

Source laser ultrastable, compacte-transportable pour LISA

**A. Mehlman¹⁻², B. Pointard¹, D. Holleville¹, M. Lours¹
A. Boutin², R. Le Targat¹, P. Wolf¹, S. Bize¹, O. Acef¹**

¹ SYRTE ² EXAIL (Kylia)



Consortium LISA-France :
APC, ARTEMIS, CEA, CPPM, Institut FRESNEL, LAM, SYRTE, CNES



Journées scientifiques PN GRAM, Nice 6-8 Nov. 2023

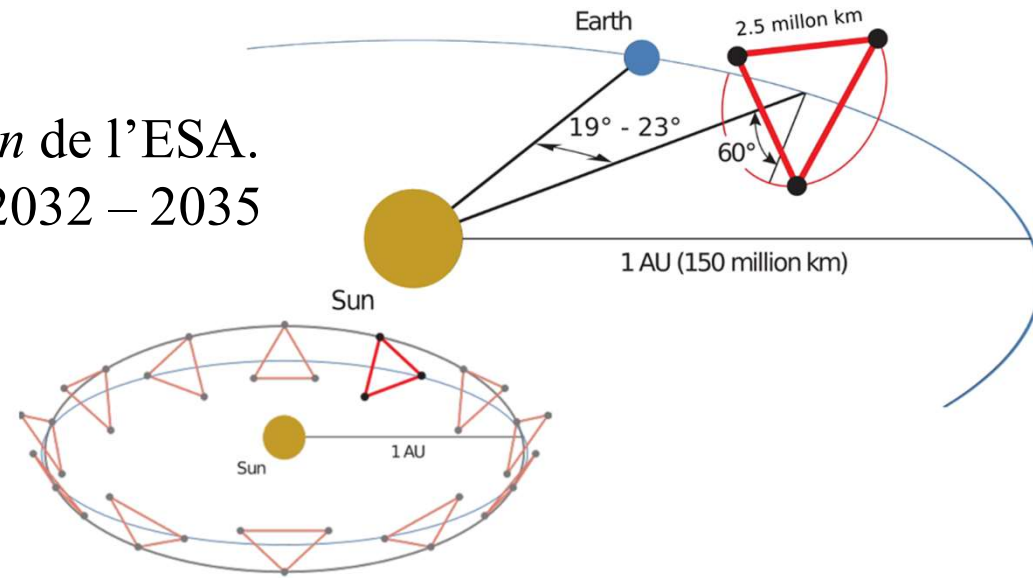


Plan de la présentation

- ❑ Bref rappel de LISA / du besoin lasers pour les tests sol de LISA
- ❑ Banc lasers Nd: YAG fibrés @ ~ 1064.49 nm
 - Tests interférométrie : MIFO/APC (2020)
 - Tests interférométrie : ZIFO/LAM (Janvier - Juillet - Septembre / 2023)
- ❑ Source laser compacte-transportable ultra stable à 532. 245 nm
 - tests interférométrie sous vide ZIFO/LAM-Marseille (Juillet - Septembre 2023)
- ❑ Aperçu d'un résultat obtenu par le consortium : Exposé de M. Vincent (APC)
- ❑ Perspectives

La mission spatiale LISA

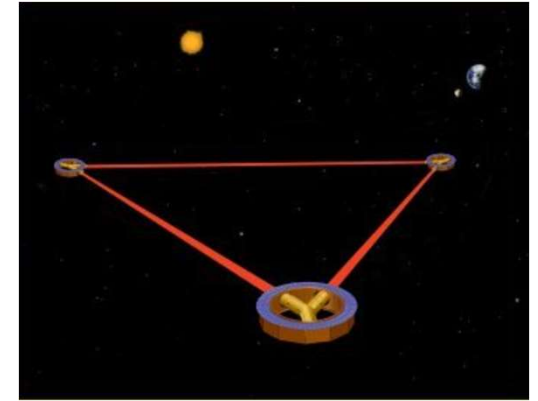
- ❑ LISA = Mission L3 du *programme cosmic vision* de l'ESA.
- ❑ Adoptée en juin 2017. Lancement prévu entre 2032 – 2035



- 3 satellites sur une orbite héliocentrique
- Distances inter-satellites ~ 2.5 Millions de km
- Passage d'une OG \rightarrow fluctuations relatives des chemins optiques $\sim 4 \times 10^{-21}$
- Bande de fréquence [1 Hz – 0.1 mHz]
- Avec TDI : Instabilités résiduelles de fréquence des lasers asservis nécessaires $\sim 10^{-13} \text{ t}^{-1/2}$.
- Soit $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ en ASD [1 Hz – 10^{-4} Hz], Espace. **[1 Hz – 30 mHz] au sol**

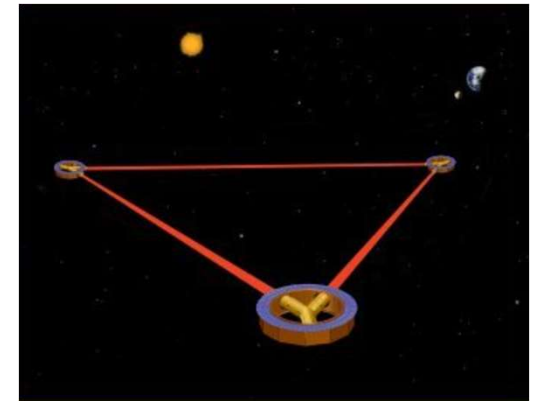
La mission spatiale LISA

- Sur chaque satellite : 2 lasers à ~ 1064.5 nm (+ 2 backups)
- 12 lasers embarqués pour l'ensemble de la mission
- Emission laser 2 Watt. Réception ~ 500 pW.
- Interférométrie hétérodyne : BP : 5 MHz – 28 MHz.
- 1 référence de fréquence ultrastable embarquée sur chaque satellite
- 1 seule référence de fréquence est utilisée. Les 2 autres références sont en mode backup
- Référence de fréquence nominale de LISA (Espace) : Cavité optique (FP) ultrastable
- Solution backup : Stabilisation sur l'iode à 532.245 nm



La mission spatiale LISA

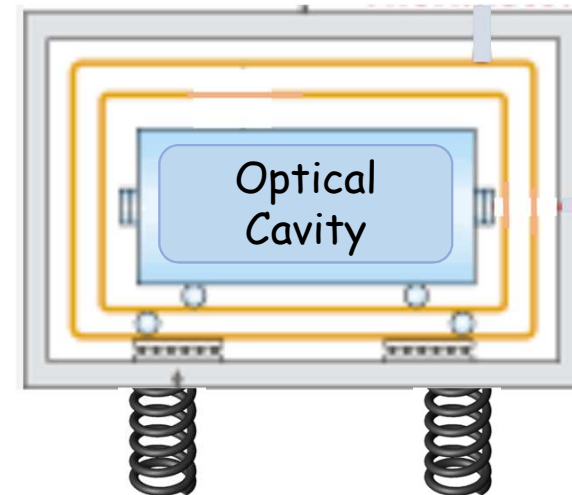
- Sur chaque satellite : 2 lasers à ~ 1064.5 nm (+ 2 backups)
- 12 lasers embarqués
- Emission laser 2 Watt. Réception ~ 500 pW.
- Interférométrie hétérodyne : BP : 5 MHz – 28 MHz.
- 1 référence de fréquence ultrastable embarquée sur chaque satellite
- 1 seule référence de fréquence est utilisée. Les 2 autres références sont en mode backup
- Référence de fréquence nominale de LISA (Espace) : Cavité optique (FP) ultrastable
- Solution backup : Stabilisation sur l'iode à 532.245 nm



A flight-like optical reference cavity for GRACE follow-on laser frequency stabilization



