

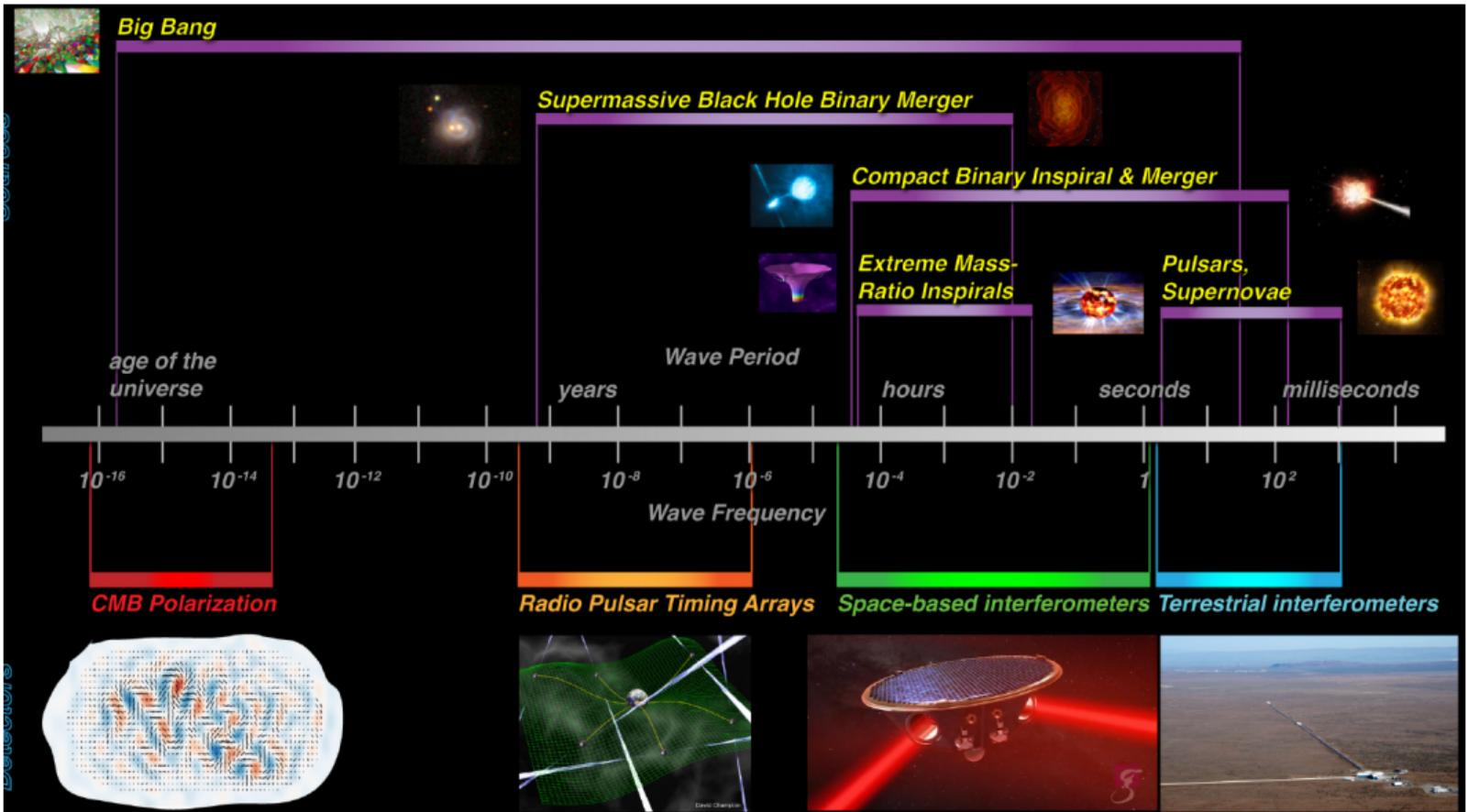
# LISA : Un observatoire d'ondes gravitationnelles – GW dans le GRAND OUEST –

Raissa Costa Barroso, (Nam Q. Dam), Yves Lemière, François Mauger +  
Yoann Brelet, Julien Lory

