



**Lisa, Lisa Pathfinder et la détection des Ondes  
Gravitationnelles depuis l'Espace**

E.Plagnol et toute l'équipe de l'APC, Paris

# Lisa, Lisa Pathfinder et la détection des Ondes Gravitationnelles depuis l'Espace

E.Plagnol et toute l'équipe de l'APC, Paris

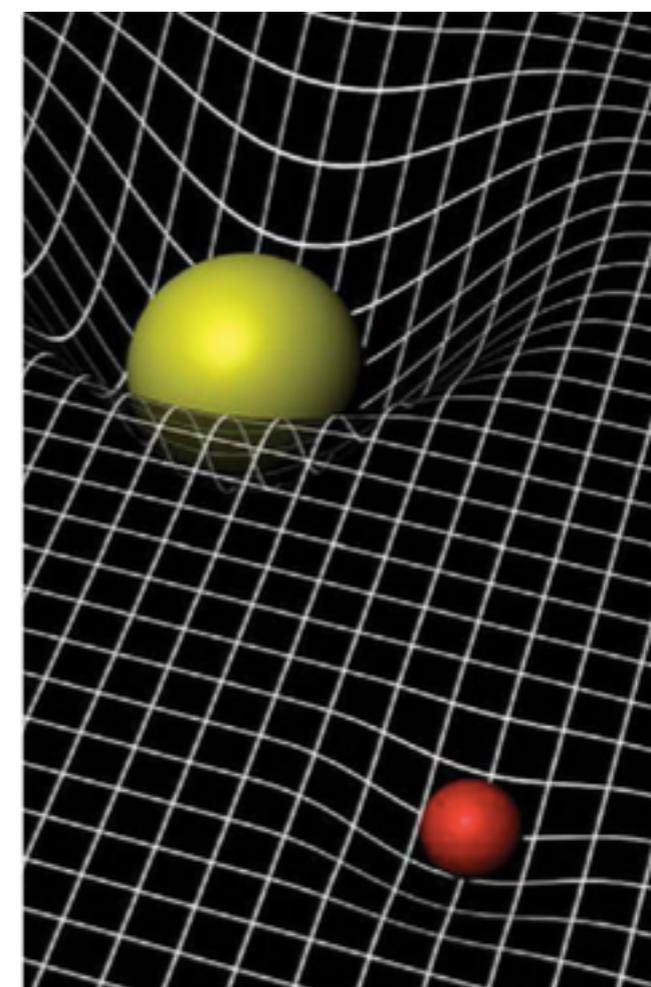
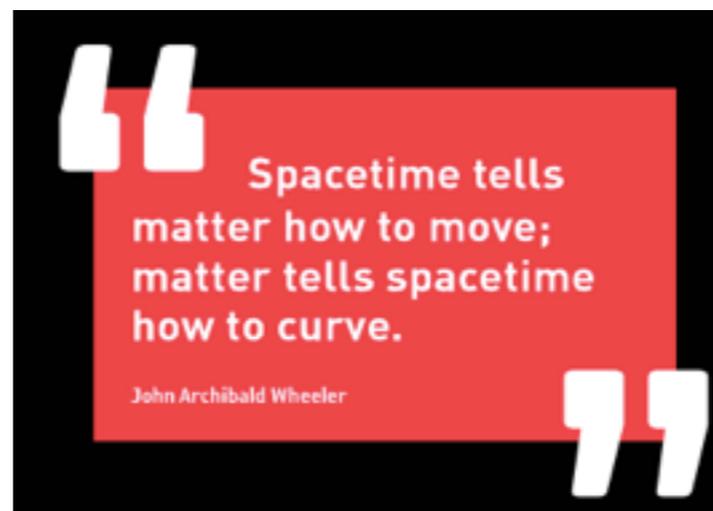
- Les Ondes Gravitationnelles (OG)
- L'Observation des Ondes Gravitationnelles
- La détection par Ligo/Virgo
- Les Sources d'Ondes Gravitationnelles
- L'Observation depuis l'Espace :
  - La mission LISA
  - Le programme de physique de Lisa
  - Qu'est-ce que l'on apprend ?
- LISA Pathfinder : La Chute Libre dans l'Espace.
- Le Consortium Lisa et les prochaines étapes.



Pierre Binétruy



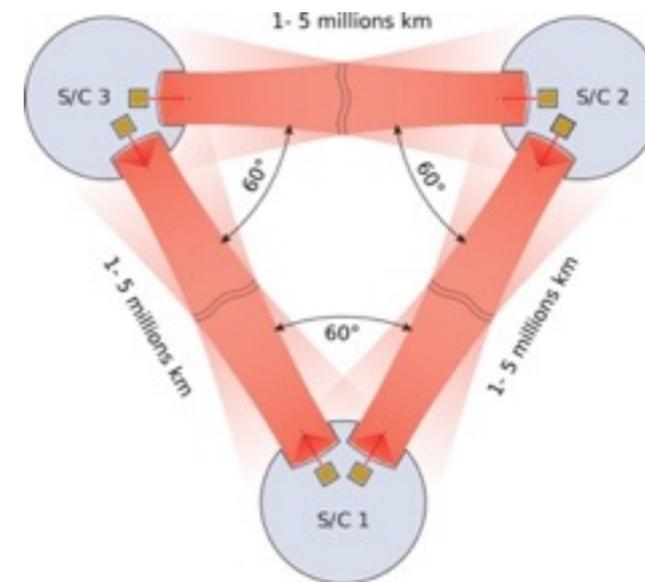
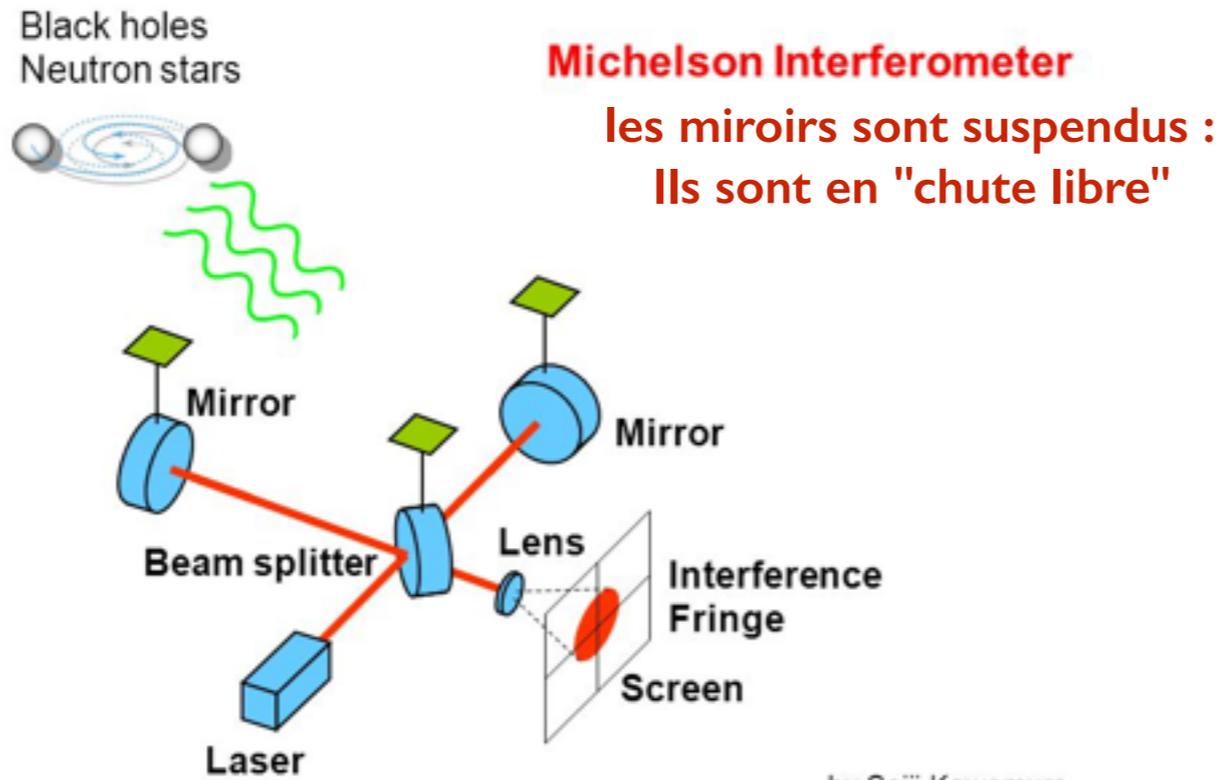
- La théorie d'Einstein explique que:
  - Le mouvement des masses résulte de la topologie de l'Espace-Temps.
  - La topologie de l'Espace-Temps résulte de la présence des masses.
  - L'Espace-Temps n'est pas un milieu rigide, il évolue à cause du mouvement des masses.
- On nomme Ondes Gravitationnelles les déformations temporelles de l'Espace-Temps.
  - Elle peuvent être quasi-périodique,
  - Elle peuvent être "stochastiques",
  - Elle peuvent être "aléatoires".
- Comment sont-elles caractérisées ?
  - Leur "amplitude/intensité",
  - Leur "spectre fréquentiel",
  - La nature des déformations qu'elles provoquent (polarisation)
  - Pour certaines, leur direction de provenance.





- On observe les Ondes Gravitationnelles à travers la déformation de l'Espace qu'elles provoquent.
- Comme la vitesse de la lumière est invariante, la déformation de l'Espace est mesurée par une modification du "temps de vol" de la lumière (laser) entre deux points qui sont en "chute libre", c'est-à-dire qui suivent des géodésiques,
- La plupart des détecteurs utilisent l'interférométrie de Michelson.

## Detection of GW by an interferometer



15/Dec./2015

Jamboree @ Amsterdam Sciencepark

2



# Un Exemple : La Coalescence (fusion) de Trous Noirs

Un "Trou Noir" est défini par sa **Masse** et son **Spin** ( $Q = 0$  ?)

Soit un **système binaire** : 2 TN orbitant l'un autour de l'autre

$d(t)$  = distance entre les TN ;  $r$  = distance à l'observateur ;  $L$  = taille du détecteur

L'amplitude détectée ("strain")  $h \sim \left( \frac{GM_{TOT}}{c^2} \right)^2 \left( \frac{1}{d \times r} \right) = \frac{\Delta L}{L} \sim 10^{-21}$

La fréquence

$$f_{GW} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{GM_{TOT}}{d^3}} \approx 3.7 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{M_{TOT}}{1M_{\odot}}} \left( \sqrt{\frac{d}{10^{13}m}} \right)^{-3} \text{ Hz}$$

$$M_{TOT} = 3 \times 10^6 M_{\odot} \text{ and } d \sim 7 \text{ horizon} \rightarrow f_{GW} = 1 \text{ mHz}$$