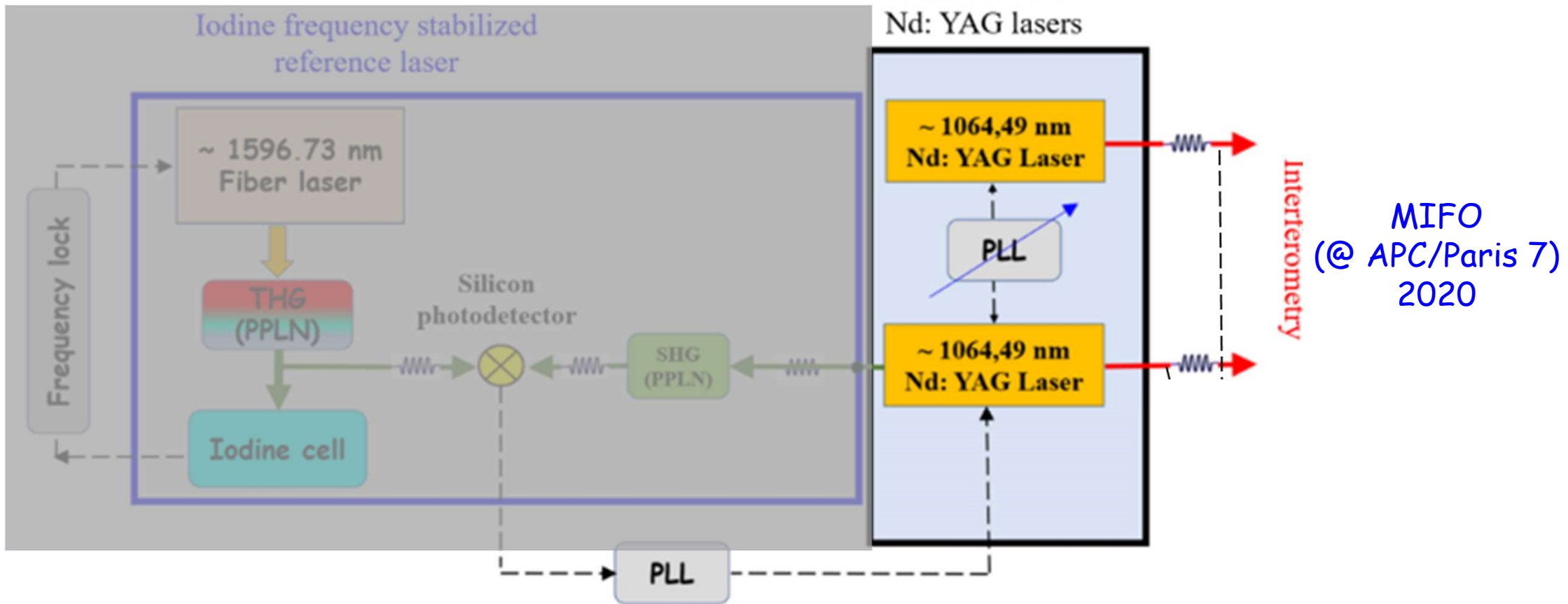
GRACE FO-



Iodine cell



Le besoin pour les tests sol de LISA (1)

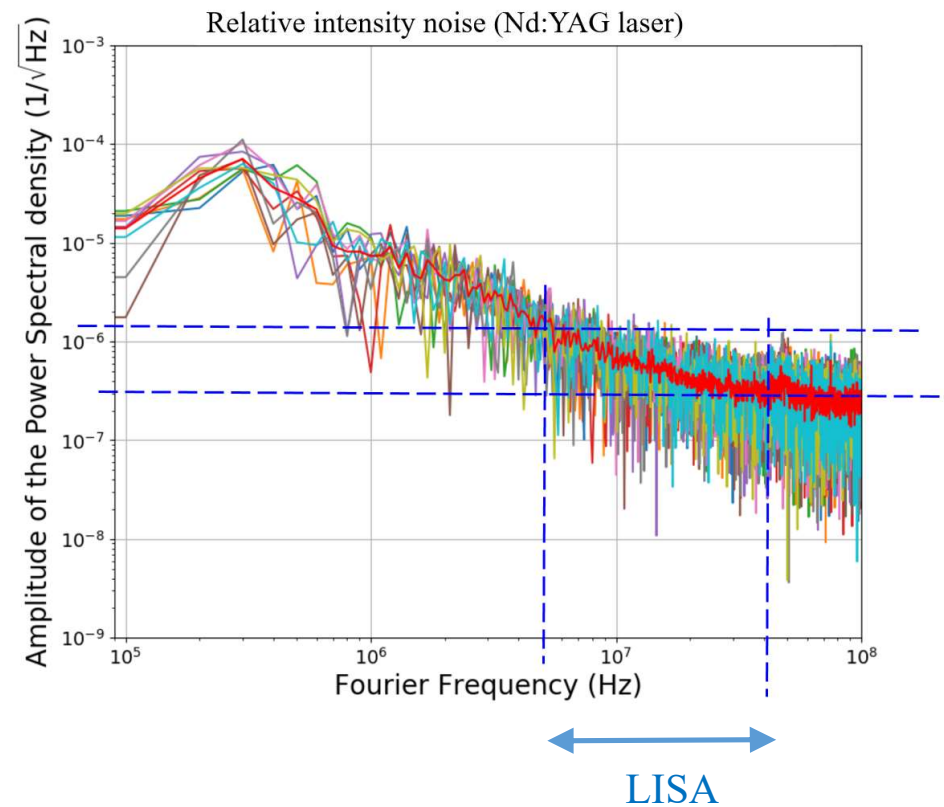
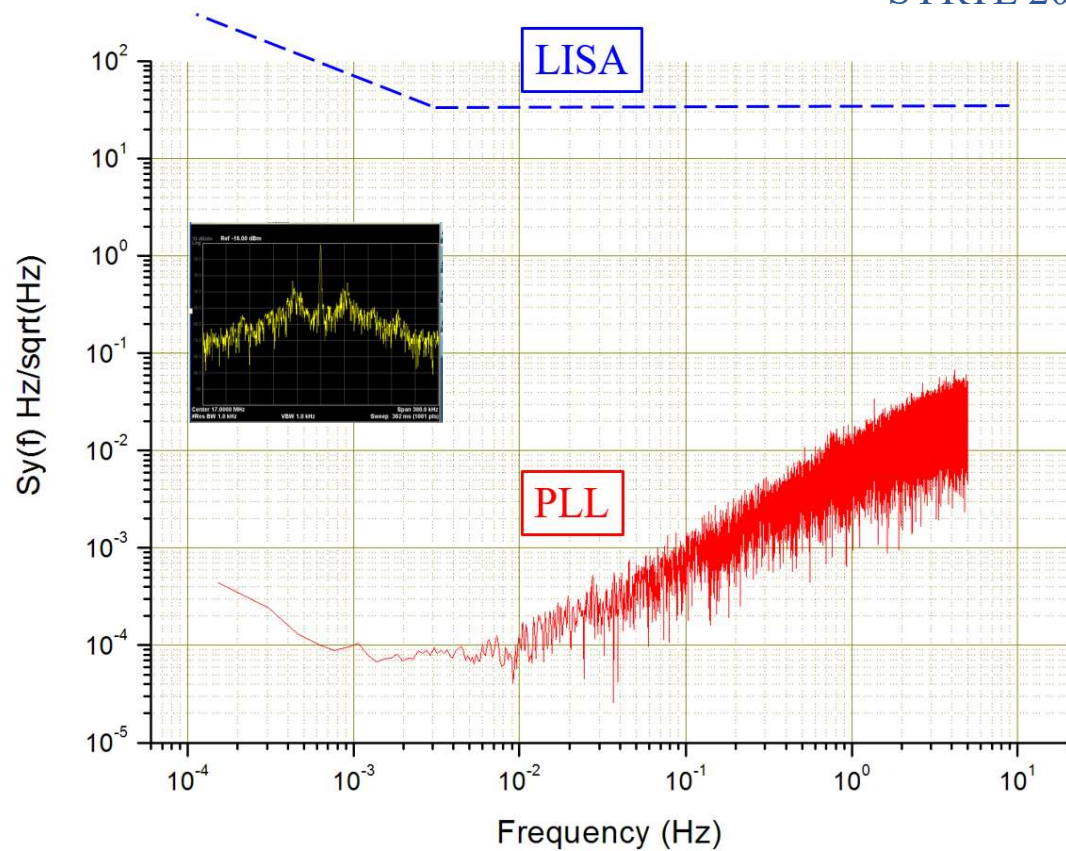