2025/05/27



# LISA et le spectre gravitationnel

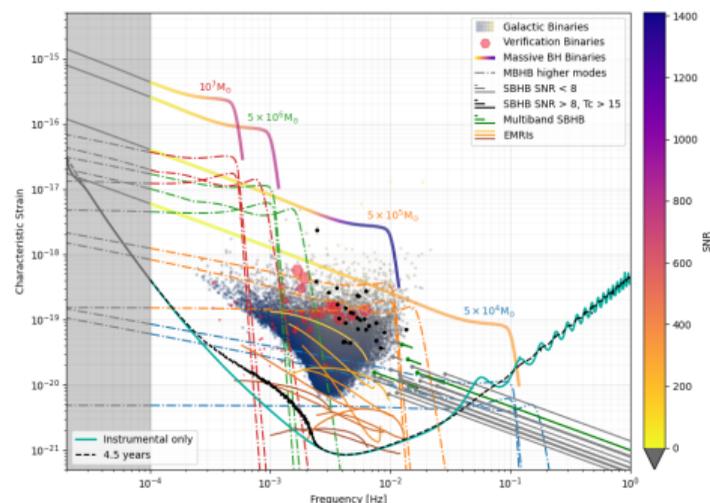


# Objectifs scientifiques de LISA en 2024

## Mission L3 adoptée par l'ESA

- **Trous noirs supermassifs** :  
coalescence  $\approx 100/\text{an}$
- **Binaires galactiques** :  $60 \times 10^6$  en régime  
spiralant quasi-monochromatique
- **Extreme Mass Ratio Inspirals**
- **Fonds stochastiques** :  
sources non-discernables, fond primordial,  
...

<https://www.elisascience.org/>



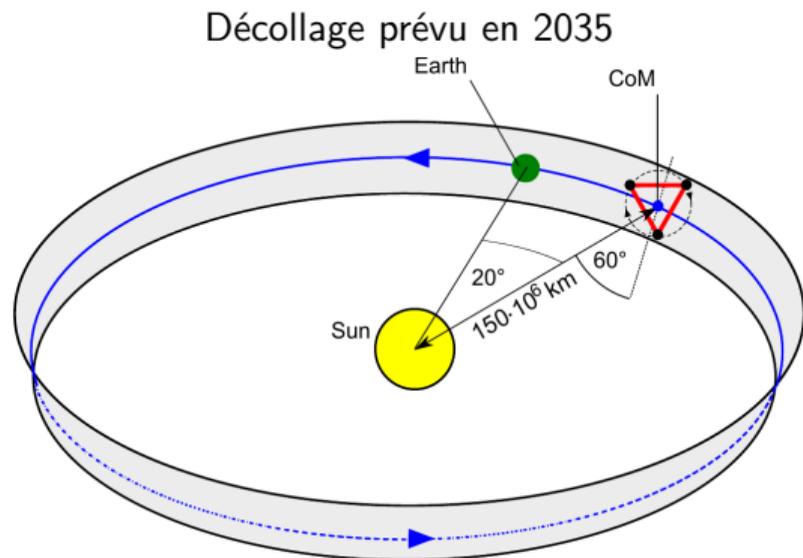
<https://lisa-science-explorer.in2p3.fr/>

# Objectifs scientifiques

## Que peut on apprendre ?

- S01** Étude de la formation/évolution des binaires d'étoiles compactes dans la Voie Lactée
- S02** Origine/croissance des fusions des MBHB sur des durées cosmologiques
- S03** Étude de la dynamique des clusters denses avec les EMRIs
- S04** Comprendre l'astrophysique des trous noirs de masse stellaire
- S05** Explorer la nature fondamentale de la gravité et des trous noirs
- S06** Étude du taux d'expansion de l'Univers
- S07** Comprendre le fond de GW stochastiques de l'Univers primordial
- S08** Chercher des sursauts de GW et des sources inattendues