2 Polarisations :



polarisation X



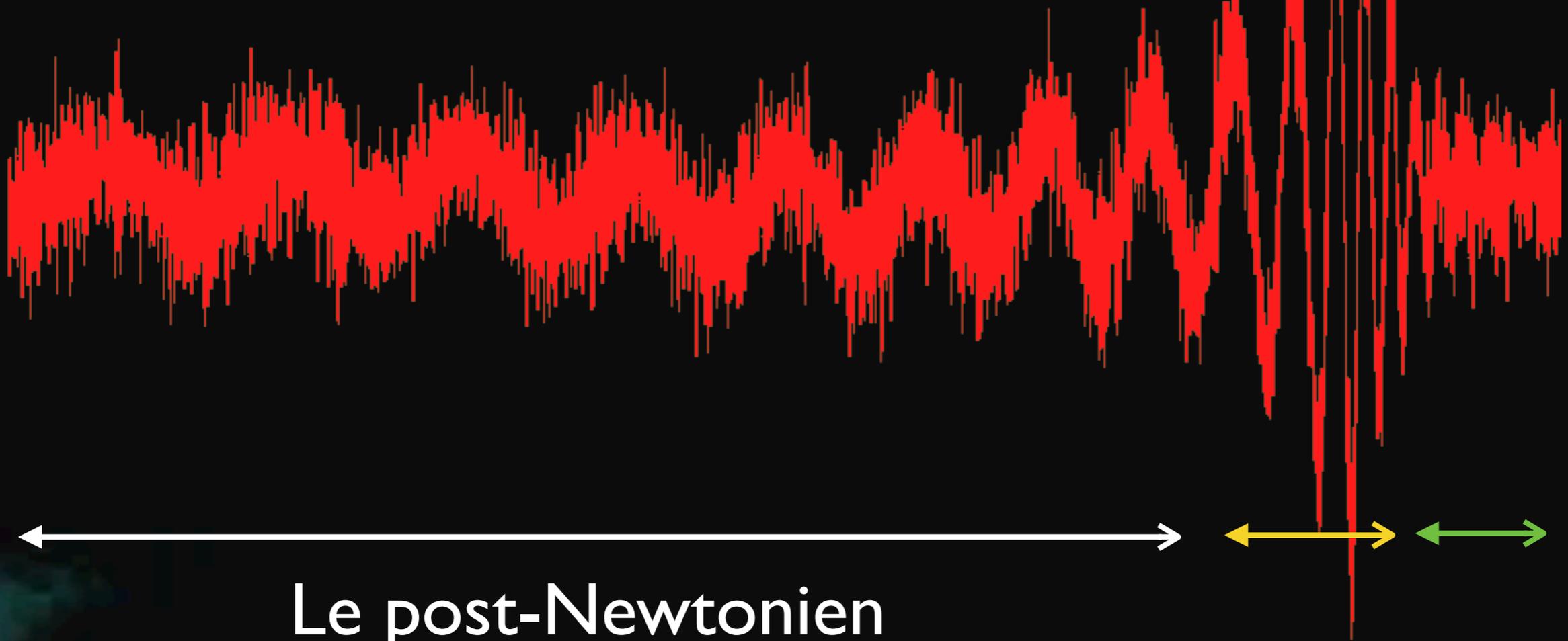
polarisation +

$$M(1+z) = 2 \times 10^6 M$$

$$m_1/m_2 = 2$$

$$\text{spin} : S_1 = 0.6 \ S_2 = 0.55$$

$$z = 5 (\sim 8 \text{ Ma})$$



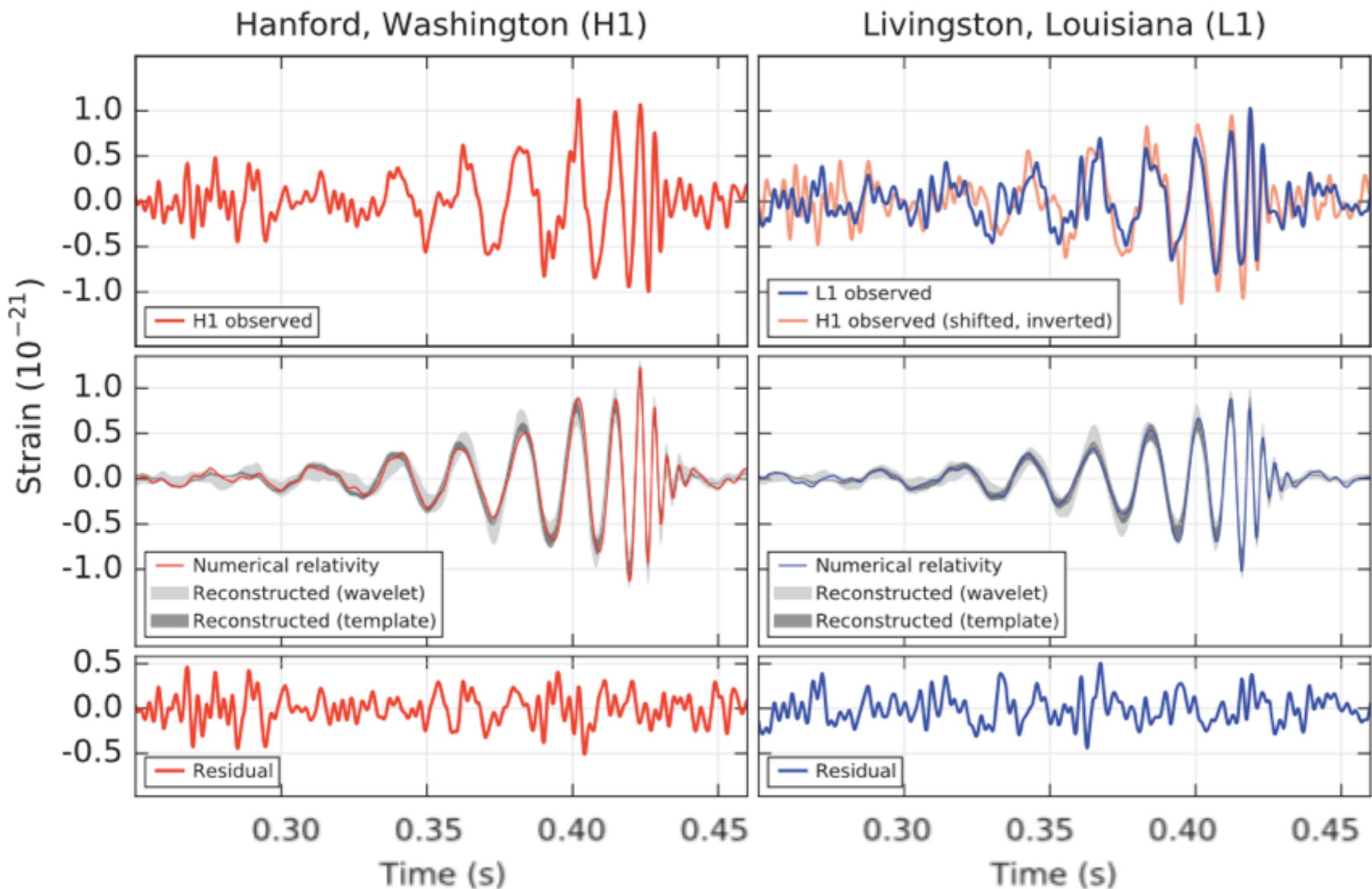
Le post-Newtonien

La Coalescence

Le "Ring Down"

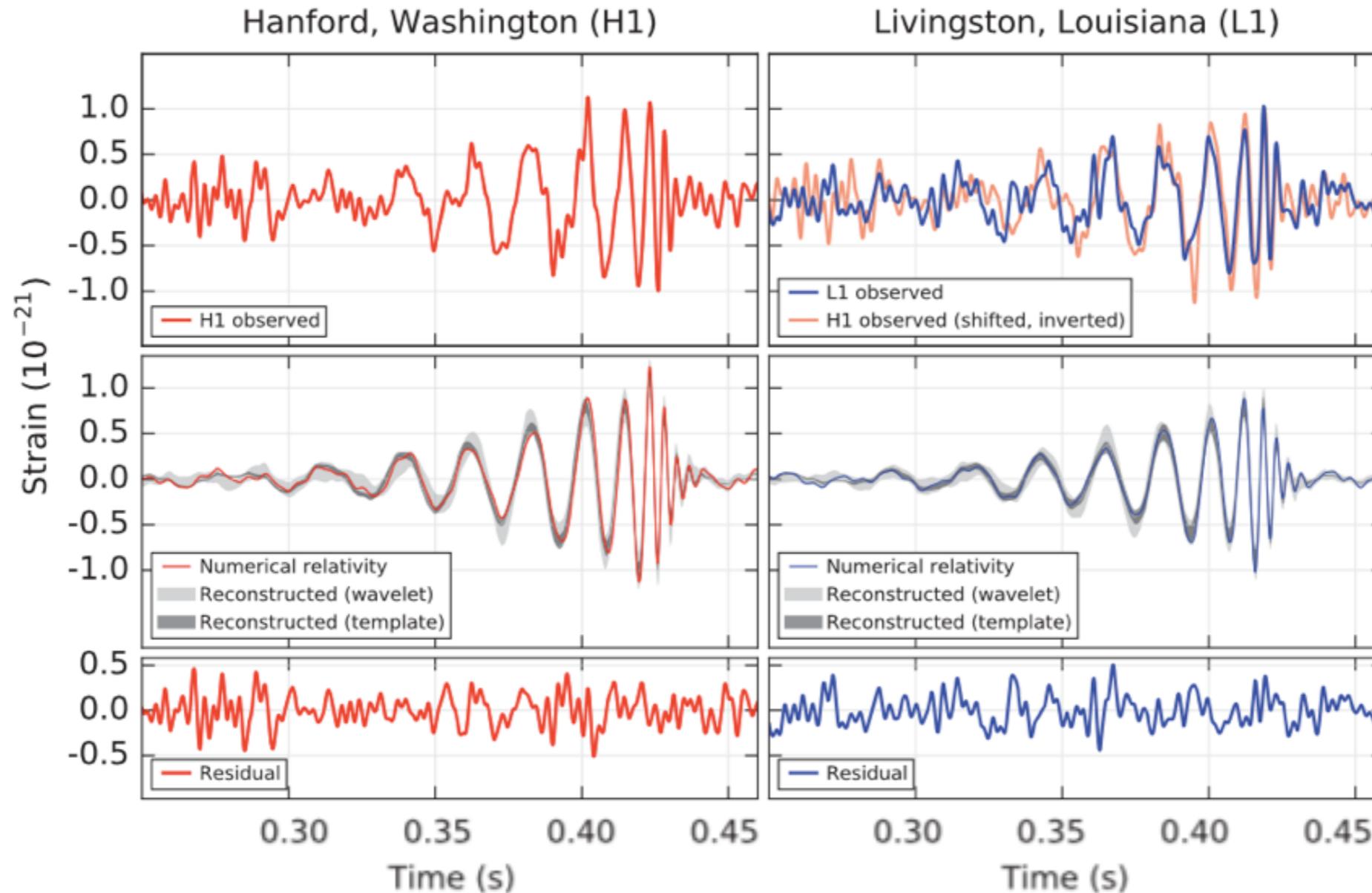


# La Première Observation d'une Onde Gravitationnelle ! LIGO-Virgo, le 14 septembre 2015





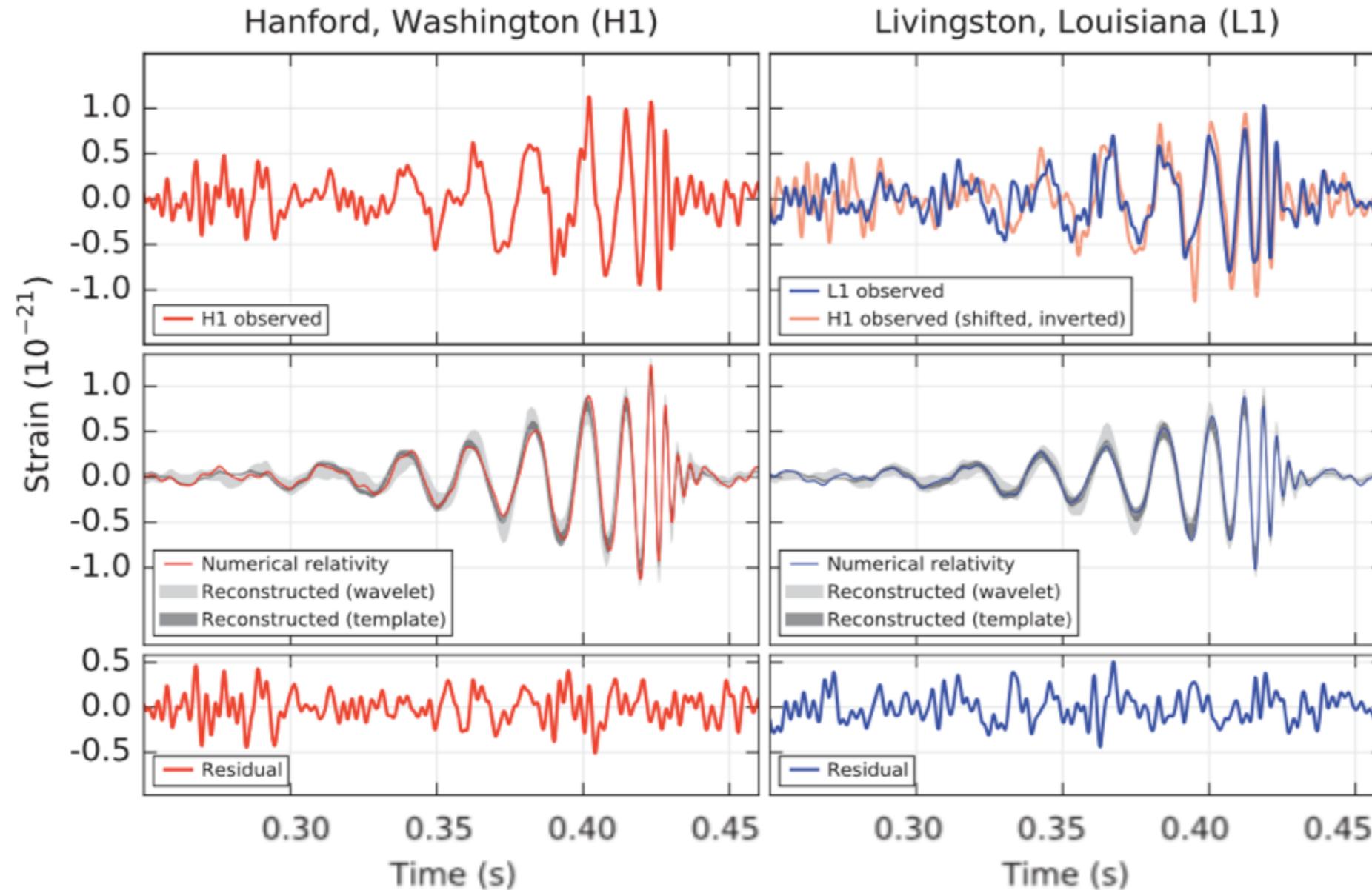
# La pureté du signal



- Le signal est exactement ce qui est attendu !
- Il est décrit par une dizaine de paramètres !
- La longueur du voyage (1.3 milliards d'années) n'a rien perturbé



# Les Masses des Trous Noirs



- L'analyse du signal indique que :