MIFO
(@ APC/Paris 7)
2020

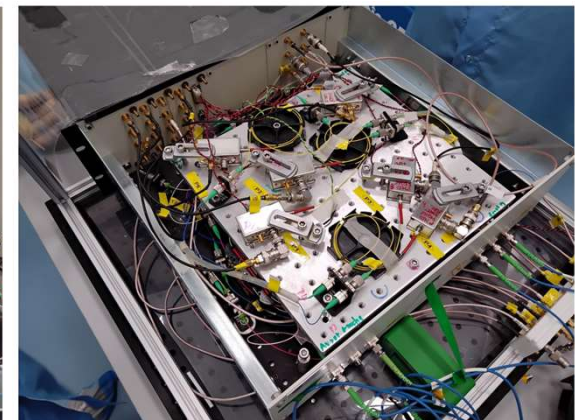
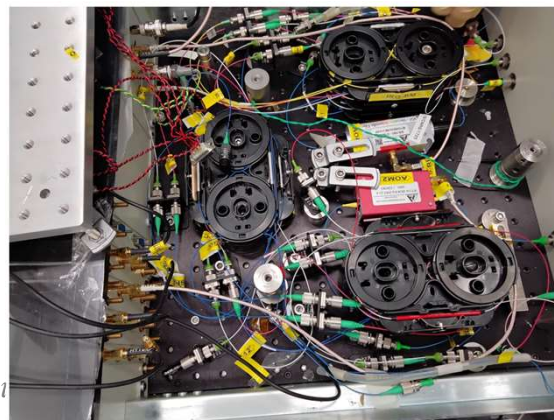
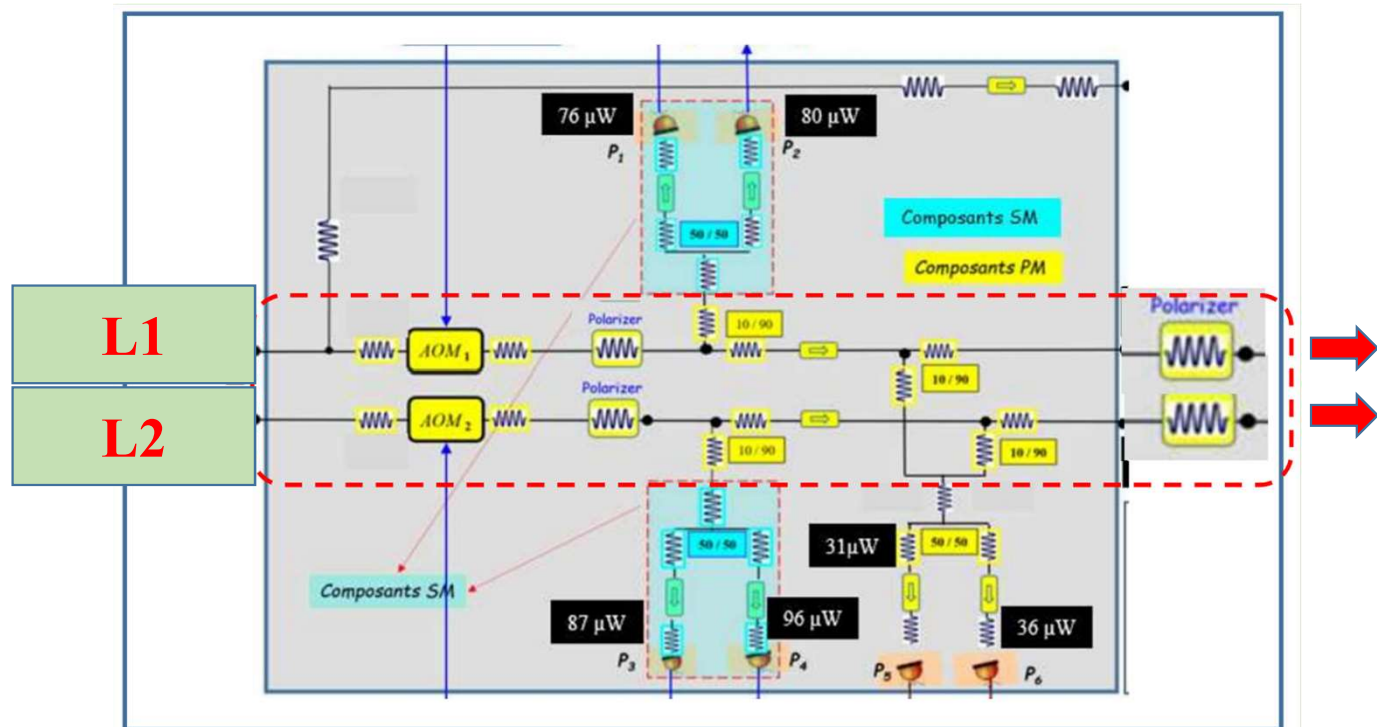
Laser maitre libre $\sim 10^4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$

Le besoin pour les tests sol de LISA (1)

SYRTE 2019 & 2022



Le besoin pour les tests sol de LISA (1)