# Laser Interferometer Space Antenna – LISA –

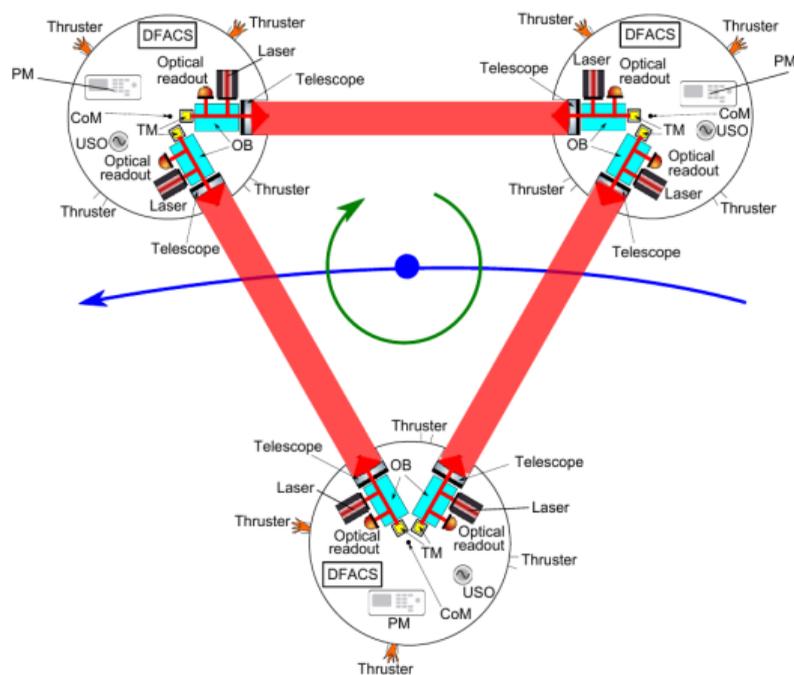


## La constellation LISA

- 18 mois de transfert + 3 mois de commissioning
- 3 S/C en orbite héliocentrique
- Formation équilatérale  
2,5 · 10<sup>6</sup> km  $\simeq$  8 s
- 6 liens laser (1064 nm)
- Interféromètre hétérodyne
- Sensibilité :  $\delta L/L = 10^{-21}$
- Durée : 4,5 ans (+ 5,5 ans)

<https://lisa.pages.in2p3.fr/consortium-userguide/acronyms.html>

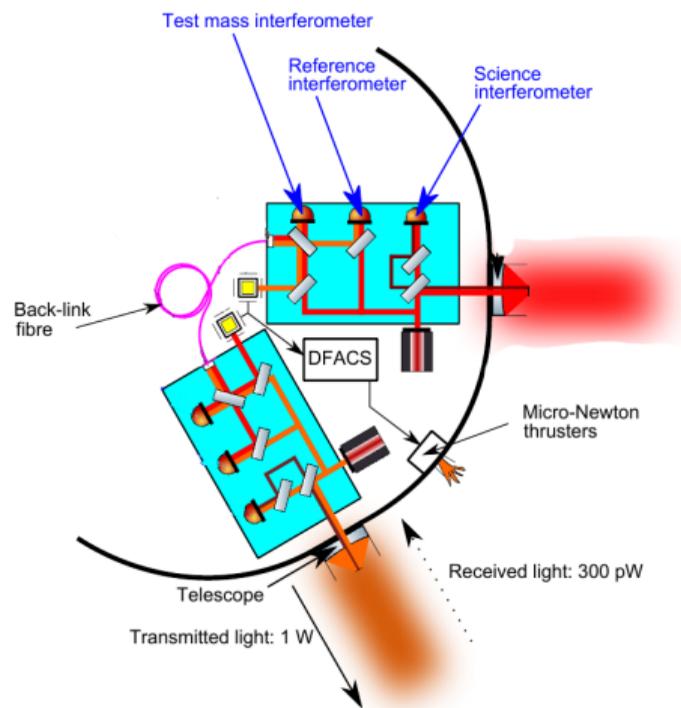
# Laser Interferometer Space Antenna – LISA –



## Quelques défis...

- TM en chute libre sensible à la gravitation  
Ajustement des S/C autour des TM.
- Vol libre selon l'axe TM-TM
- Déformations du triangle  
 $\pm 20000$  km et  $\pm 10$  m/s (Doppler)
- Mesure au pm  
qqles années de stabilité du système
- $P_{\text{laser}} = 2$  Watts,  $P_{\text{reçu}} \approx 100$  pWatts.

