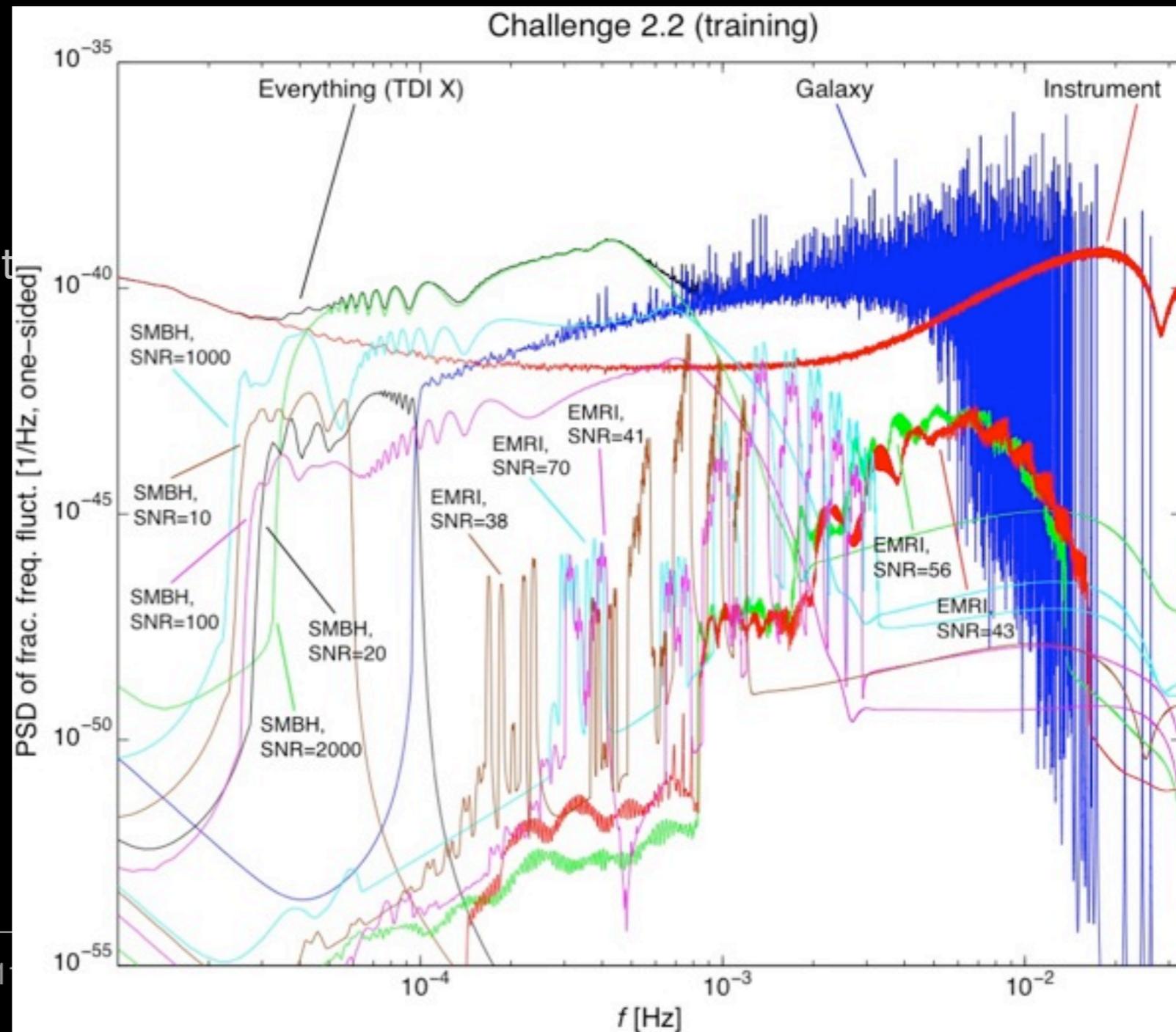
# Préparation à l'analyse de données LISA