$$m_1 = 36 \pm 5 M_s ; m_2 = 29 \pm 4 M_s ; M_{\text{finale}} = 62 \pm 4 M_s$$

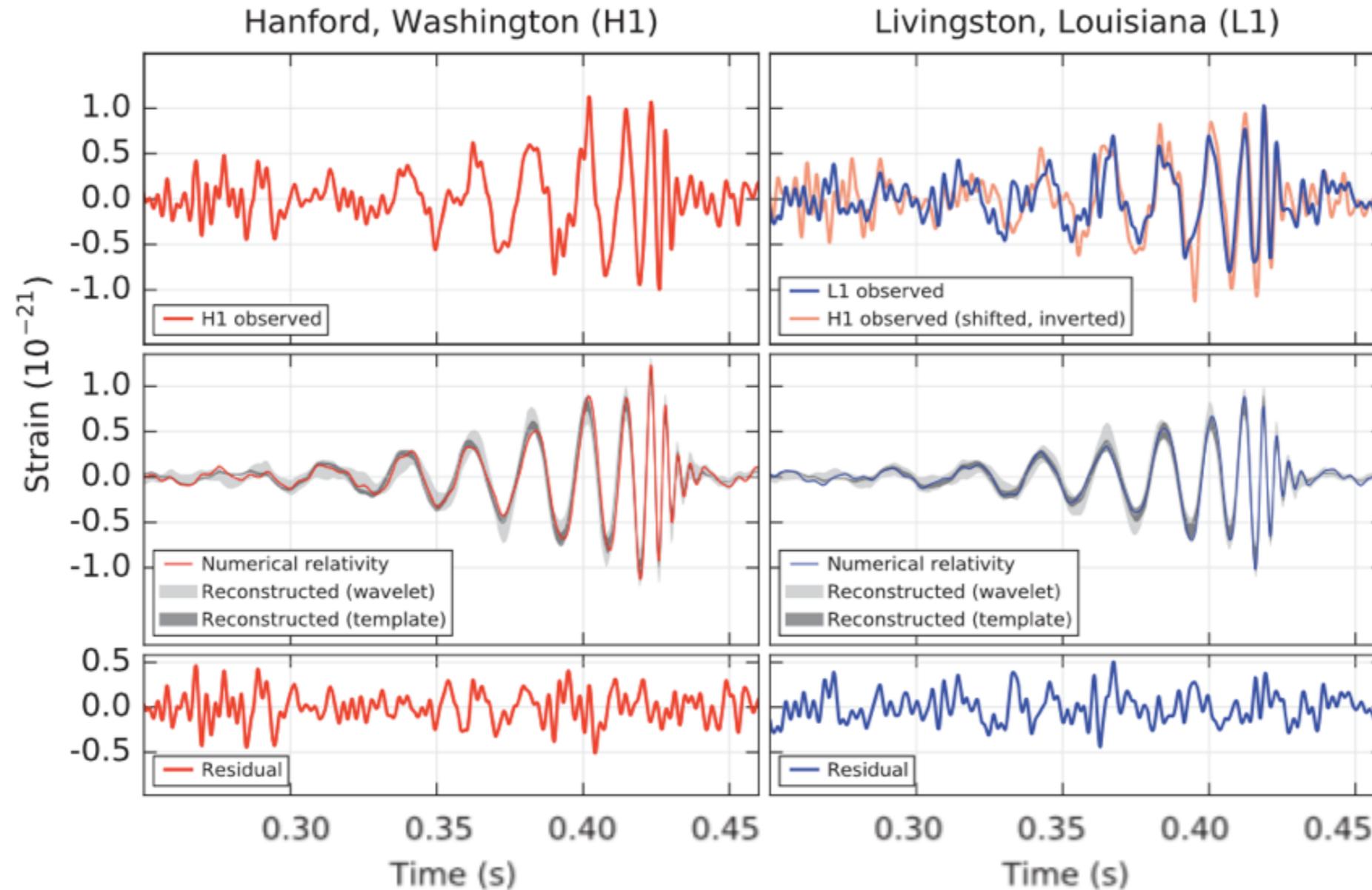
$$\Delta E \approx 3 \pm 0.5 M_s$$

$$\Delta E \approx 5.4 \cdot 10^{47} \text{ J} \approx 5 \text{ 000 SN}$$

LLR



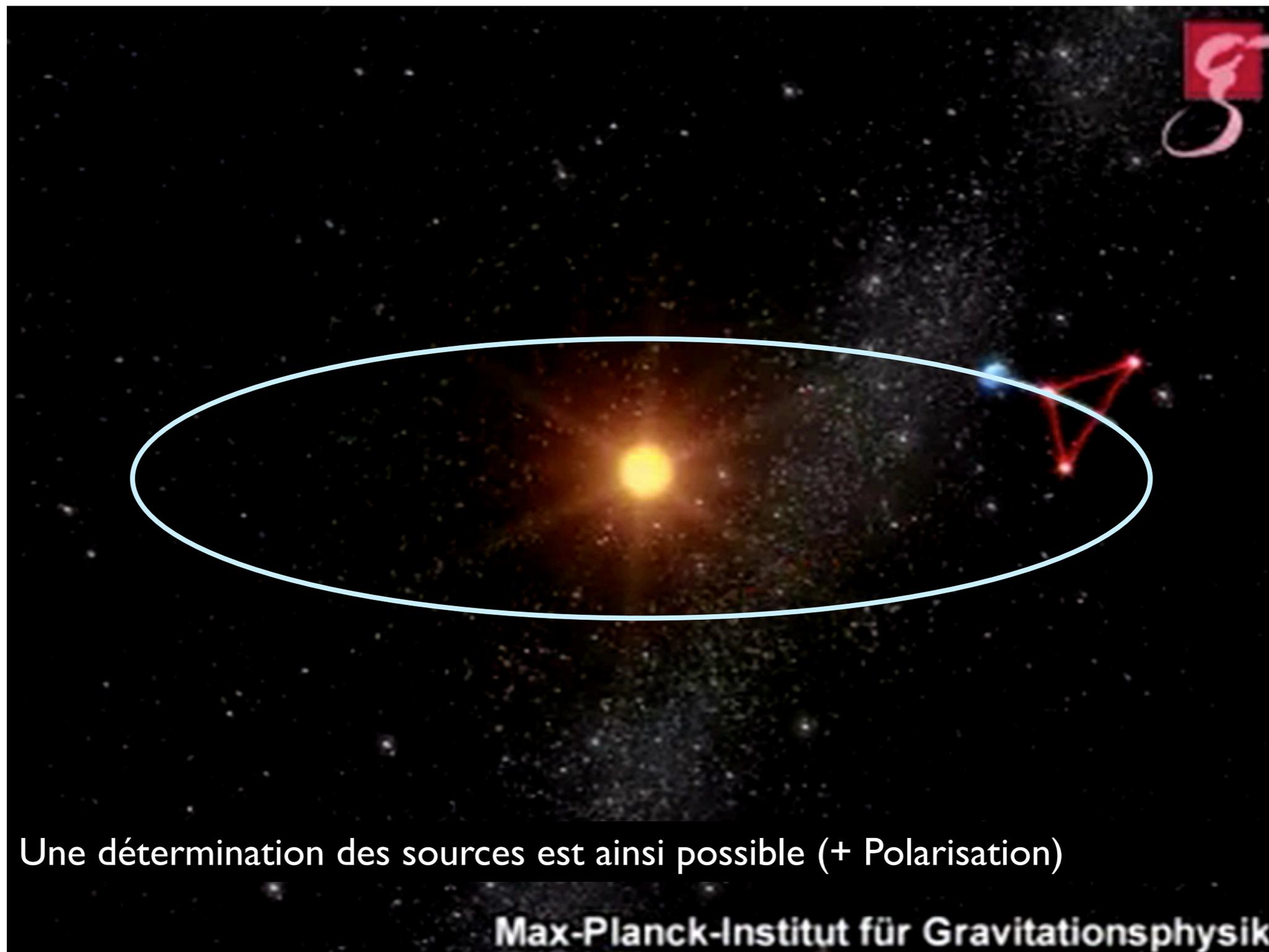
# Quoi d'autres ?



- La durée du signal  $\approx 0.15$  secondes :  **$d \approx 100$  km ;  $v \approx 0.5c$  !!**
- La fréquence de ce type d'événements  $\approx 10$  / ans