# Laser Interferometer Space Antenna – LISA –



## Un satellite de LISA

- 2 MOSA
  - Telescope (PAAM)
  - Banc Optique (Zerodur)
  - Grav. Ref. Sensor (GRS)
- 1 fibre optique

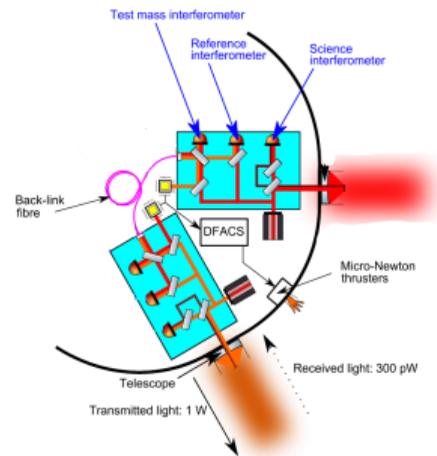
## Quelques bruits...

- Laser :  $10^{-13}$  (vs  $10^{-21}$ )
- 1 horloge par S/C
- Accélération, readout, chemin optique, TTL...

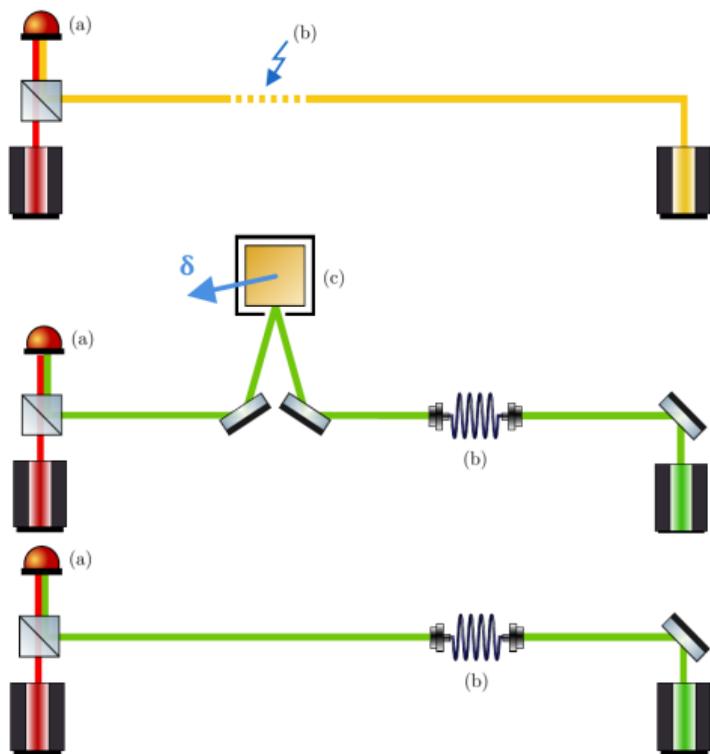
# Principe de la mesure

## Les mesures Interférométriques – IFO

- IFO science  
variations de distances entre 2 OB<sub>distant</sub>s
- IFO Test Mass  
variations de distances OB/TM
- IFO référence  
variations de fréquences entre les 2 lasers locaux



# Time Delay Interferometry – TDI



## IFO science

$$s_{12} = D_{12}p_{21} - p_{12} + \dots$$

- GW + Bruits
- Mesure  $d(\text{OB}/\text{OB})$

## IFO Test Mass

$$\varepsilon_{12} = p_{13} - p_{12} + \dots$$

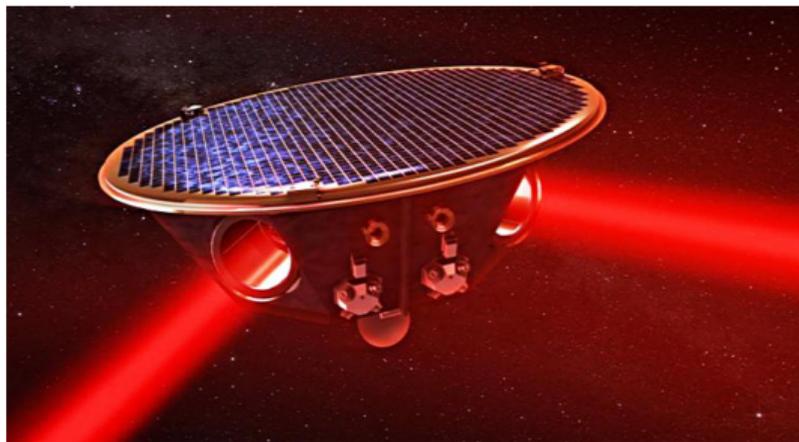
- Bruits (Laser, OP, fibre  $\mu$ )
- Mesure  $d(\text{OB}/\text{TM})$