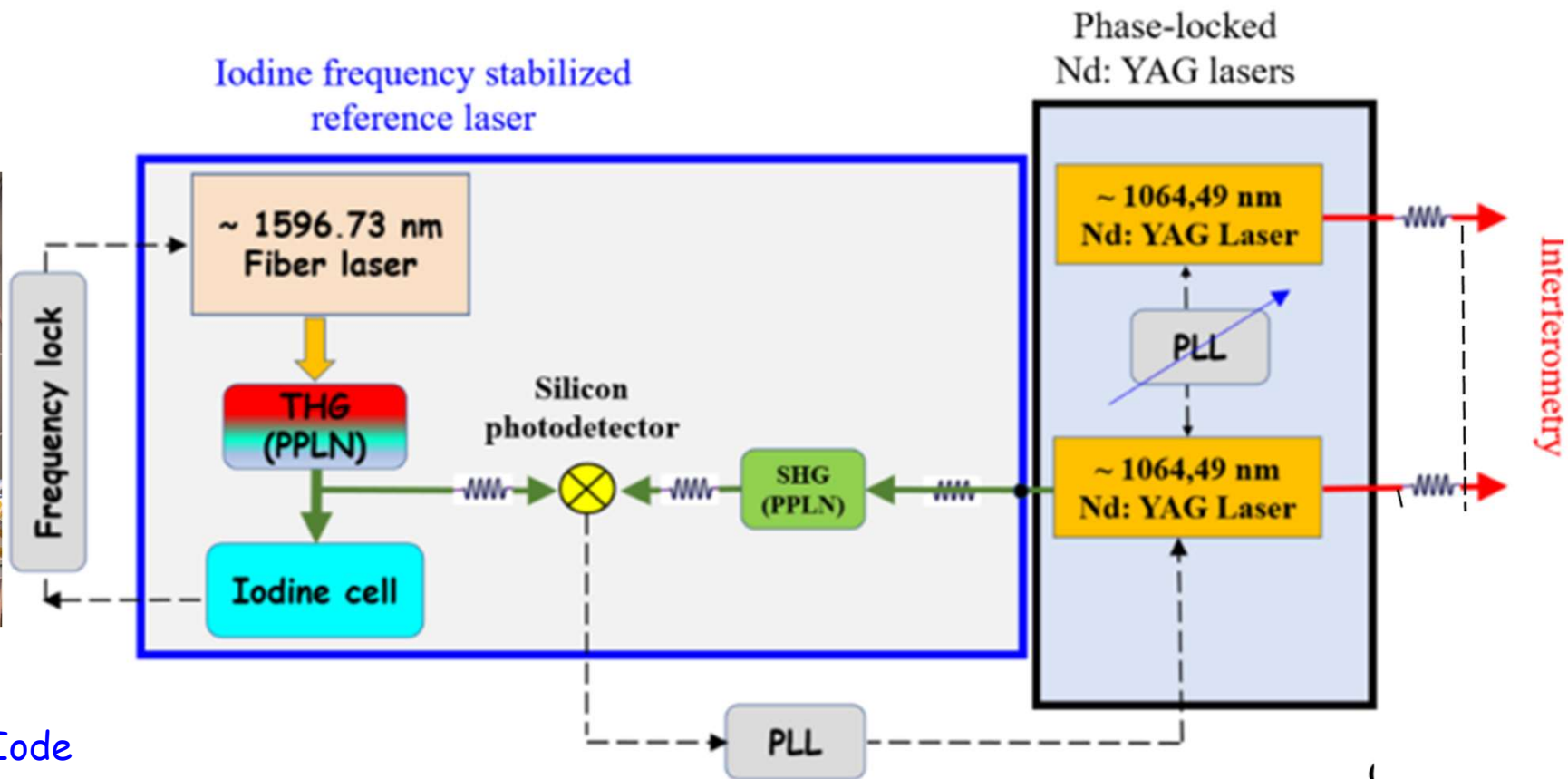
Plan de la présentation

- Bref rappel de LISA / du besoin lasers pour tests sol de LISA
- Banc lasers Nd: YAG fibré @ 1064.49 nm
 - tests interférométrie : MIFO/APC (2020)
- Source laser compacte-transportable ultra stable à 532. 245 nm
 - tests interférométrie sous vide ZIFO/LAM-Marseille (2023)
- Aperçu d'un résultat obtenu par le consortium : Exposé de M. Vincent (APC)
- Perspectives

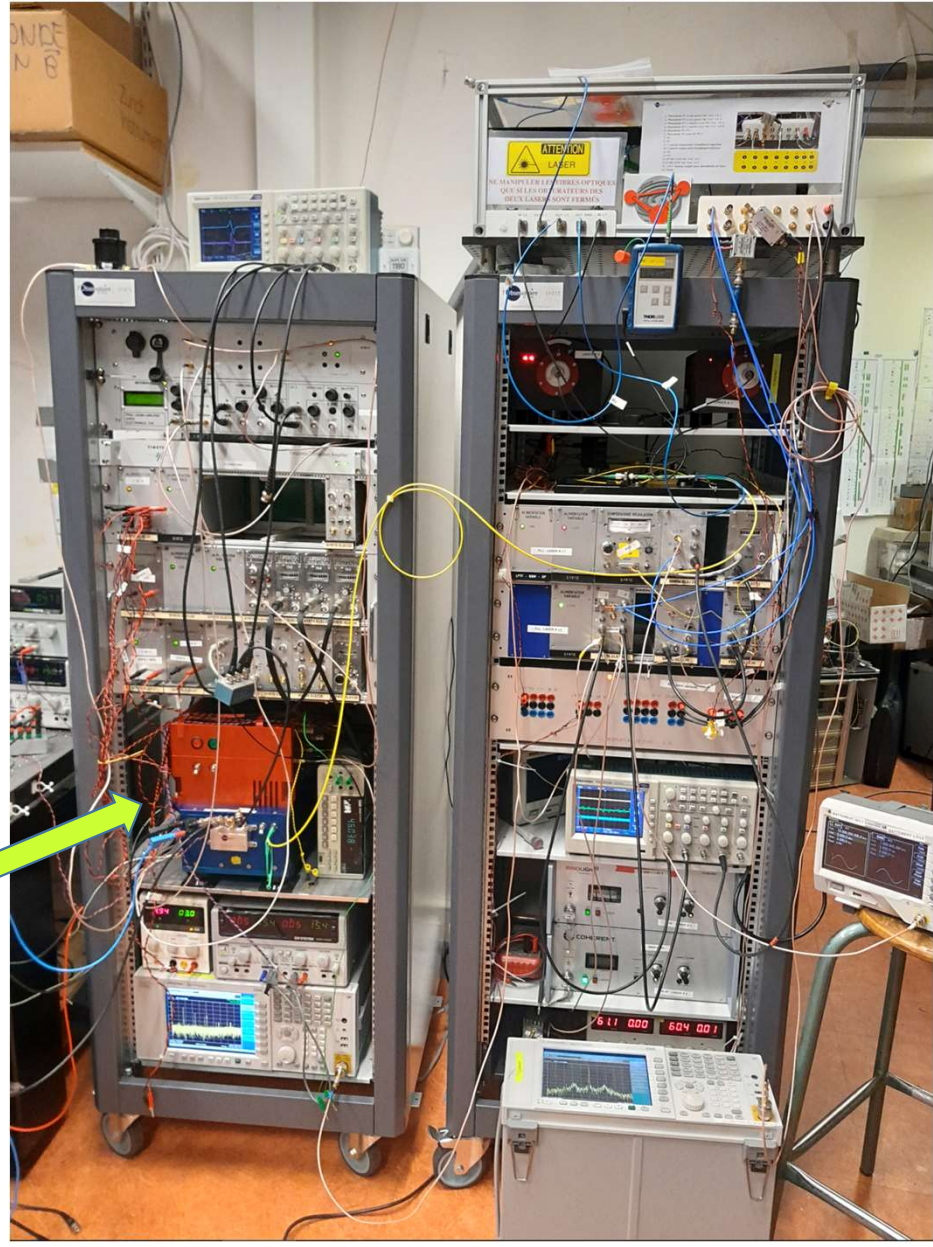
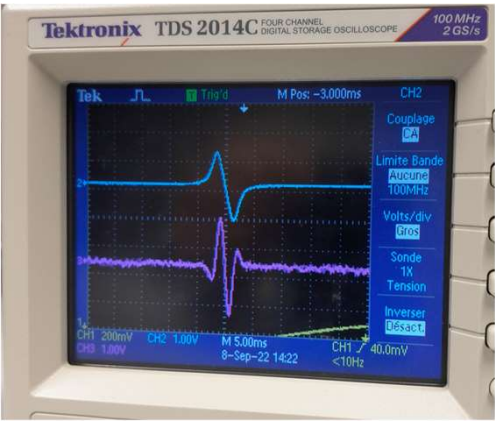
Le besoin pour les tests sol de LISA (2)



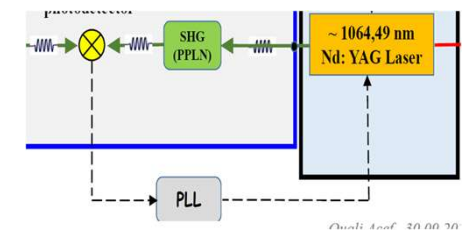
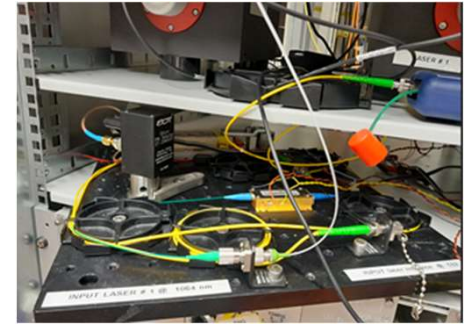
Laser de référence / Iode
(Volume 2 x 15 l)