- Ce type de sources était tout à fait inattendu !!
- L'observation des OG nous réserve, déjà, bien des surprises !

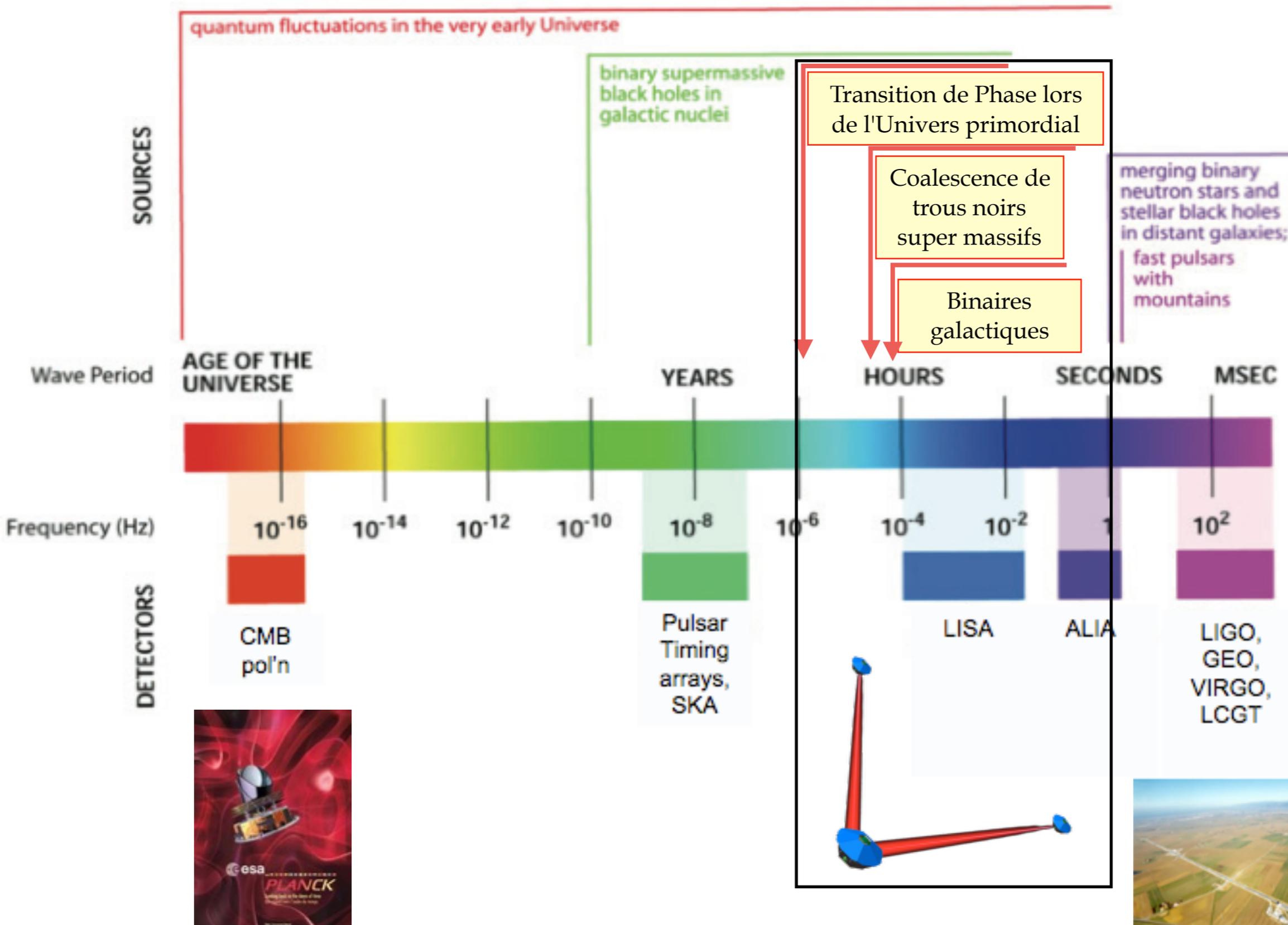


# L'Observation depuis l'Espace : la Mission Lisa





# Les Sources Visibles par LISA

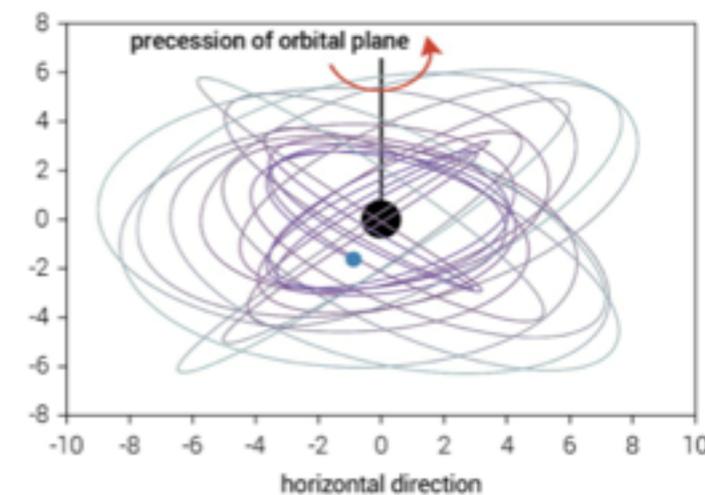
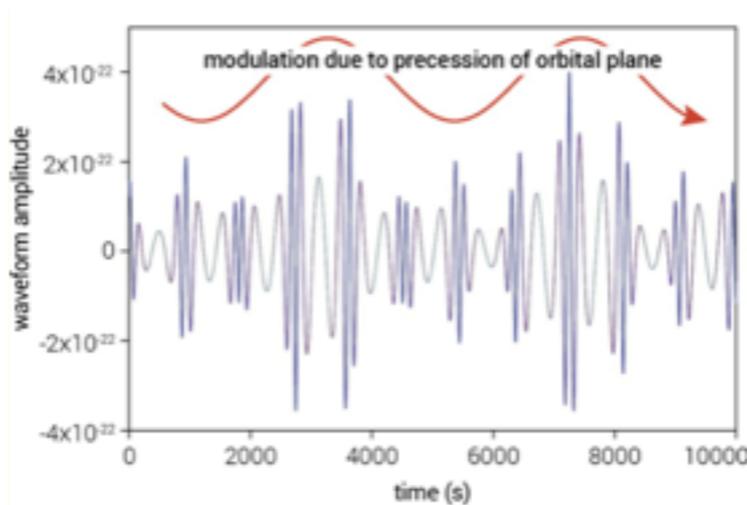
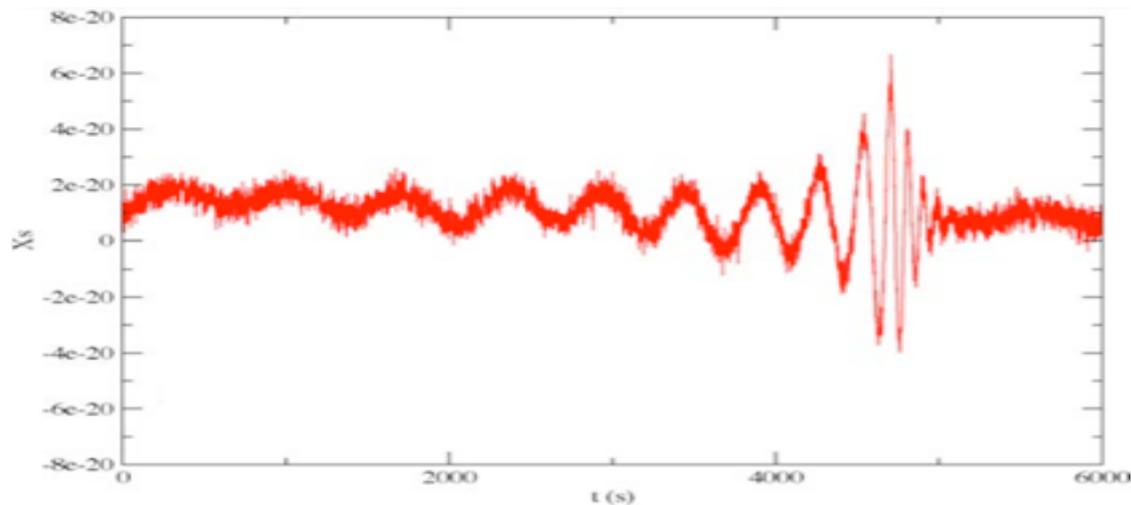
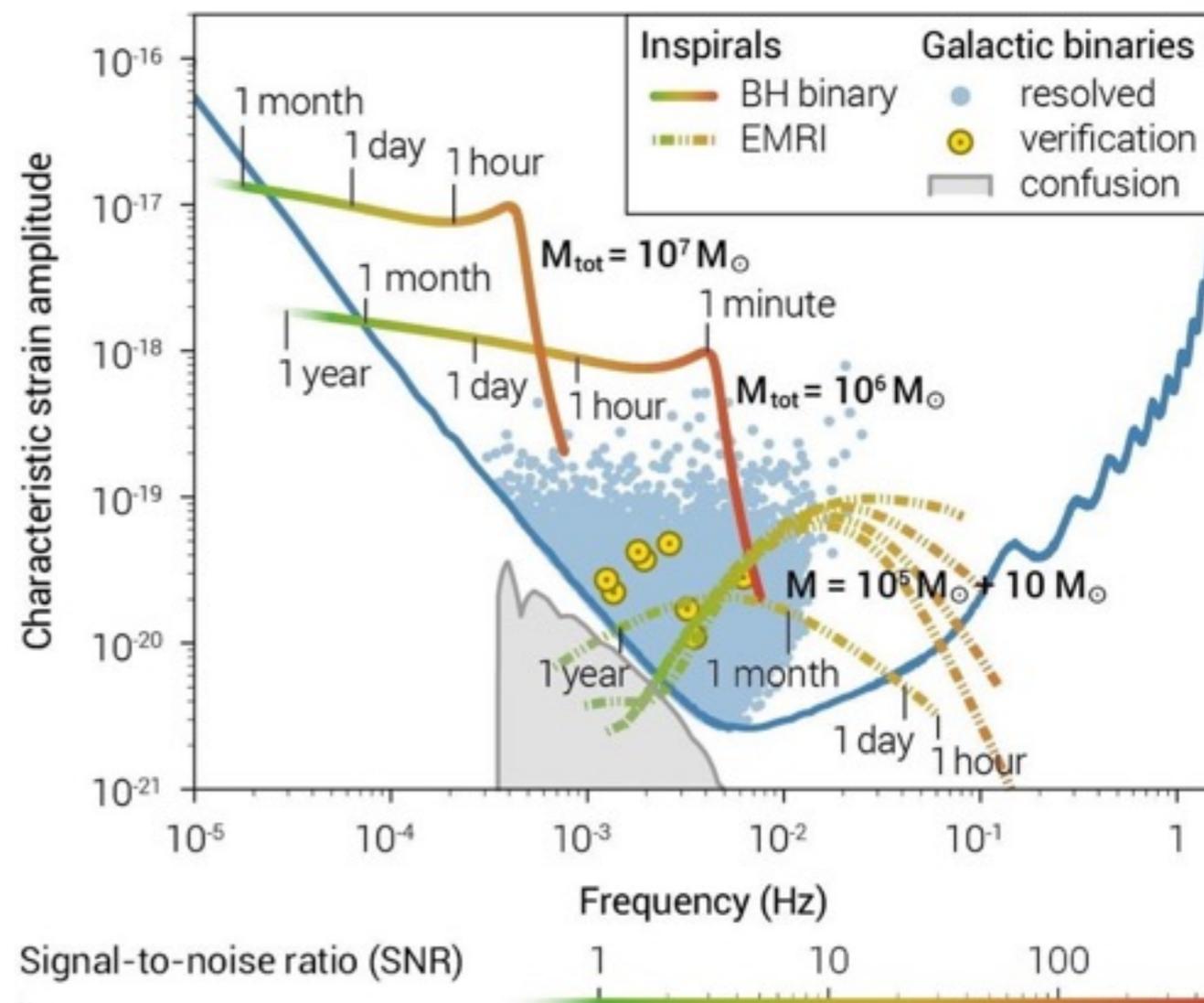