## IFO référence

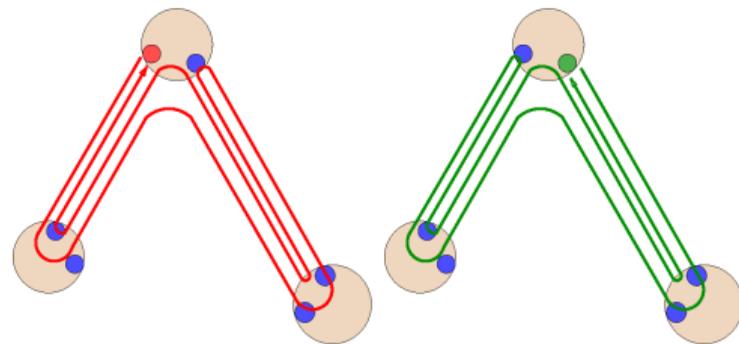
$$\tau_{12} = p_{13} - p_{12} + \dots$$

- Bruits (Laser, OP, Acc,  $\mu$ )

## Laser noise and Time Delay Interferometer– TDI –



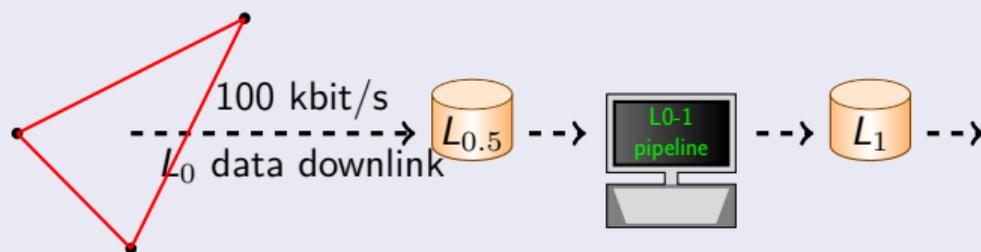
Interféromètre virtuel et suppression du bruit laser



### TDI – génération 2

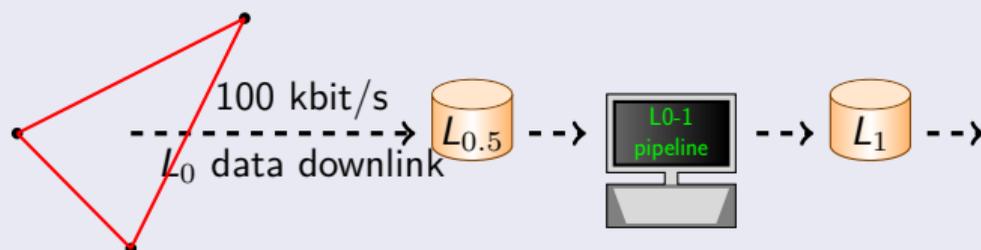
$$X_{2.0} = (1 - \mathcal{D}_{33'2'2}) [(\eta_{1'} + \mathcal{D}_{2'}\eta_3) + \mathcal{D}_{2'2} (\eta_1 + \mathcal{D}_3\eta_{2'})] - (1 - \mathcal{D}_{2'233'}) [(\eta_1 + \mathcal{D}_3\eta_{2'}) + \mathcal{D}_{33'} (\eta_{1'} + \mathcal{D}_{2'}\eta_3)]$$

## Avant d'avoir les premières données...



- Mesures les distances inter-S/C
- Synchronisation en temps des flux de données
- Suppressions des bruits et TDI

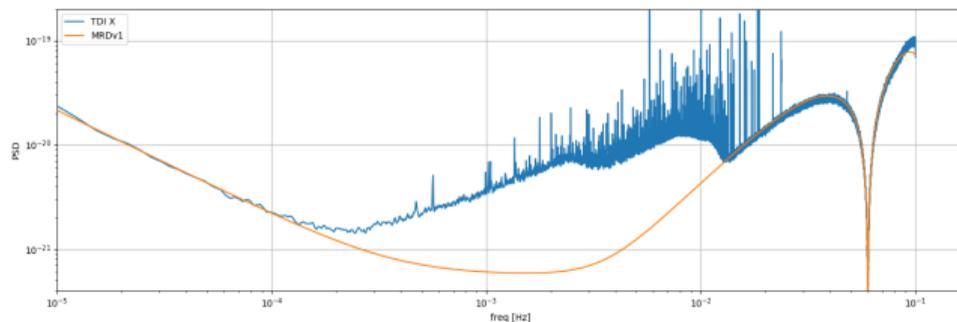
## Avant d'avoir les premières données...