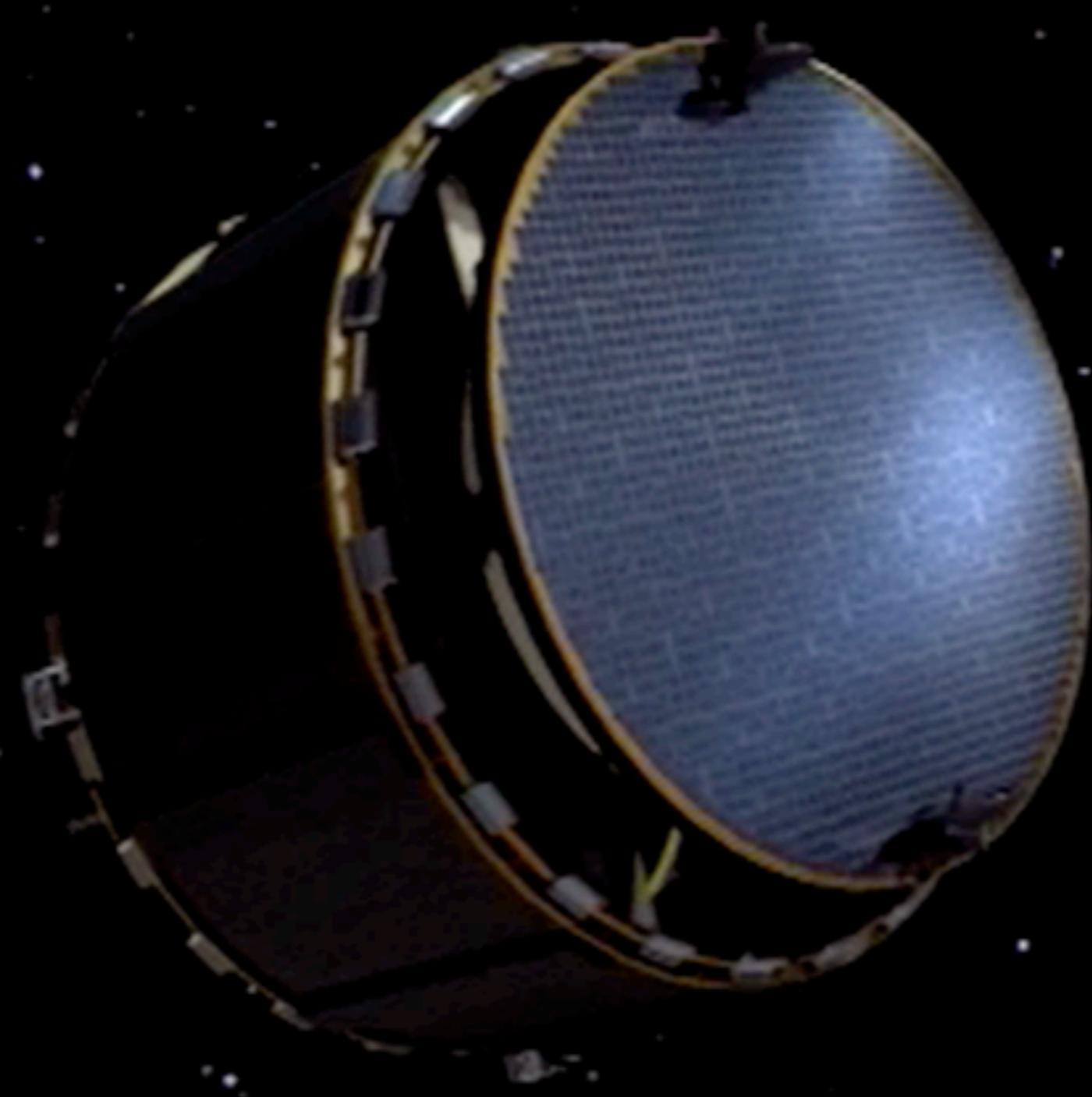
- Mock LISA Data Challenges (MLDC)
  - génération de données simulées (sources et détecteur) par 3 simulateurs indépendants
  - analyse 'en aveugle' et comparaison aux paramètres entrés

- Jusqu'à aujourd'hui :
  - premier jeu de données en 2006
  - 6 'challenges' publiés jusqu'à présent
  - en ce moment : round 4 ...

- Méthode d'analyse la plus répandue : filtrage adapté

Challenge 2.2 : spectre de puissance pour 2 ans de données →

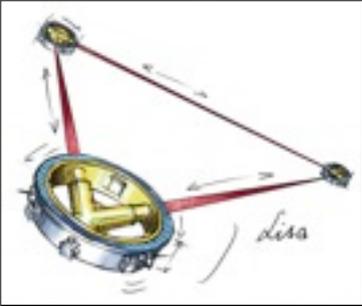




Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik



H



# Conclusions

- [ L'étude des ondes gravitationnelles ouvre une 'nouvelle fenêtre' de détection
  - en astrophysique (objets compacts, évolutions stellaire et galactique, etc.)
  - en physique fondamentale (gravité en champ fort p.ex.)
  - et probablement un peu d'inattendu ...
- [ Un ensemble de détecteurs se met en place pour couvrir une très large bande spectrale (du nHz au kHz)
  - La prochaine décennie devrait voir la première détection directe au sol
  - LISA à partir de 2020
- [ LISA repose sur plusieurs développements technologiques innovants
  - constellations de satellites en vol inertiel
  - mesures interférométriques de haute précision
  - contrôle des différents bruits de mesure de phase
- [ LISA Pathfinder permettra de tester ces technologies en conditions réelles
  - performance de la compensation de trainée
  - précision des mesures de distance
  - fiabilité des micropropulseurs