# Les Sources Visibles par LISA

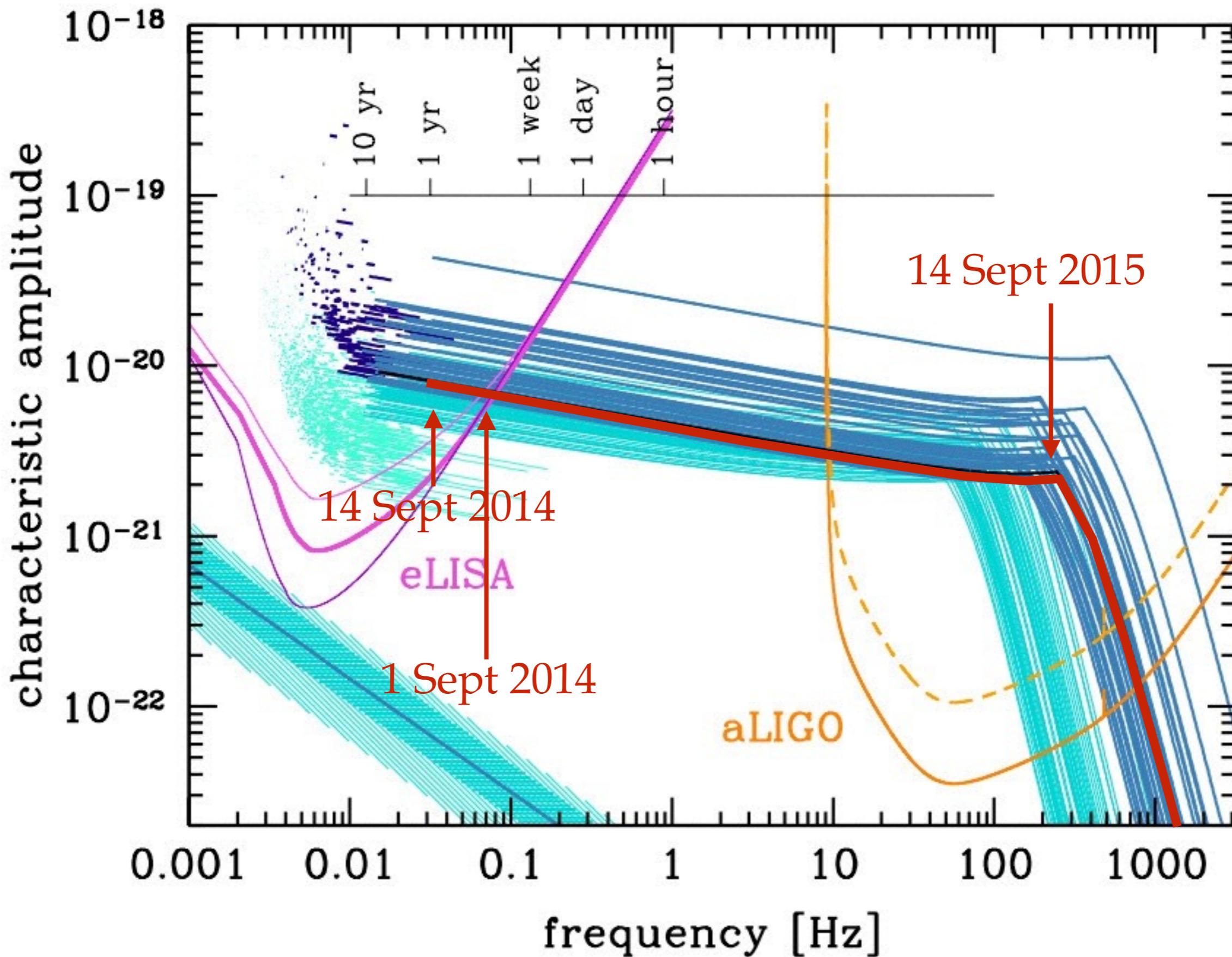


- **Binaires Galactiques** : Un fond de  $\sim 3000$  sources dans notre galaxie.
- 7 **binaires de vérification** , plus avec Gaia.
- Les binaires de LIGO-Virgo
- Les binaires massifs (**MBHB**) : rapport de masses  $\approx 0.1-10$  (10-100/year ?)
- Les EMRI (**Extreme Mass Ratio Inspiral**) : rapport de masses  $\approx 10^4-10^6$  (5-50/year ?)
- **Les OG Cosmologiques**: inflation, transition de phase après le Big Bang,...
- + ?





# LISA et les Sources de LIGO-Virgo





# Les Objectifs Scientifiques : une sélection...

Les coalescences de trous noirs super massifs : 10 à 100 par an  
Les EMRI : 5 à 50 par an  
Les Binaires Galactique : 3000 résolus individuellement

La gravité se propage-t-elle à la vitesse de la lumière ?  
Le graviton a-t-il une masse ?  
Il y a-t-il plus que deux états de polarisation ?  
Les trous noirs ont-ils vraiment un horizon (no hair theorem) ?  
La RG suffit-elle à décrire les trous noirs ?

A quel époque sont apparus les premiers trous noirs ?  
Quelle était leur masse et leur spin ?  
Comment les trous noirs évoluent-ils : coalescence ou accrétion ?

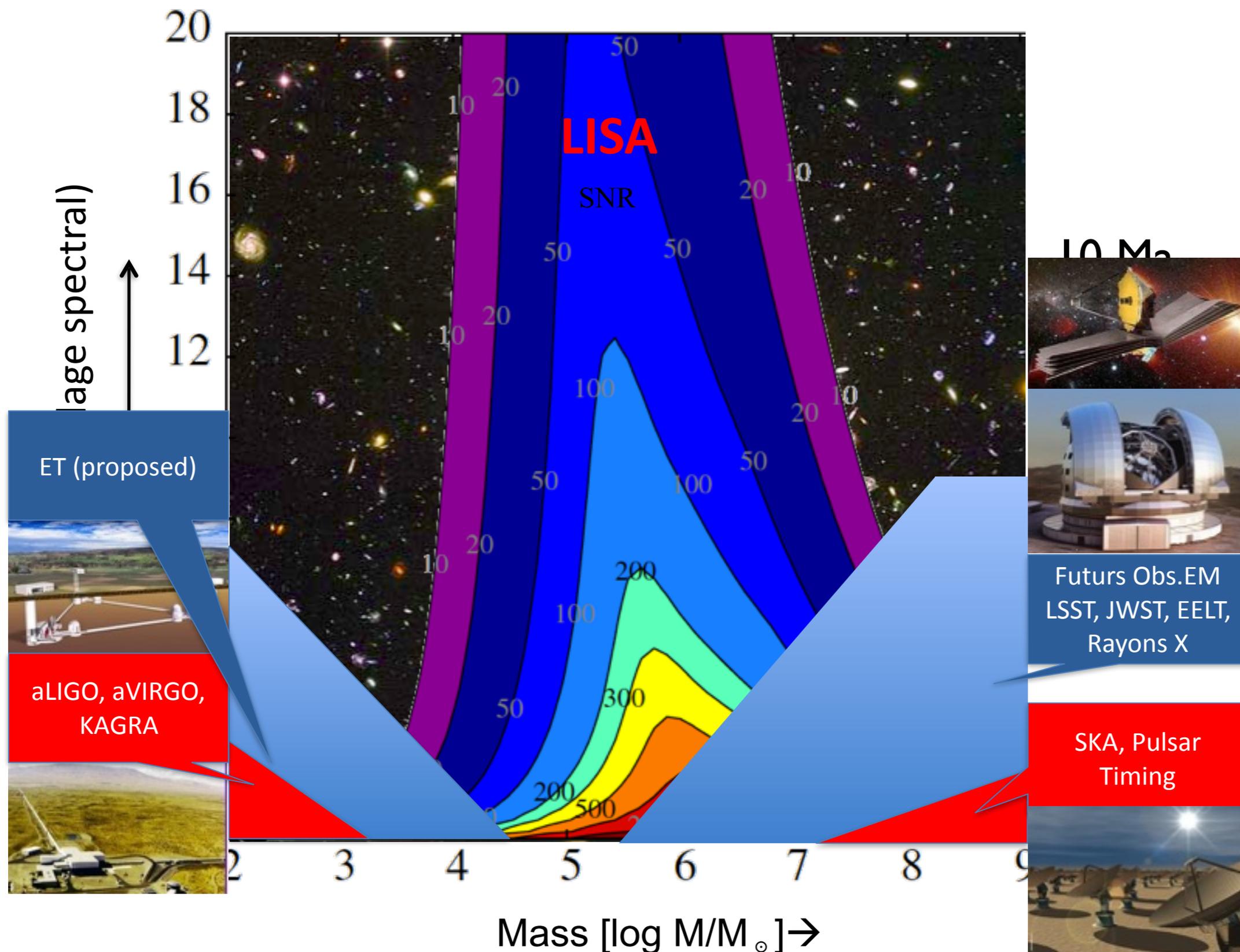
Combien il y a-t-il de binaires compactes dans la galaxie  
Comment sont-elles réparties dans la Galaxie ?

Existe-t-il des des trous noirs de 100 à 10 000  $M_s$  ?

Peut-on observer des "transitions de phase" peu après le "Big Bang"



# Les Trous Noirs massifs, vus par LISA: Tout l'Univers est visible !

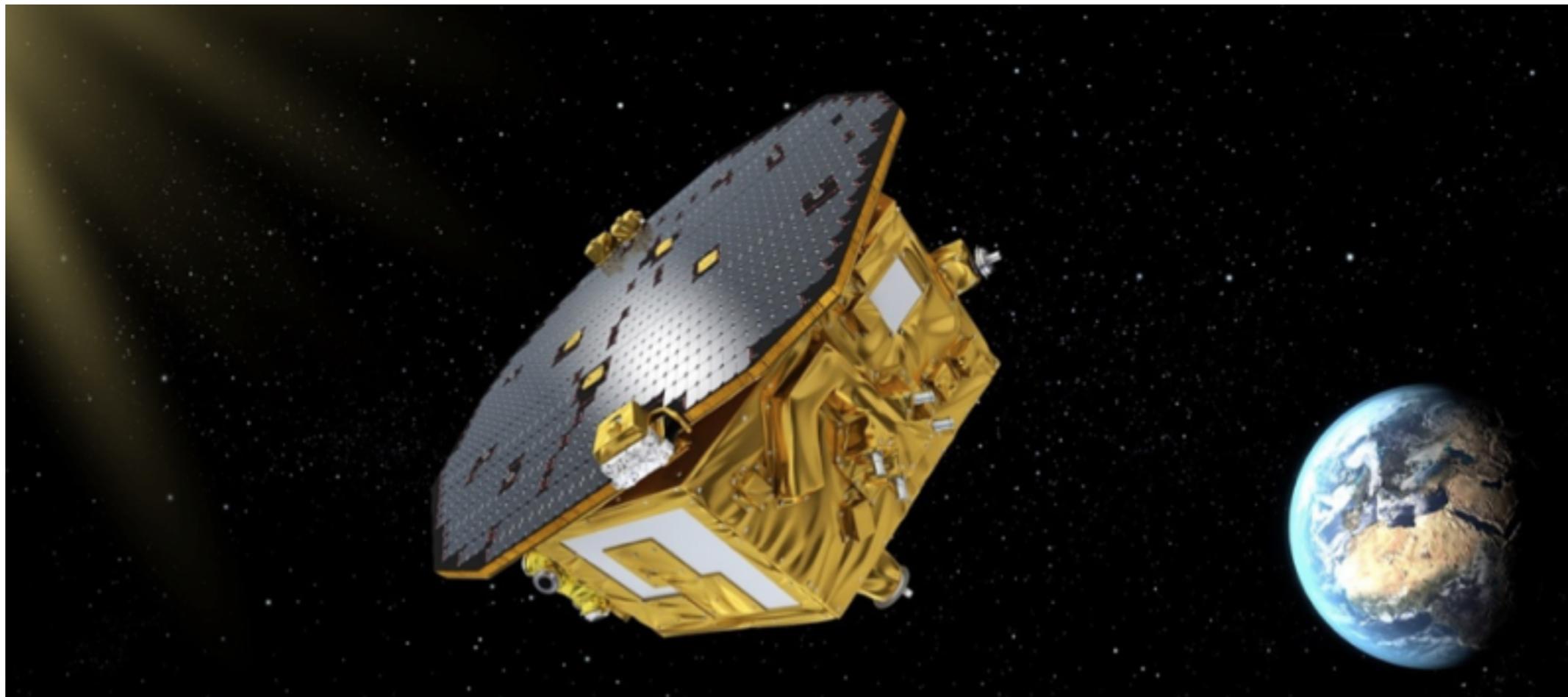




# LisaPathfinder : Un démonstrateur de la "chute libre"



- La détection des OG par LISA repose sur (au moins) deux concepts :
  - Etre capable de maintenir des "**Masses d'Epreuve**" sur des **géodésique** (la chute libre) pendant une durée prolongée (i.e. des jours) avec une accélération relative de  $4 \cdot 10^{-15} \text{ m s}^{-2}$
  - Mesurer la position de ces masses avec une précision du picometre ( $10^{-12} \text{ m}$ )
- La mission LISA Pathfinder devait démontrer cela ... c'est fait !