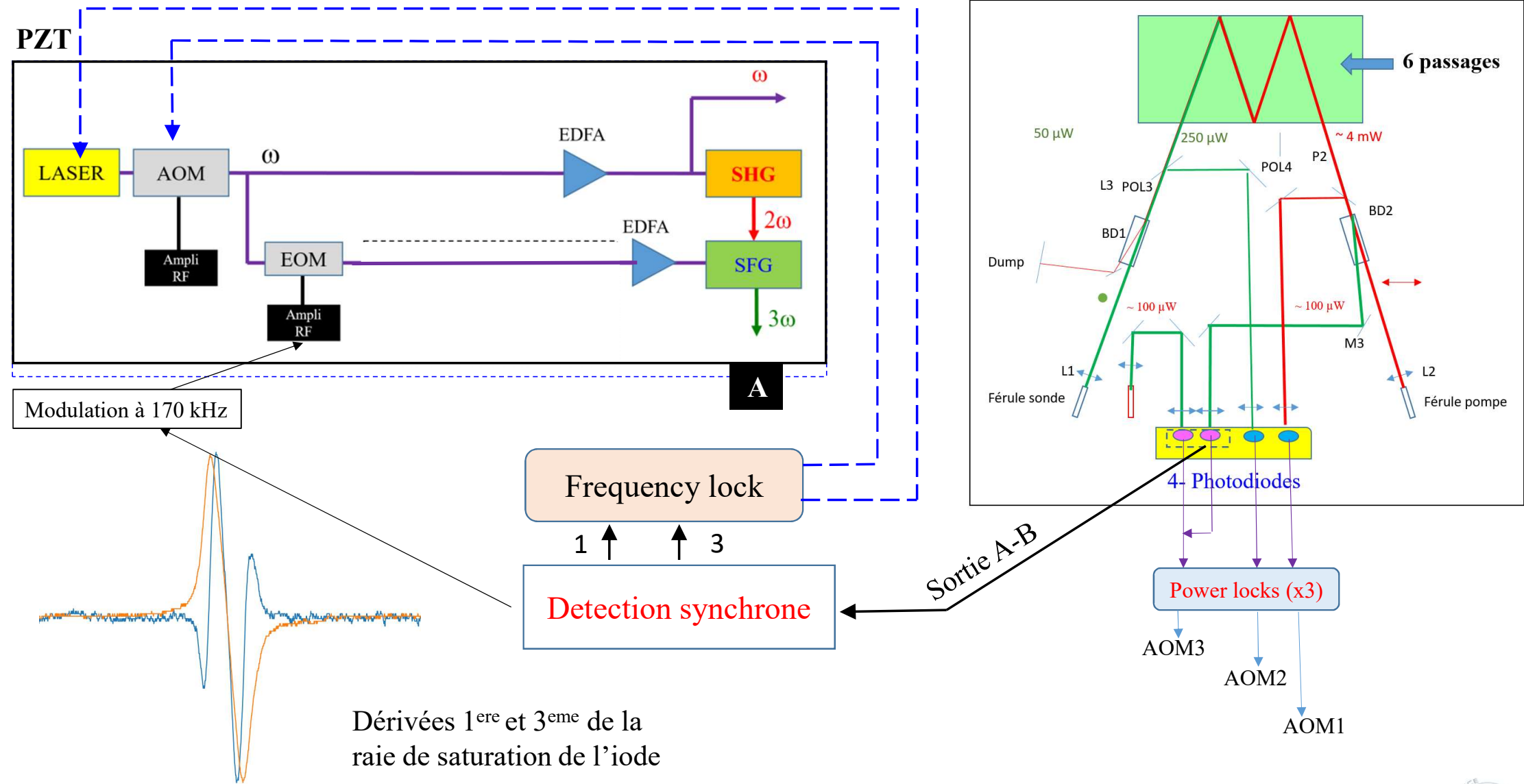
Lasers Nd: YAG < 30 Hz/√Hz

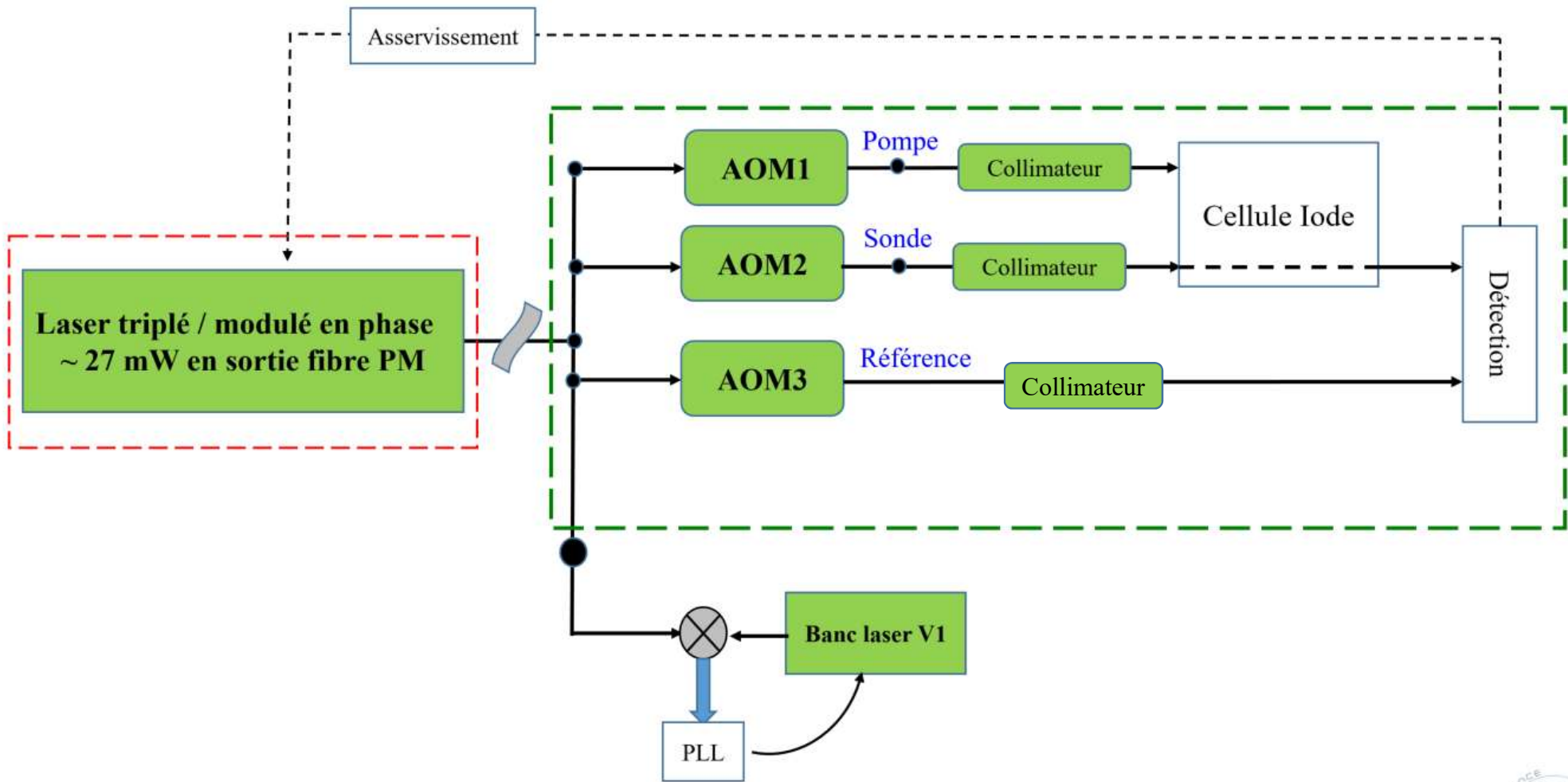


Laser triplé en fréquence
Asservi sur l'iodé à 532 nm
(2 x 15 l)