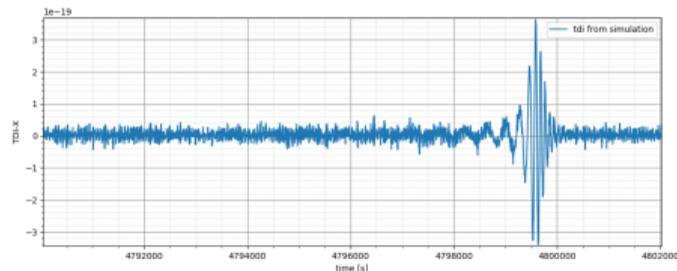
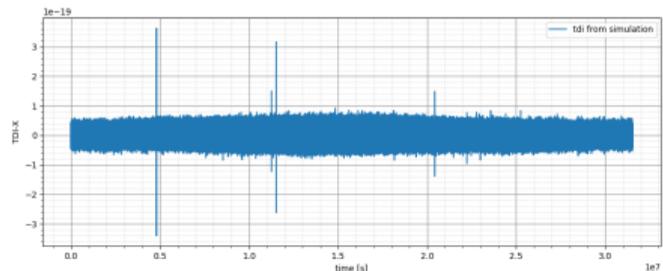
- Mesures les distances inter-S/C
- Synchronisation en temps des flux de données
- Suppressions des bruits et TDI

- ★ Pas de mesures individuelles des bruits instrumentaux
- ★ Propagation des bruits (locking + TDI)

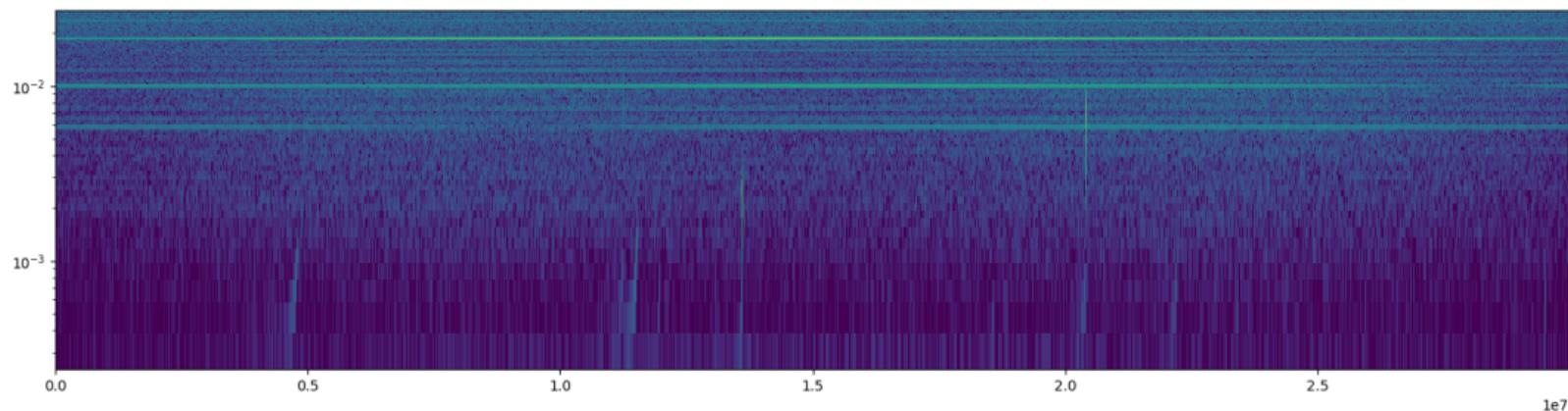
# À partir des données L1 → L2 → L3 (catalogues)