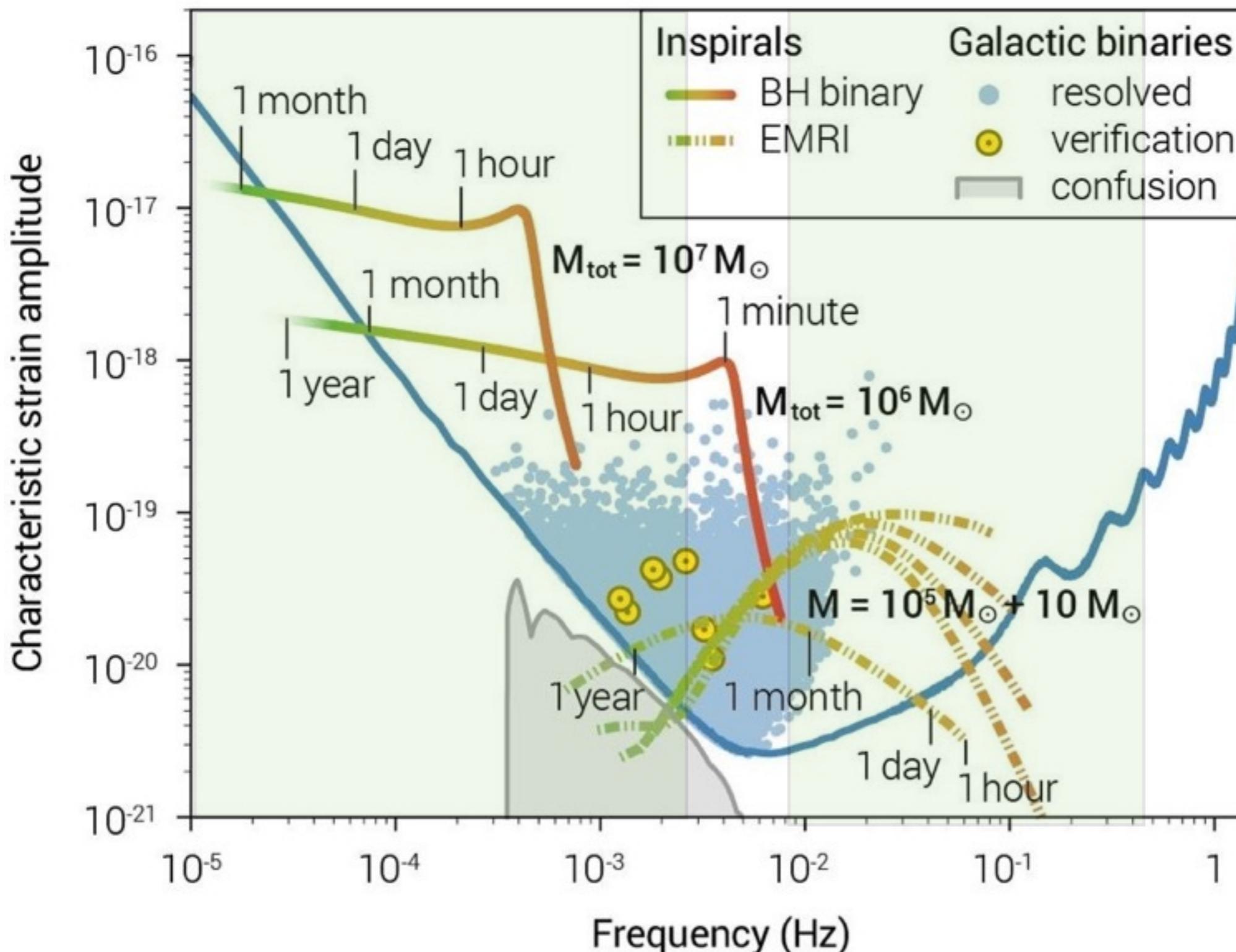




# Pourquoi LISA Pathfinder est un Démonstrateur de LISA

Perturbations local  
Acc parasite TM-SC

Perturbations local  
Performances optiques

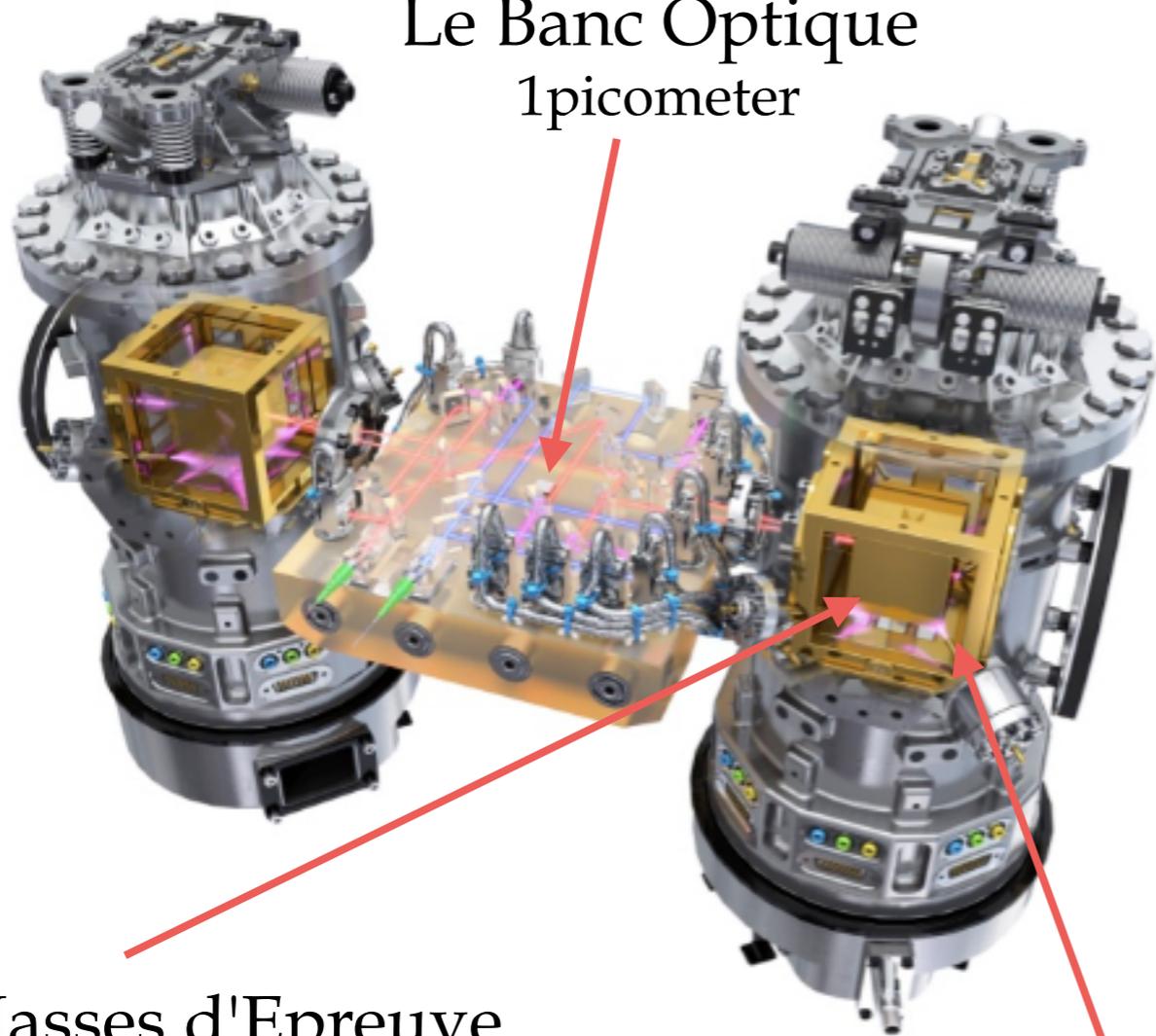




# Lisa Pathfinder : Un démonstrateur Technologique de la "Chute Libre"

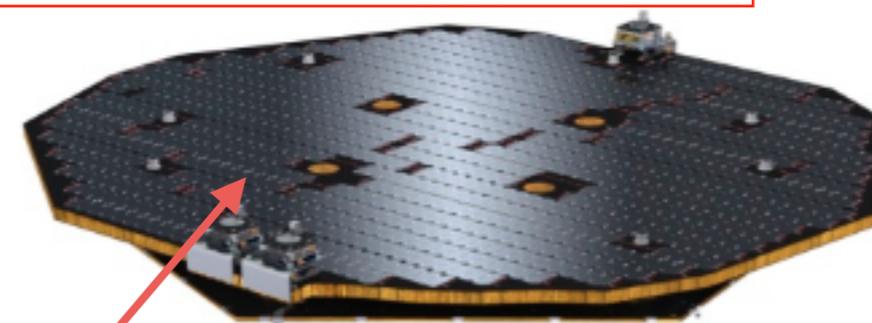
GRS & Optical Bench

Le Banc Optique  
1picometer

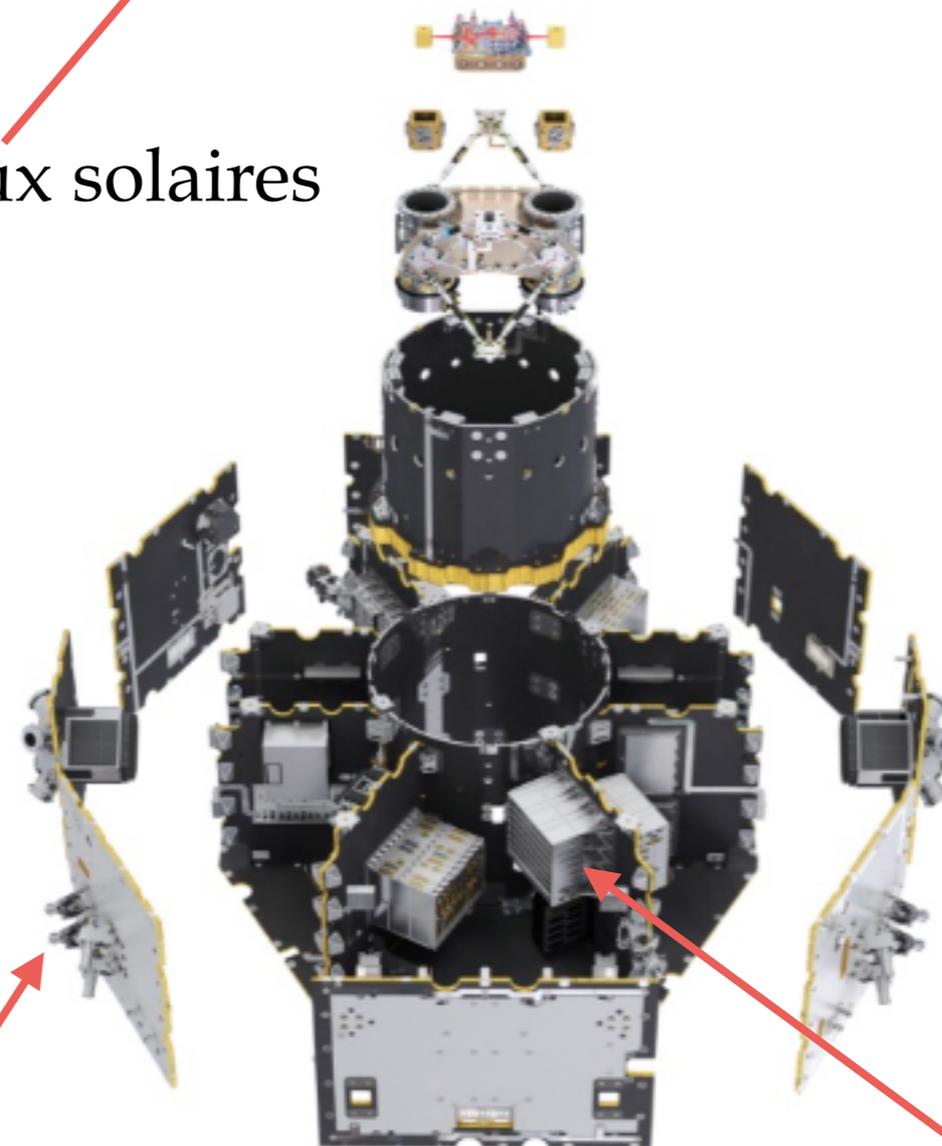


Masses d'Epreuve

Illumination UV



Panneaux solaires



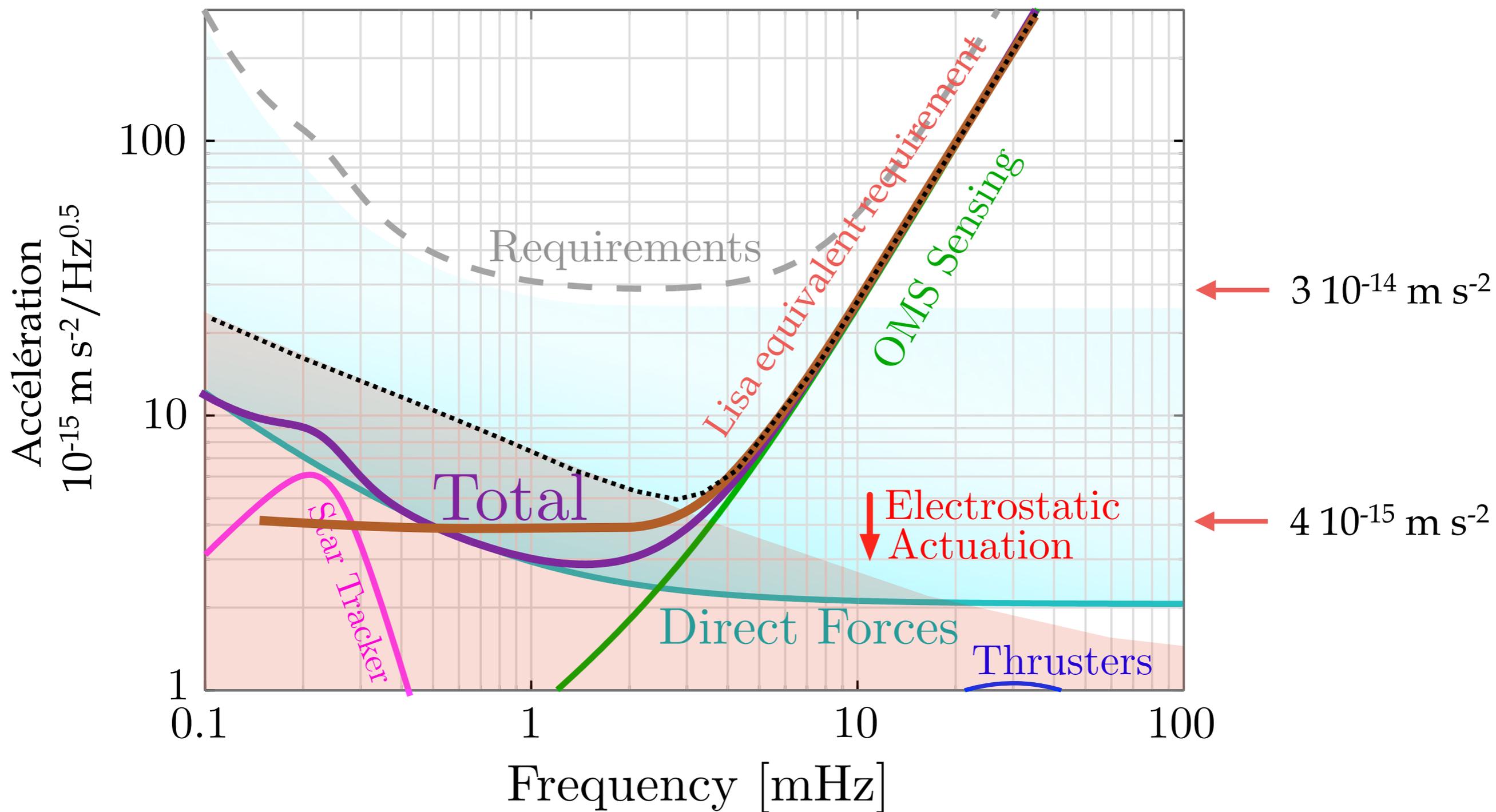
Les micro-propulseurs  
Gaz Froid ( $\mu$ -Newton)

Electronique  
ordinateurs





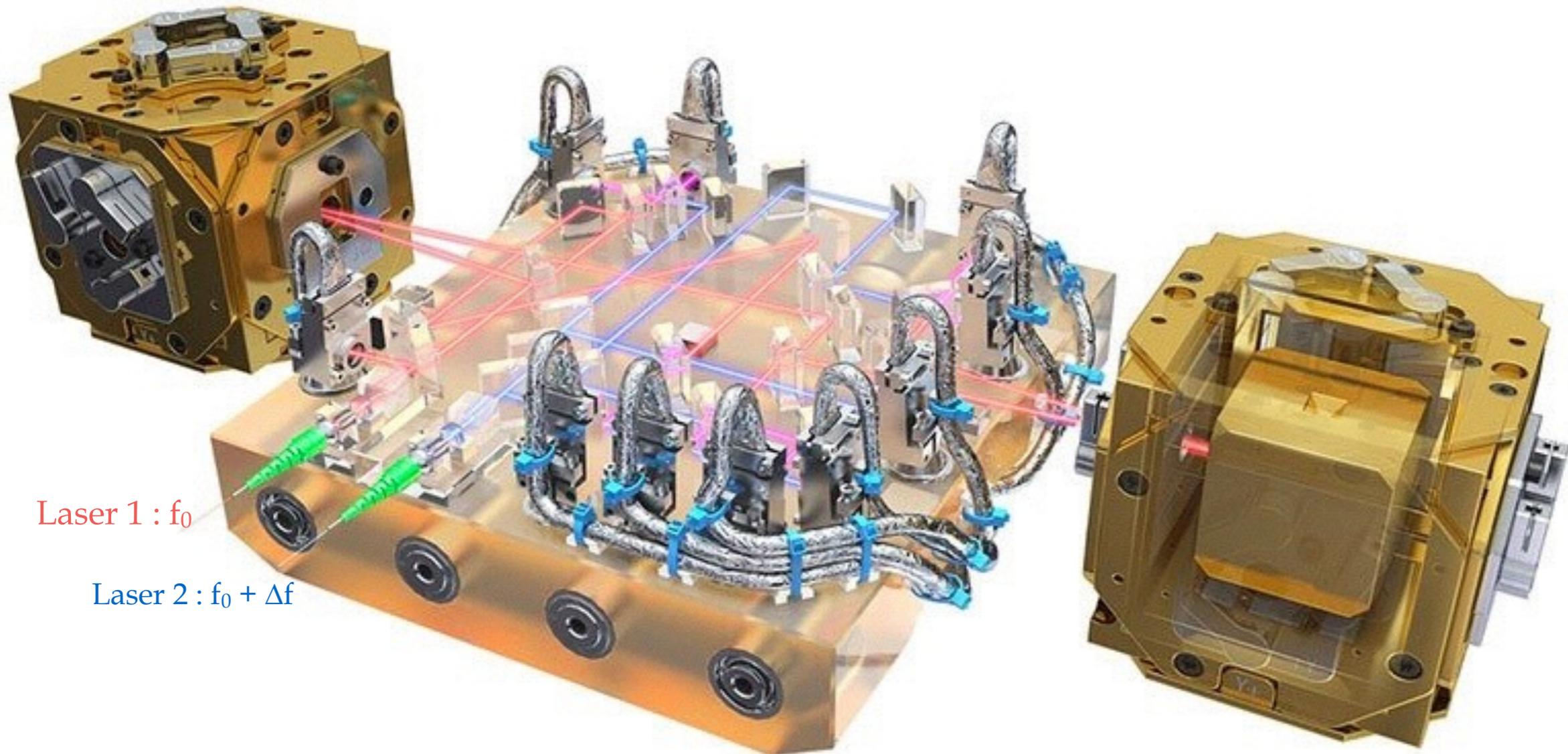
## Bruit d'Accélération entre les deux TM