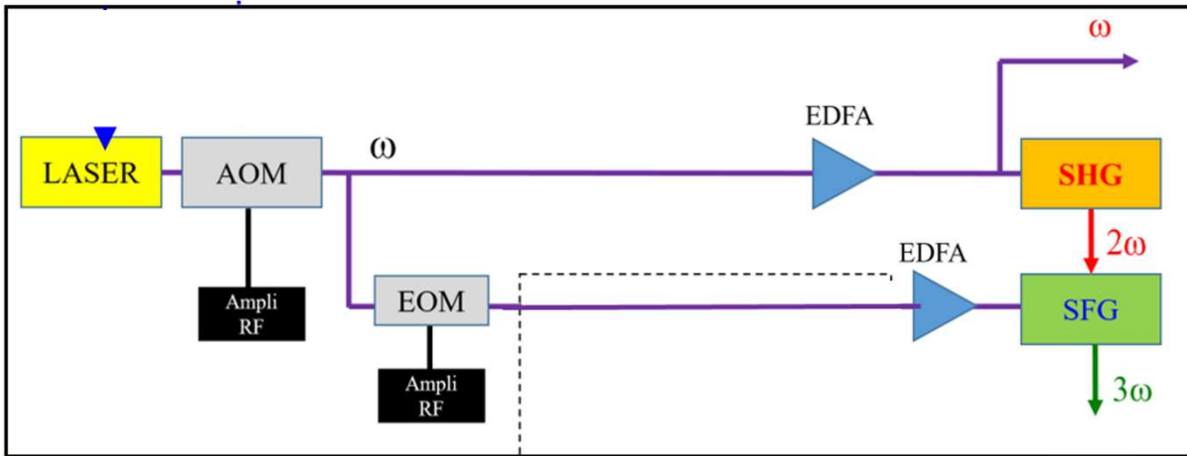


Le laser Telecom (Bande L) triplé en fréquence





Journées scientifiques PN GRAM, Nice 6-8 Nov. 2023



Les 2 cristaux NL en LiNbO3 sont couplés IN & OUT, par des fibres PM @ ω , 2ω & 3ω

SHG ($\omega + \omega \rightarrow 2\omega$) LiNbO3 PPLN-WG (NEL / Japon)

$L = 34 \text{ mm}$, $10 \times 10 \mu\text{m}^2$

$\eta \sim 90 \% \text{ W}^{-1}$

500 mW à 1596 nm, **220 mW @ 798 nm**

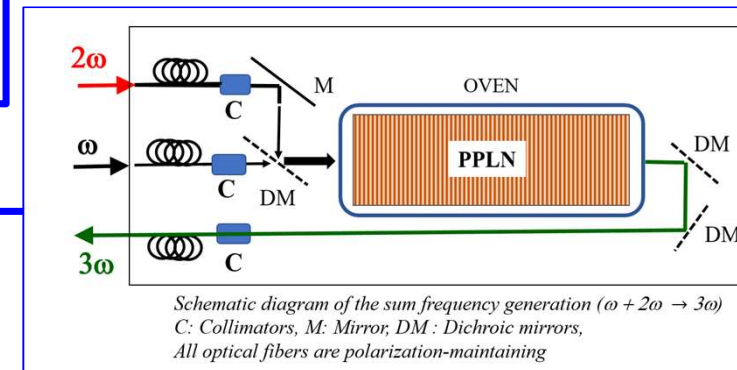
SFG ($\omega + 2\omega \rightarrow 3\omega$) LiNbO3 PPLN Cristal Bulk de Covesion (UK)

$L = 40 \text{ mm}$, $l = 5 \text{ mm}$, $h = 0.5 \text{ mm}$

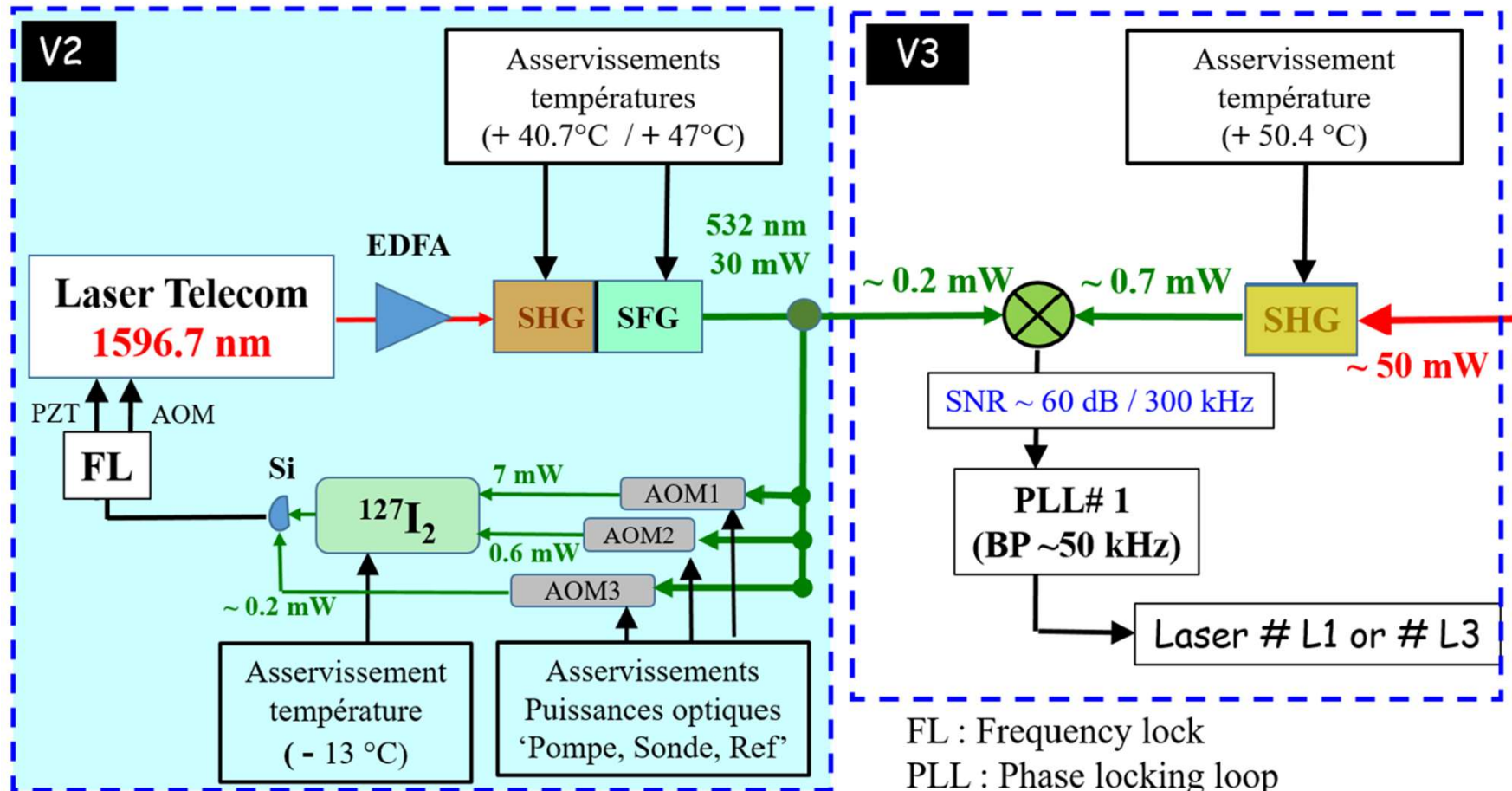
$\eta \sim 3.5 \% \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ **Kylia / EXAIL** (rendement à l'état-de-l'art)