données issues du LISA Data Challenges



# À partir des données L1 → L2 → L3 (catalogues)



Challenge Sangria avant le challenge Mojito

Publication attendues des catalogues

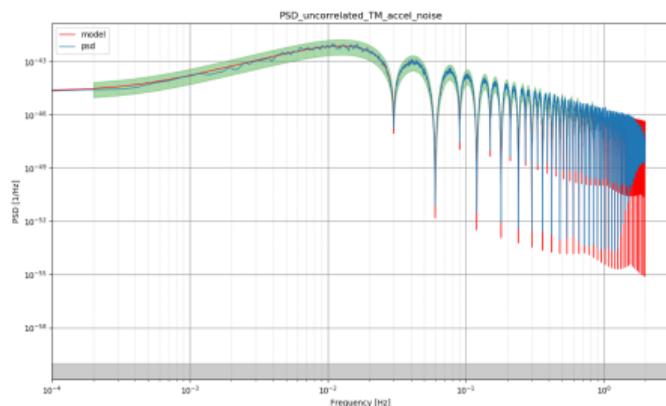
10-100/an SMBHBs, 10-1000/an EMRIs, qqles 10k GBs, BHB, Fond cosmologique, ...

Redbook LISA : Arxiv #2402.07571

# LISA au LPC Caen : Modèle de performance de l'instrument

Travail réalisé avec Nam Q. Dam

Fonctions analytiques de l'expression des bruits en TDI



- Time-delay interferometry noise transfer functions for LISA Phys. Rev. D 108, 082004  
TDI 2, Orbites réalistes et études de corrélations.
- CCPM Noise Model Verification  
LISA-LCST-INST-TP-001  
Comparaison à la simulation.

→ Prototypage d'analyse des fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles (SGWB)  
→ Implication au sein du groupe Performances & Opérations à l'ESA

# LISA au LPC Caen : Modèle de performance de l'instrument

## Travail réalisé avec Nam Q. Dam

### Fonctions analytiques de l'expression des bruits en TDI

Noise type	Correlation	PSD	CSD
test-mass acceleration	None	$4C_{XX}(\omega) [3 + \cos(2\omega L)]$	$4C_{XY}(\omega)$
	Correlated noises at the same S/C	$8C_{XX}(\omega)$	$-4C_{XX}(\omega)$
	Anticorrelated noises at the same S/C	$8C_{XX}(\omega) [2 + \cos(2\omega L)]$	$4C_{XX}(\omega) [1 - 4 \cos(\omega L)]$
Readout (TMI) and Optical Pathlength (TMI)	None	$C_{XX}(\omega) [3 + \cos(2\omega L)]$	$C_{XY}(\omega)$
	Correlated adjacent TMI noise	$2C_{XX}(\omega)$	$-C_{XX}(\omega)$
	Anticorrelated adjacent TMI noise	$2C_{XX}(\omega) [2 + \cos(2\omega L)]$	$C_{XX}(\omega) [1 - 4 \cos(\omega L)]$
Backlink (TMI)	None	$C_{XX}(\omega) [3 + \cos(2\omega L)]$	$C_{XY}(\omega)$
Readout (ISI and RFI) and Optical Pathlength (ISI and RFI)	None	$4C_{XX}(\omega)$	$C_{XY}(\omega)$
	Correlated adjacent IFO noise	$2C_{XX}(\omega)$	$-C_{XX}(\omega)$
	Anticorrelated adjacent IFO noise	$6C_{XX}(\omega)$	$C_{XX}(\omega) [1 - 4 \cos(\omega L)]$
	Correlated noises at the same telescope	$4C_{XX}(\omega) [3 + \cos(2\omega L)]$	$4C_{XY}(\omega)$
Backlink (RFI)	None	$4C_{XX}(\omega)$	$C_{XY}(\omega)$

- Time-delay interferometry noise transfer functions for LISA Phys. Rev. D 108, 082004  
 TDI 2, Orbites réalistes et études de corrélations.
- CCPM Noise Model Verification  
 LISA-LCST-INST-TP-001  
 Comparaison à la simulation.