# Un Exemple : Les Mesures Optiques :

La mesure de la distance entre les TM se fait un via un interféromètre Michelson

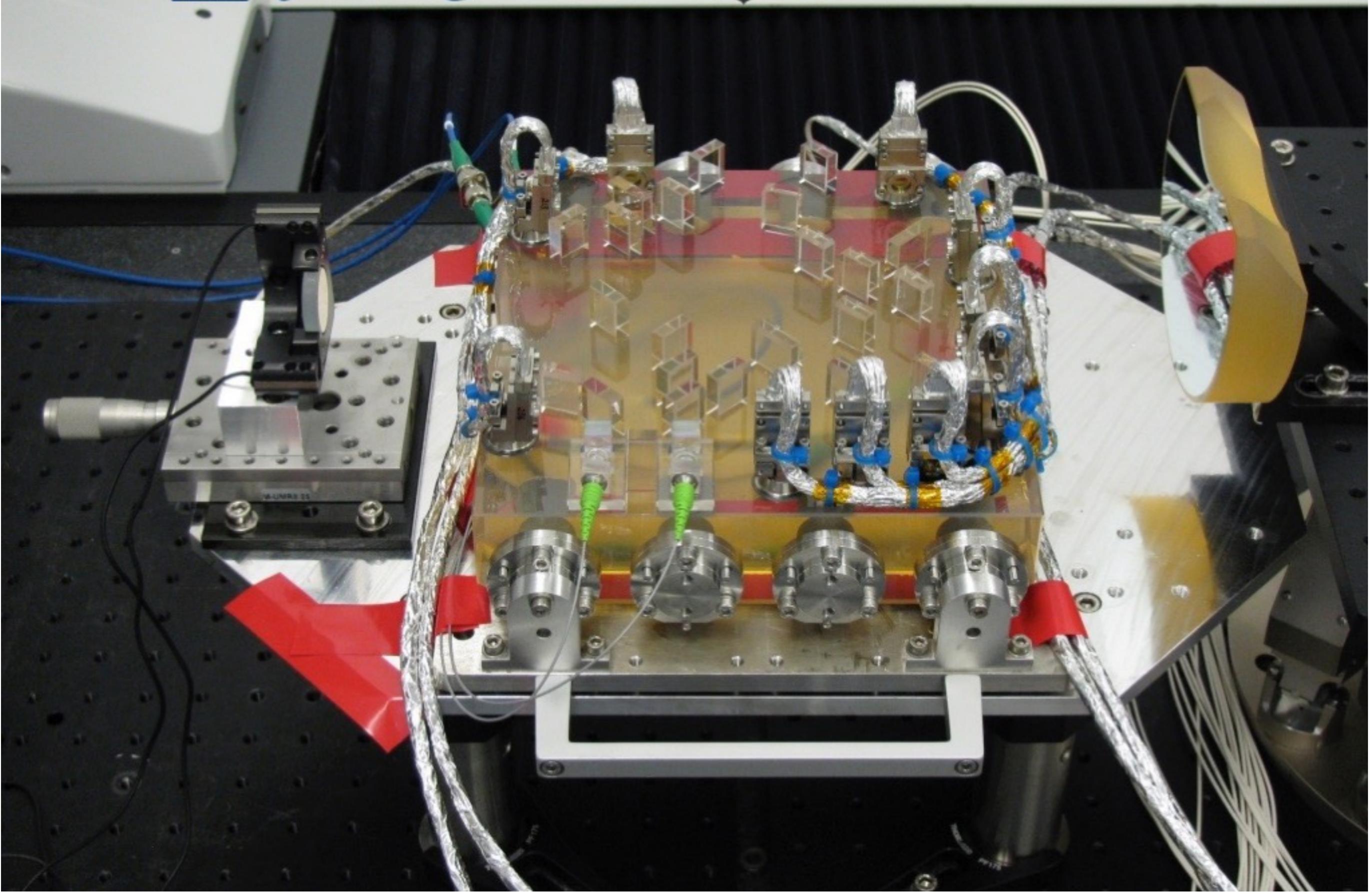




University  
of Glasgow



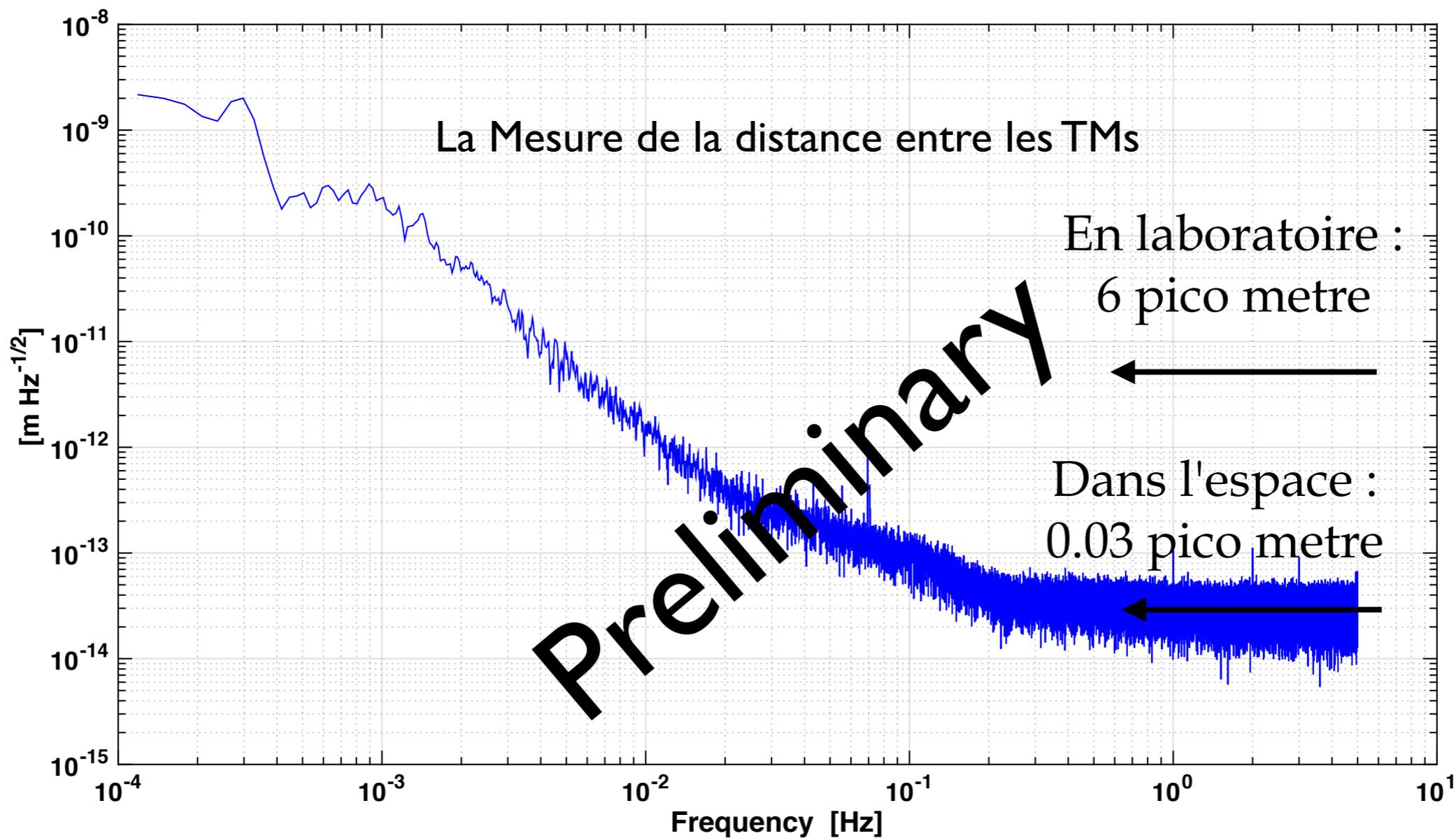
UNIVERSITY OF  
BIRMINGHAM





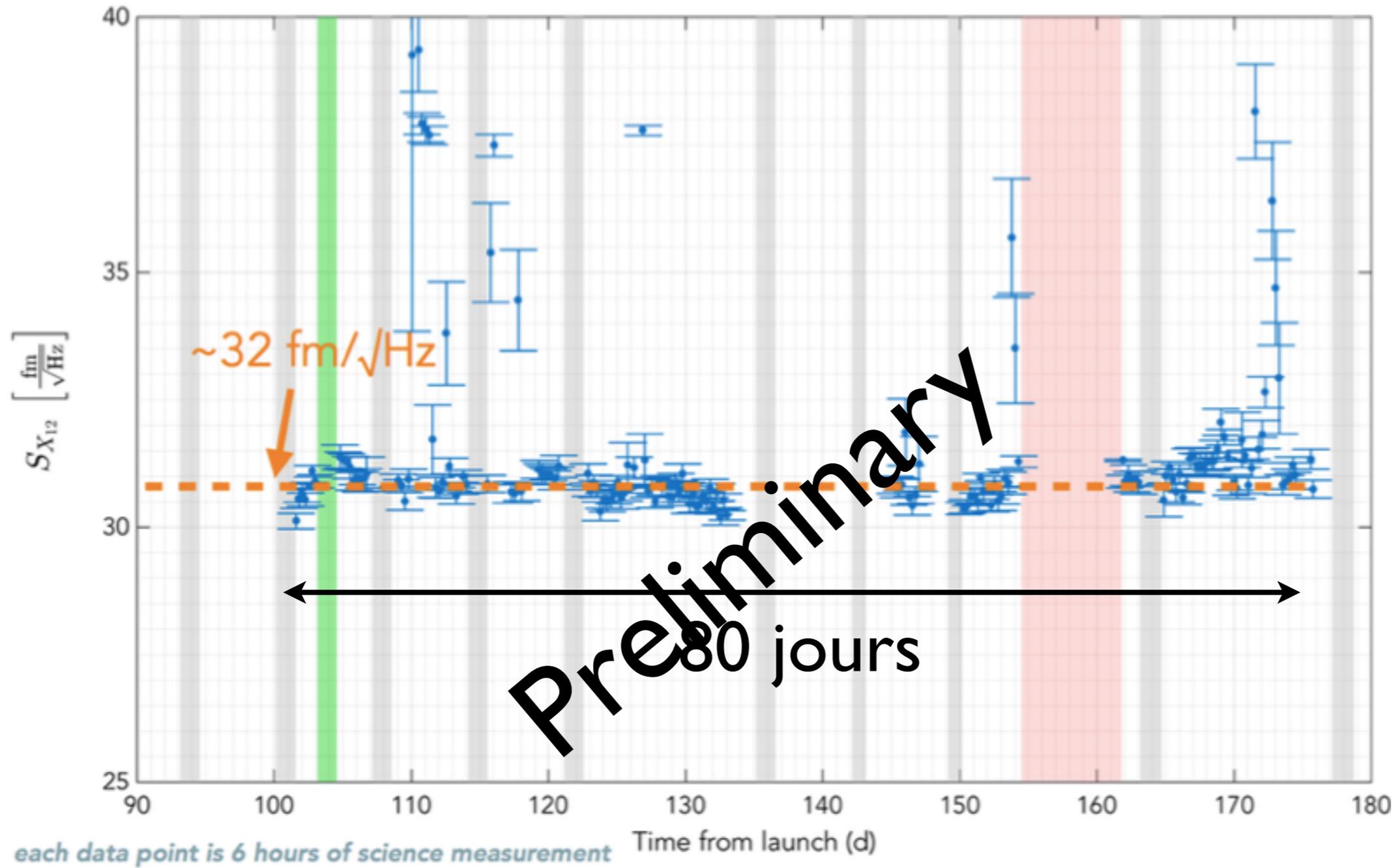
# Les Performances

## Un exemple : Les Mesures Optiques





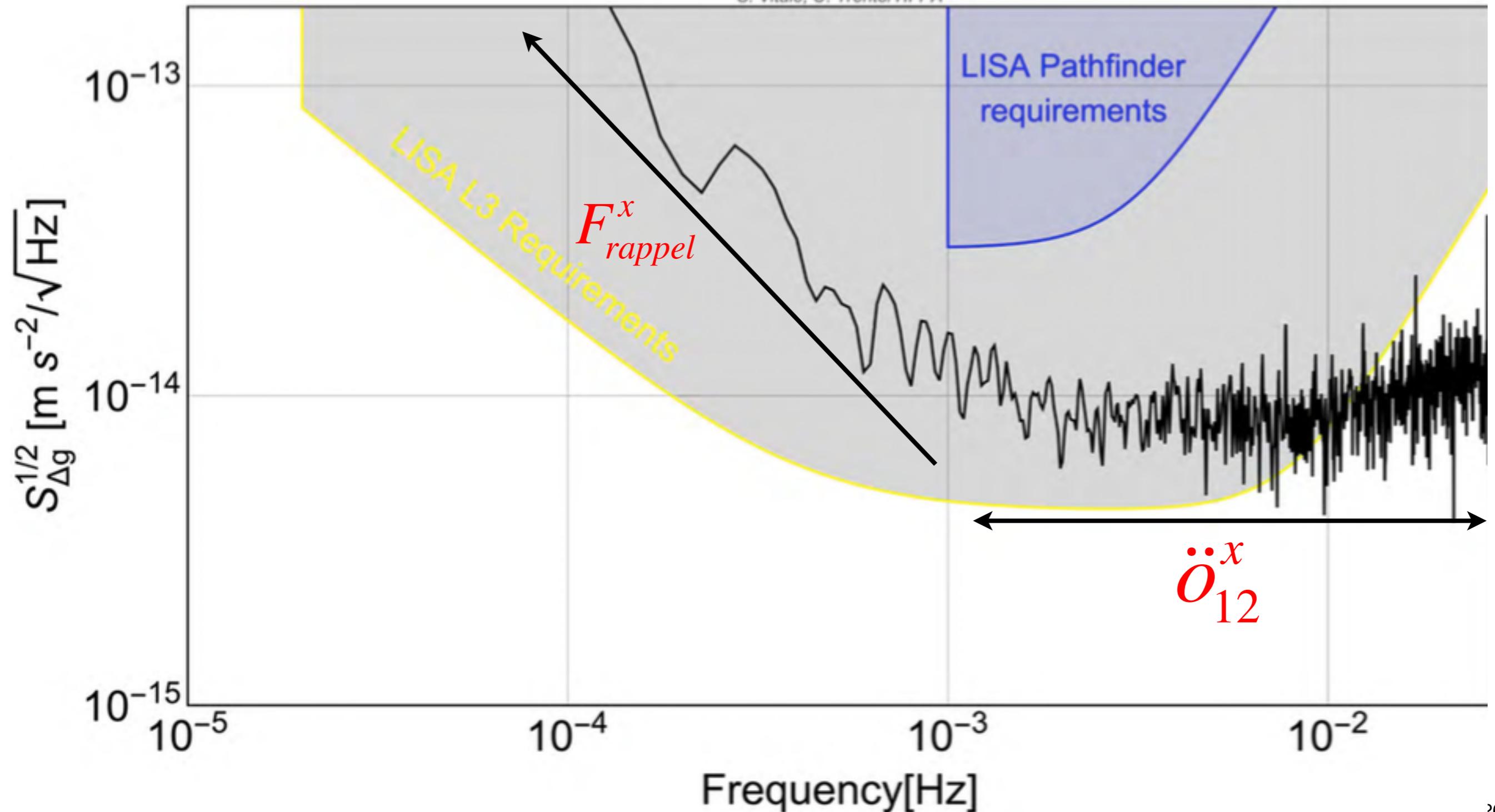
# Les Mesures Optiques : La Stabilité



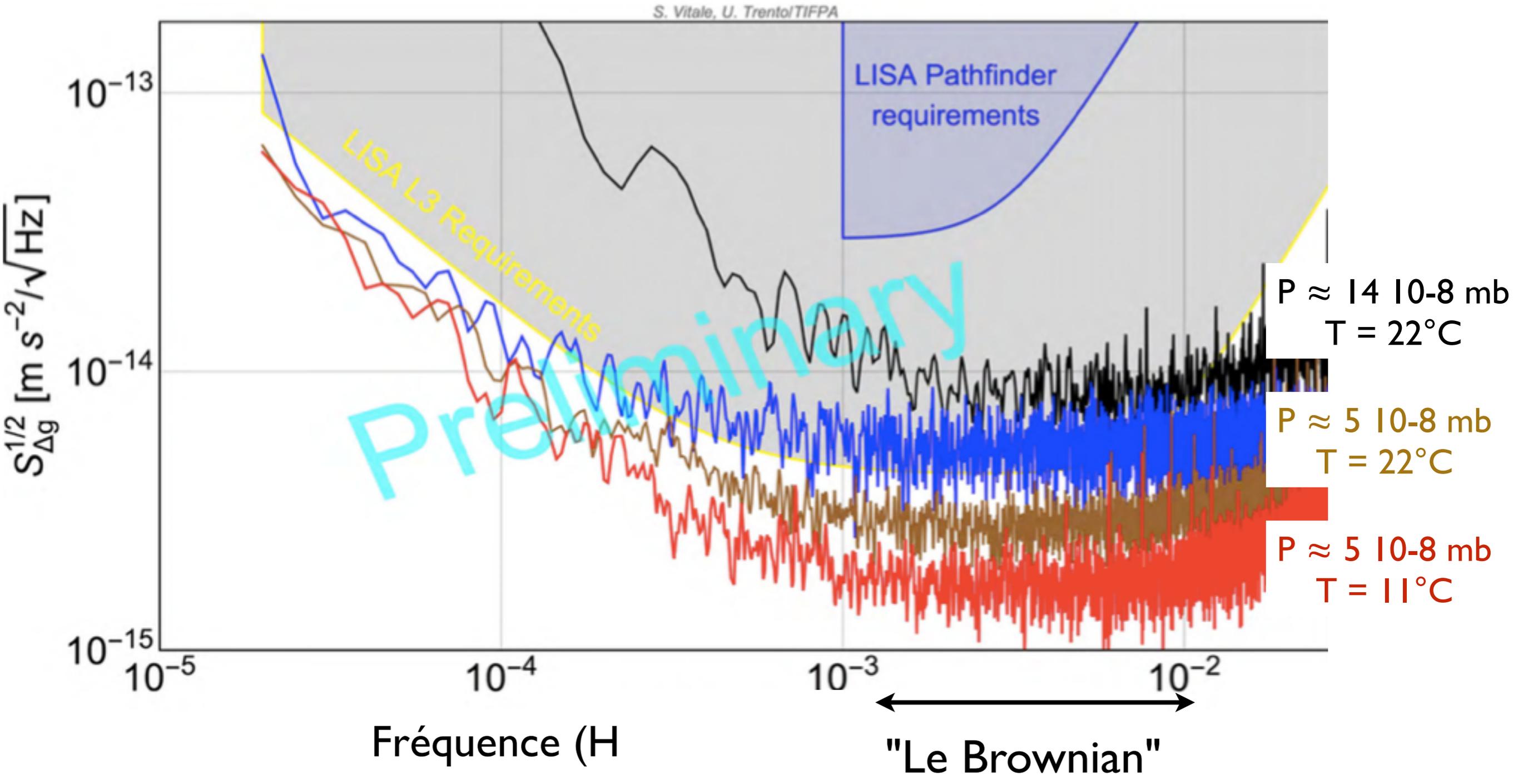
# Les Premiers Résultats sur l'Accélération Relative Mesures de Mars 2016