1 W à 1596 nm, **220 mW à @ 798 nm** → **31 mW à 532 nm**

EXAIL



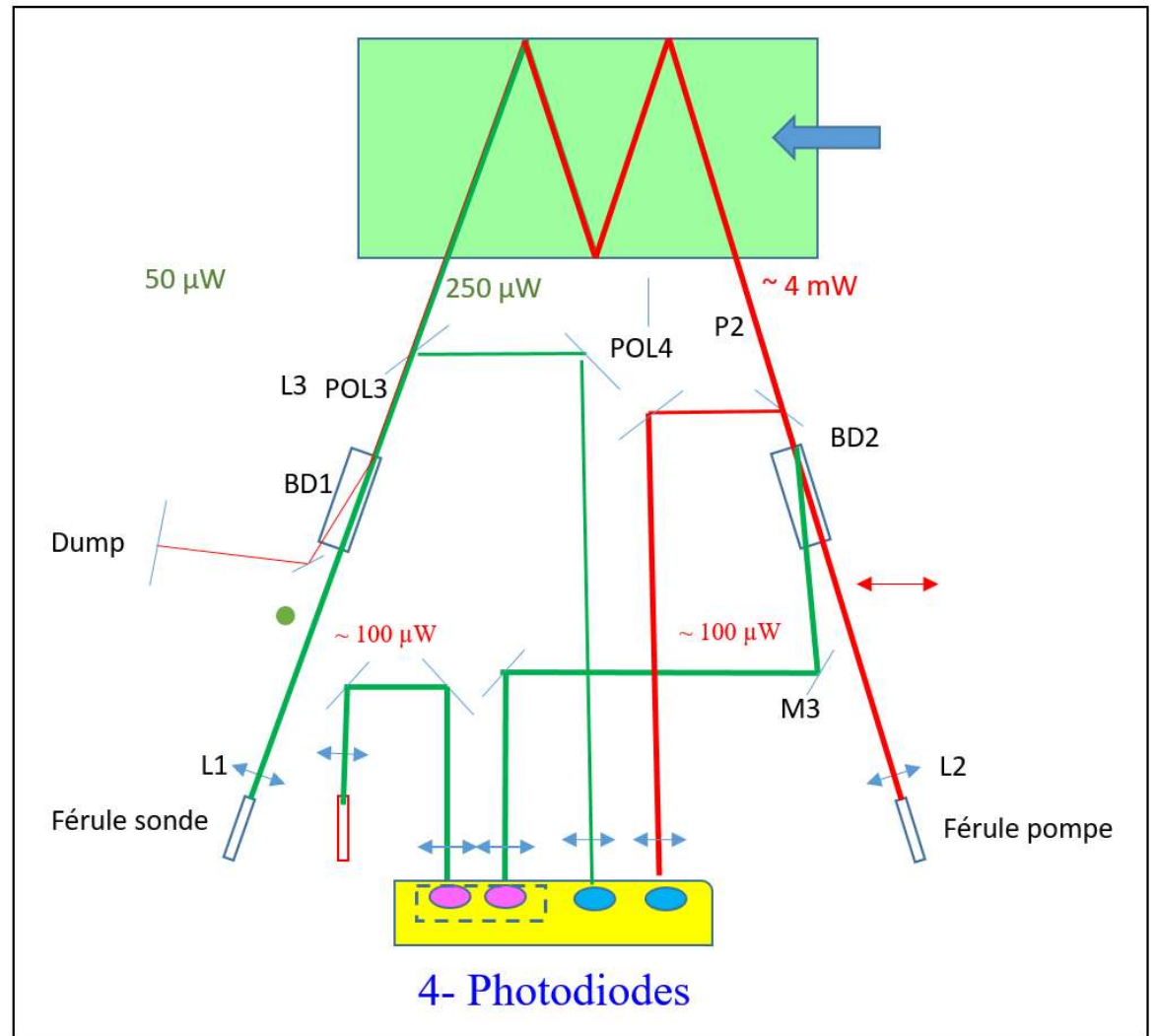
Le besoin pour les tests sol de LISA (2)



FL : Frequency lock
 PLL : Phase locking loop
 BP: Bande passante

La cellule d'iode

Cellule d'iode
15 x 8 x 4 cm³

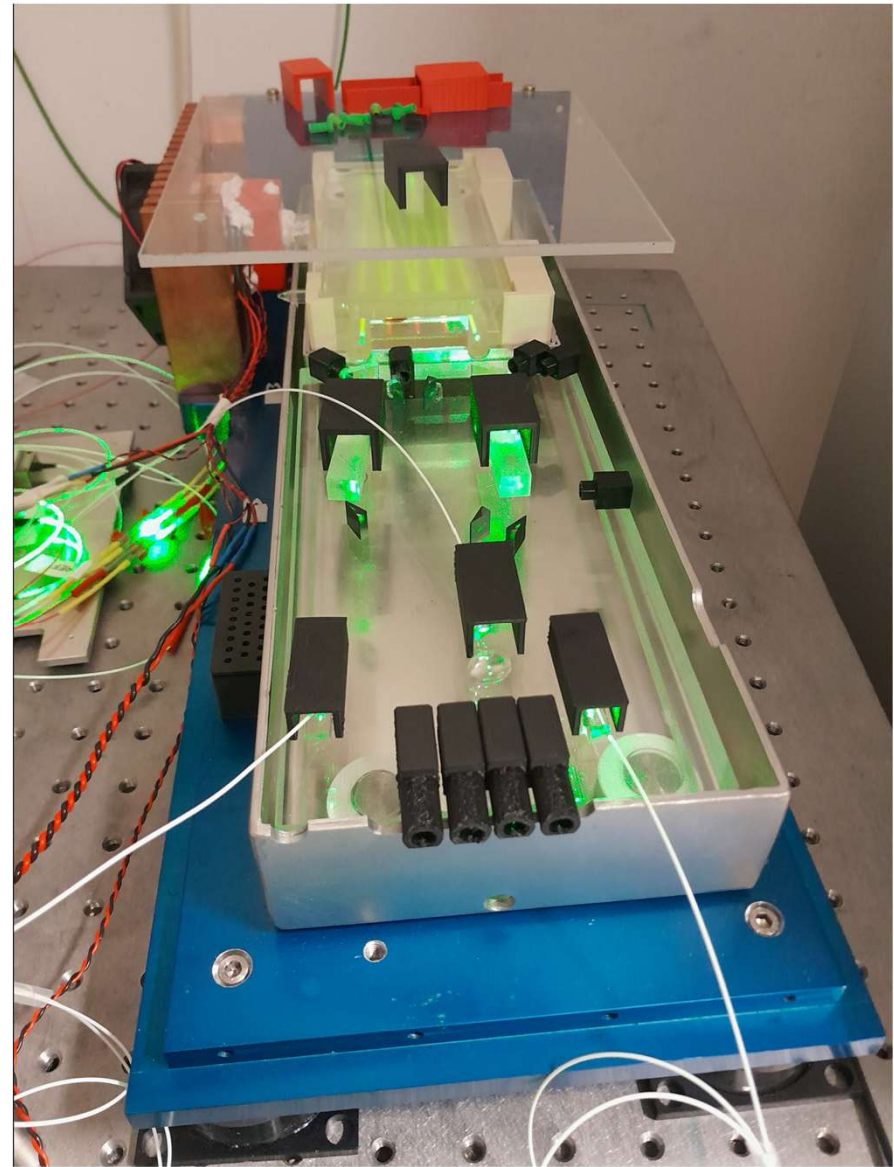
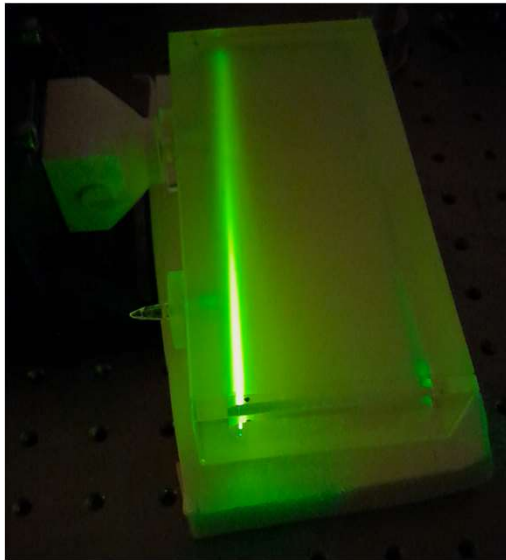