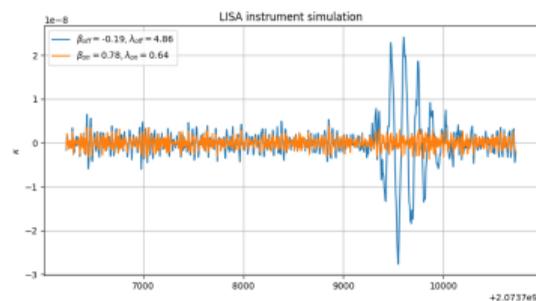
→ Prototype d'analyse des fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles (SGWB)

→ Implication au sein du groupe Performances & Opérations à l'ESA

# LISA au LPC Caen : Nullstream channel pour les Low latency

Thèse de Raïssa Costa-Barroso

Localisation rapide et agnostique de sources de GW pour le LLAP : méthode coronographique



10.1088/1361-6382/addbbd

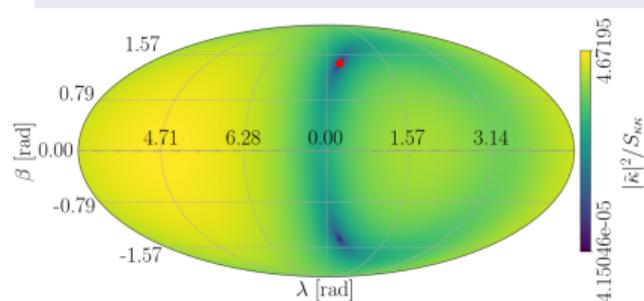
Coronagraphic time-delay interferometry: characterization and updated geometric prop.

- Construction d'un nouveau nullstream :  $\kappa(f, \lambda, \beta)$
- Preuve de principe de la méthode
- Pertinence pour les contre-parties E.M.
- Proposition d'arch. du Low Latency Alert Pipeline (CU-L2A)

# LISA au LPC Caen : Nullstream channel pour les Low latency

## Thèse de Raïssa Costa-Barroso

Localisation rapide et agnostique de sources de GW pour le LLAP : méthode coronographique



10.1088/1361-6382/addbbd

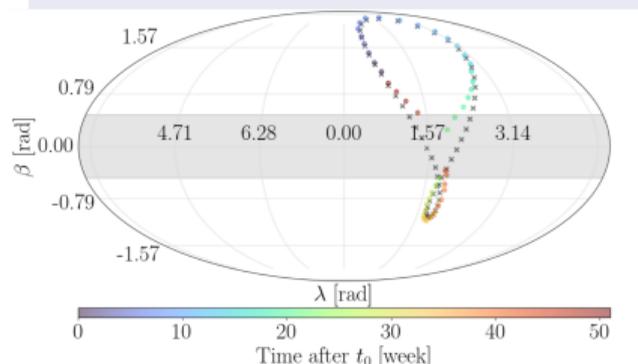
Coronagraphic time-delay interferometry: characterization and updated geometric prop.

- Construction d'un nouveau nullstream :  $\kappa(f, \lambda, \beta)$
- Preuve de principe de la méthode
- Pertinence pour les contre-parties E.M.
- Proposition d'arch. du Low Latency Alert Pipeline (CU-L2A)

# LISA au LPC Caen : Nullstream channel pour les Low latency

## Thèse de Raïssa Costa-Barroso

Localisation rapide et agnostique de sources de GW pour le LLAP : méthode coronagraphique



10.1088/1361-6382/addbbd  
Coronagraphic time-delay interferometry: characterization and updated geometric prop.

- Construction d'un nouveau nullstream :  $\kappa(f, \lambda, \beta)$
- Preuve de principe de la méthode
- Pertinence pour les contre-parties E.M.
- Proposition d'arch. du Low Latency Alert Pipeline (CU-L2A)

# LISA au LPC Caen : À l'avenir

## CU-L2A

- Confrontation de la méthode coronographique aux bruits, gaps, glitches.
- Évaluation des performances de la méthode pour les contre-parties EM.
- Animation/coordination du groupe de travail LLAP.

## CU-L01

- Études et simulations des niveaux de bruits instrumentaux
- Lien entre la CU-L01 du consortium et P&O de l'ESA

## Interferometric Detection System – IDS

Simulation optique des bancs de test pour évaluation des bruits

## CU-L2D

Le deep analysis, mais il faudra renforcer l'équipe

Merci pour votre attention !