$$a_{12}^x = \ddot{O}_{12}^x + F_{rappel}^x + \dots$$

S. Vitale, U. Trento/TIFPA

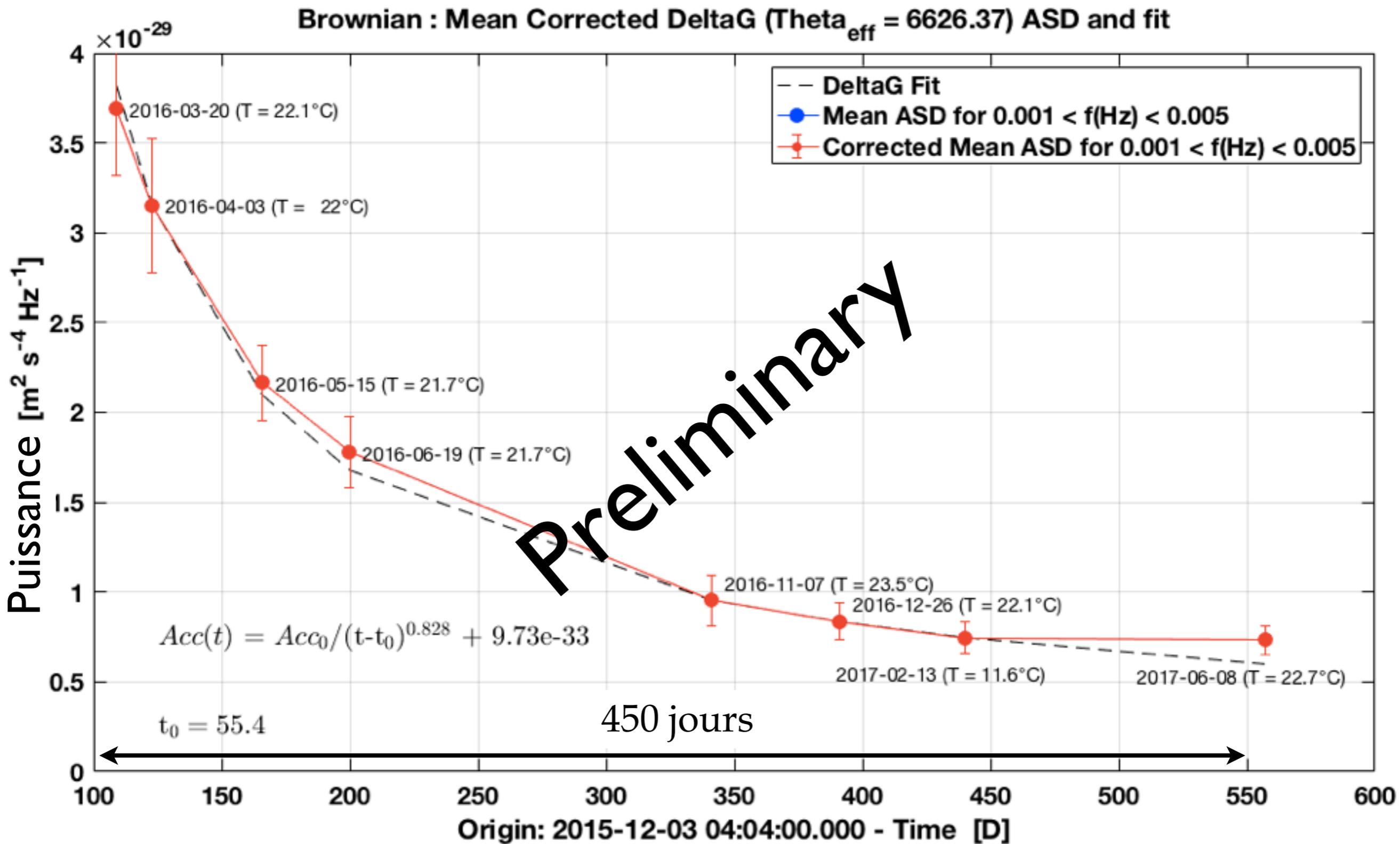


# Evolution avec la pression et la température





# La Valeur Moyenne du "Brownian" au cours du temps



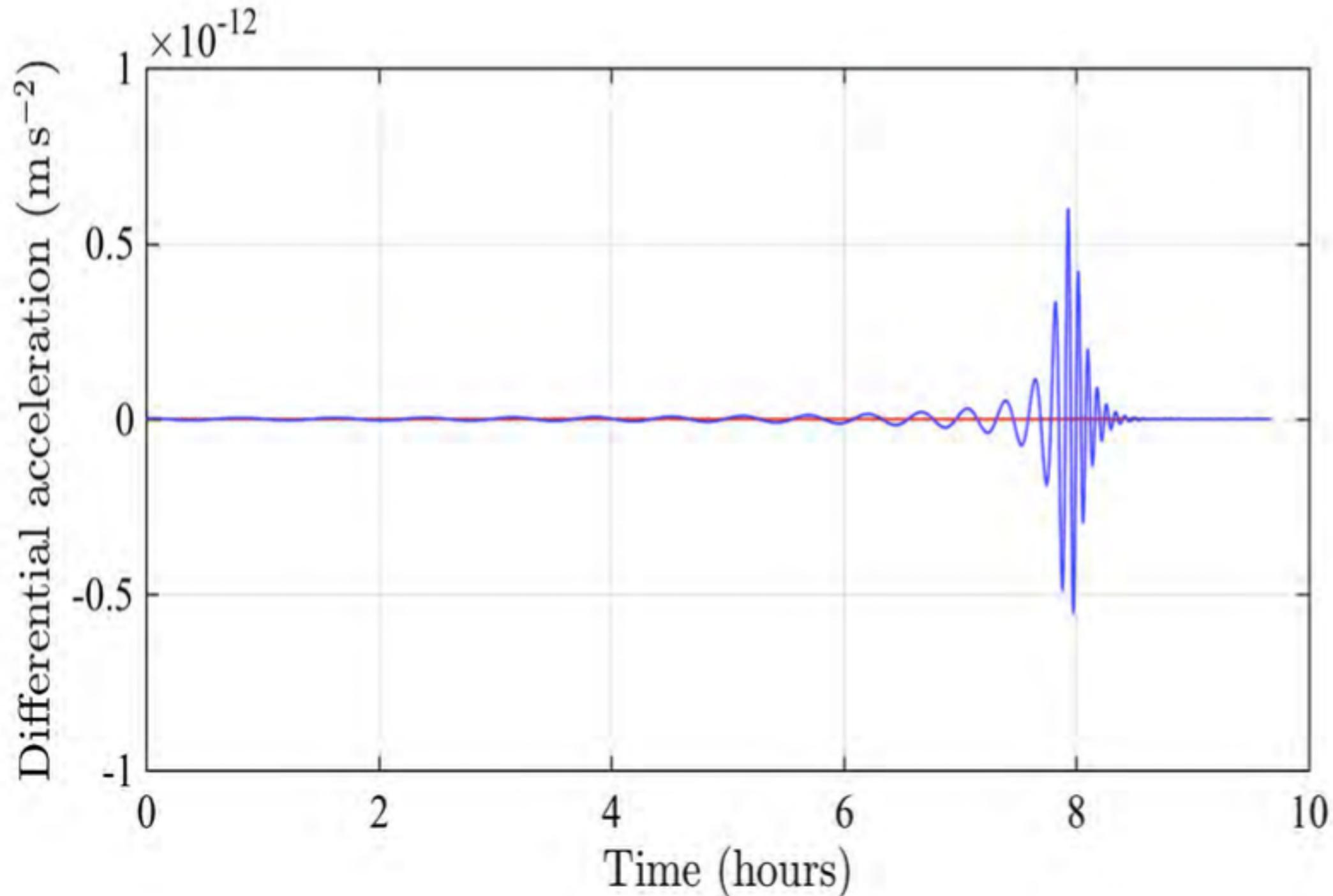


# Une Coalescence vue par LISA



Simulated LISA acceleration signal for two  $5 \times 10^5 M_{\odot}$  black-holes with their galaxies merging at  $z=5$

LISA Pathfinder acceleration data



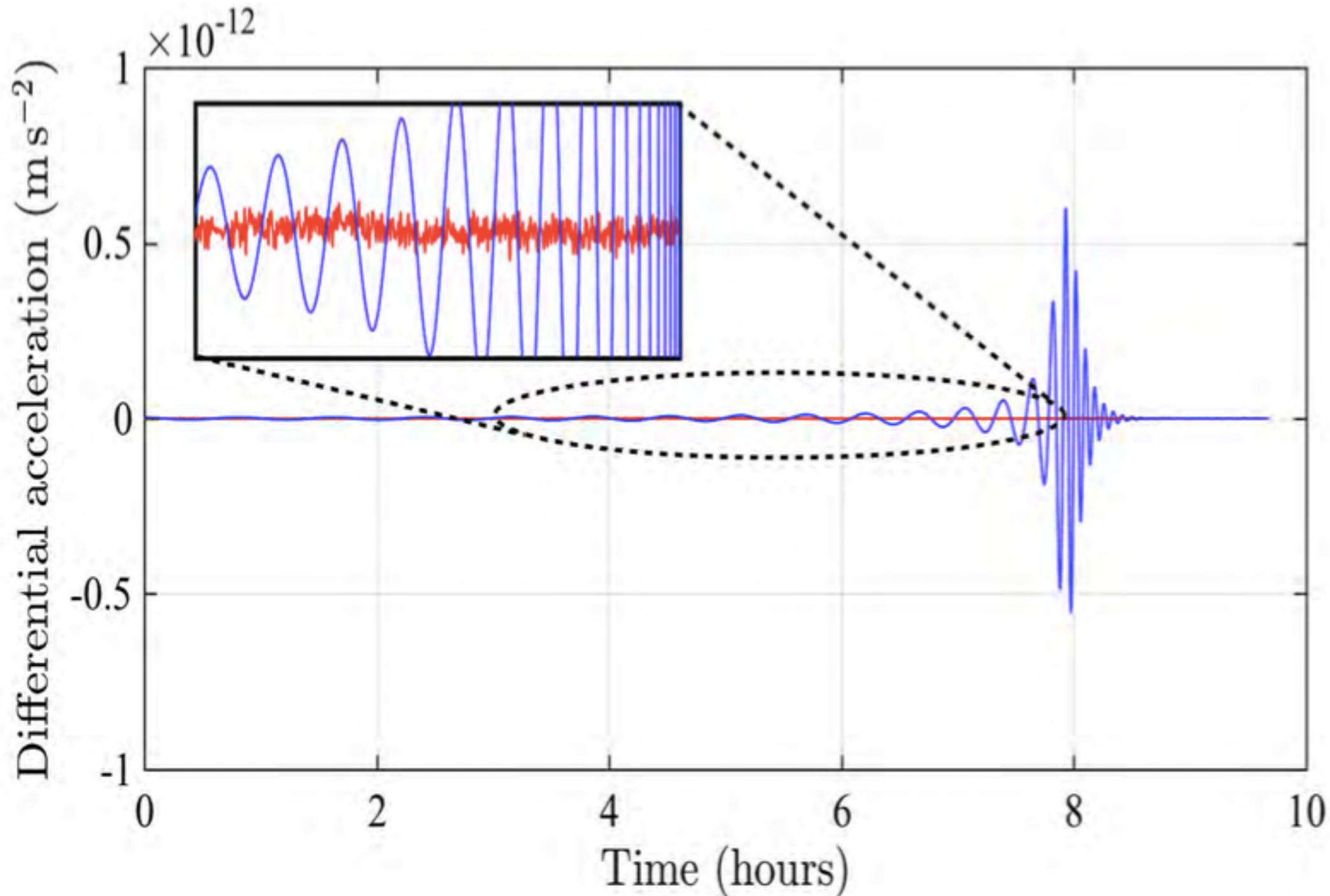


# Une Coalescence vue par LISA



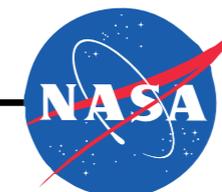
Simulated LISA acceleration signal for two  $5 \times 10^5 M_{\odot}$  black-holes with their galaxies merging at  $z=5$

LISA Pathfinder acceleration data

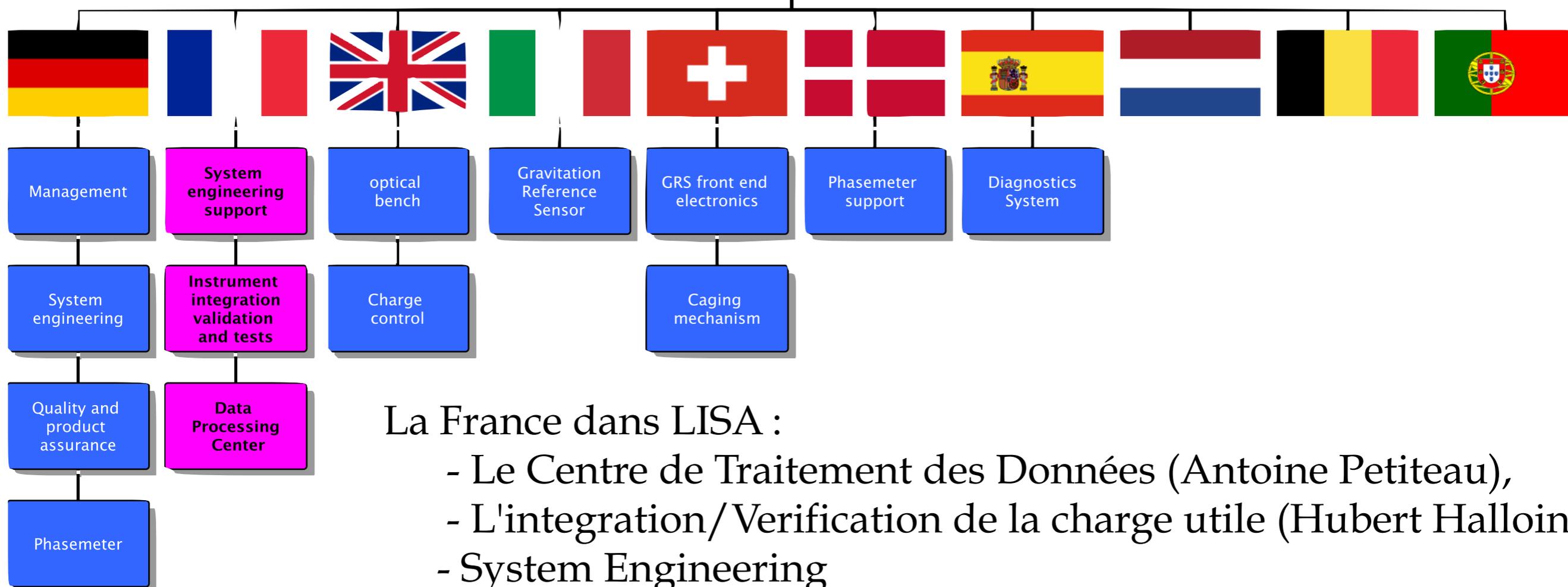




# Le Consortium LISA



Instrument Board  
Instrument PI (D), National PIs

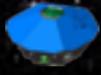
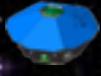
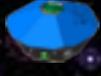
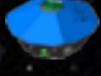
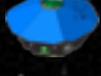
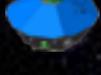
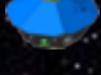
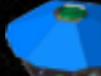


## La France dans LISA :

- Le Centre de Traitement des Données (Antoine Petiteau),
- L'integration/Verification de la charge utile (Hubert Halloin).
- System Engineering

## Octobre 2017 : Réunion Lisa-France à l'APC

# Les prochaines étapes pour LISA ...

-  Juillet 2017 : Fin de la mission LISAPathfinder
  -  2017: Phase 0 ESA pour LISA:
  -  mars 2018- fin 2019 : Phase A Industrielle
  -  2022 : Adoption de la mission par ESA
  -  2024 - 2030 : La construction des satellites
  -  2034 (ou 2030 ?) : Le lancement de LISA
  -  2034 - 2044 : la mission et l'analyse des résultats.
  -  En même temps que ET, LSST, SKA, JWST, EELT, ATHENA... Un ensemble impressionnant de détecteur opérant en même temps
-  C'est un période passionnante pour cette physique !!



# Merci

- **ESA ESTEC**
- **ESA ESAC**
- **ESA ESOC**
- **EADS Astrium UK**
- **EADS Astrium GmbH**
- **University of Trento**
- **Albert Einstein Institute**
- **University of Glasgow**
- **University of Birmingham**
- **Imperial College London**
- **ETH Zurich**
- **Institut d-Estudis Espacials de Catalunya**
- **Universidad Politecnica de Barcelona**
- **APC Paris**
- **IFR Stuttgart**
- **Laben**
- **Carlo Gavazzi Space**
- **ALTA**
- **ARCS**
- **Contraves**
- **Kaiser Threde**
- **NTE**
- **SCISYS**
- **Spacebel**
- **SRON**
- **Technologica**
- **TESAT**
- **ZARM**
- **JPL**
- **NASA Goddard**
- **BUSEK**