Faisceaux optiques pompe et sonde :

$\Phi \sim 2.4 \text{ mm}$

$Z > 2 \text{ m}$

Cellule d'iode refroidie à -13°C



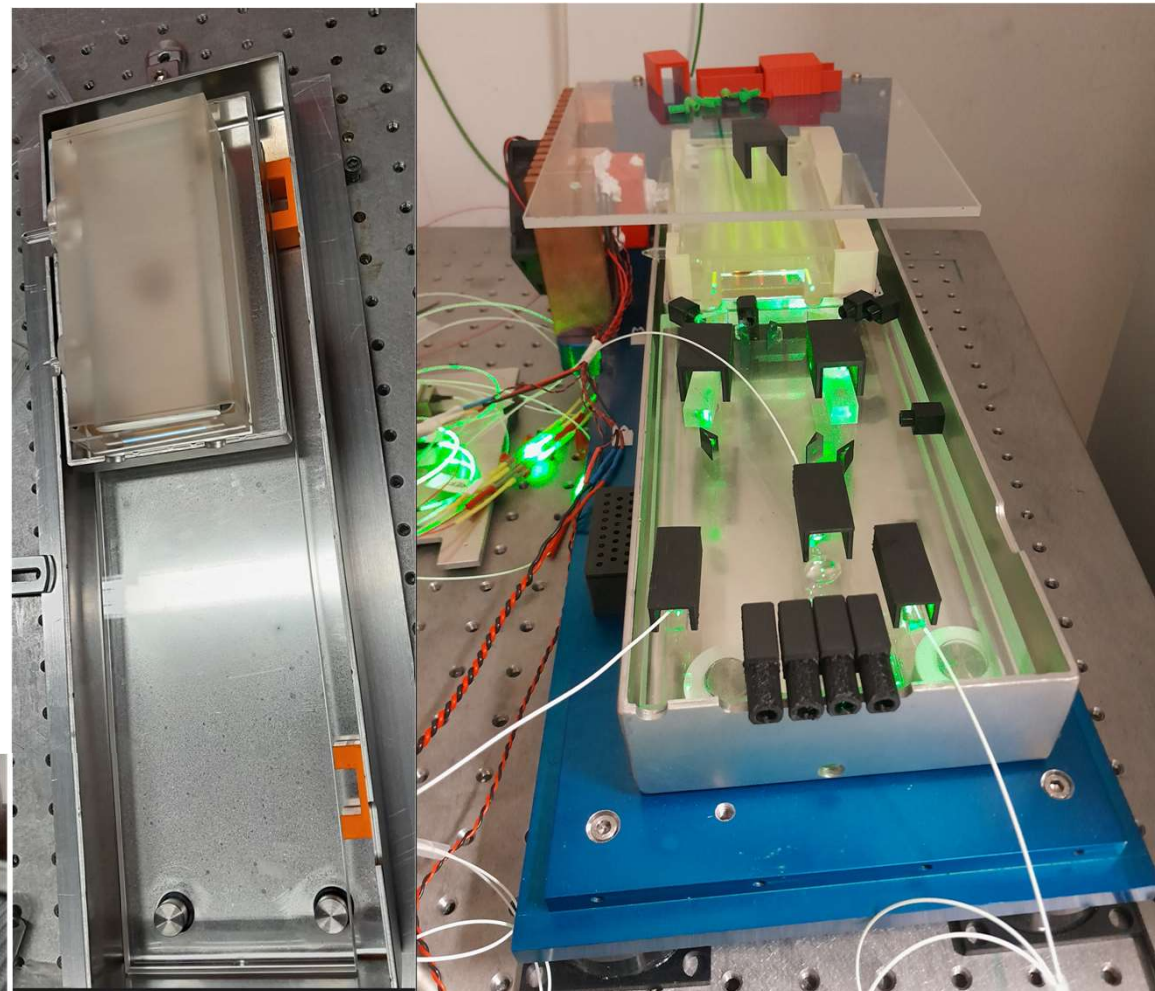
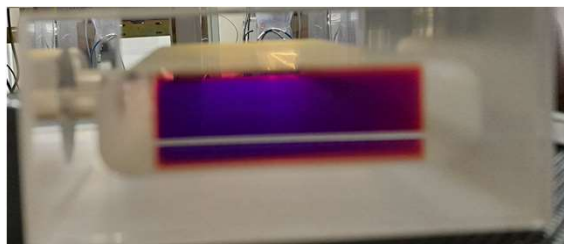


Besançon (France)



ISI
CAS
Tchéquie

Cellule d'iode
 $15 \times 8 \times 4 \text{ cm}^3$



SYRTE | Observatoire de Paris | PSL
Systèmes de Référence Temps-Espace

exail
TECHNOLOGIES

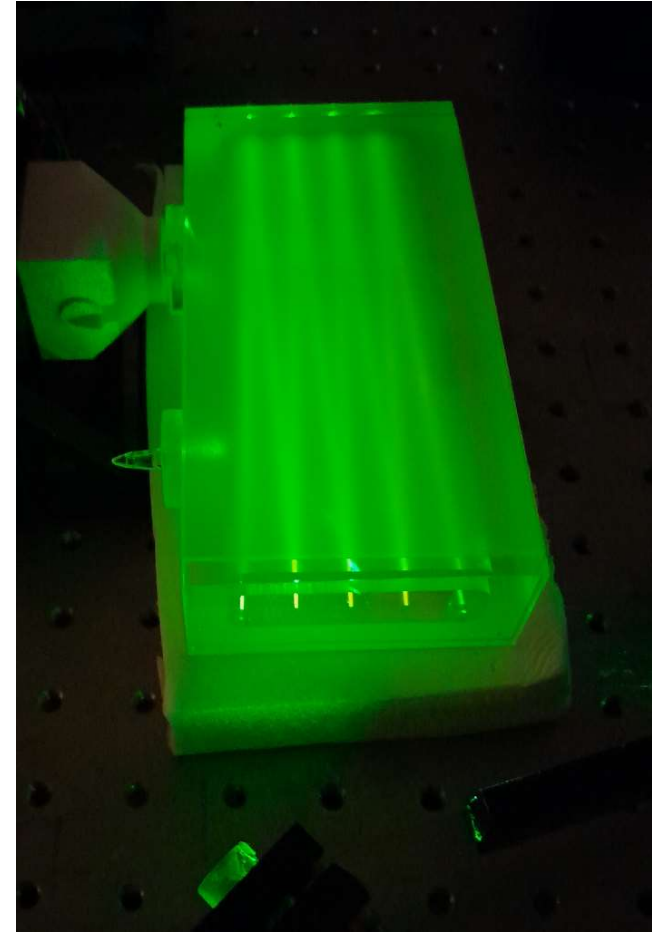
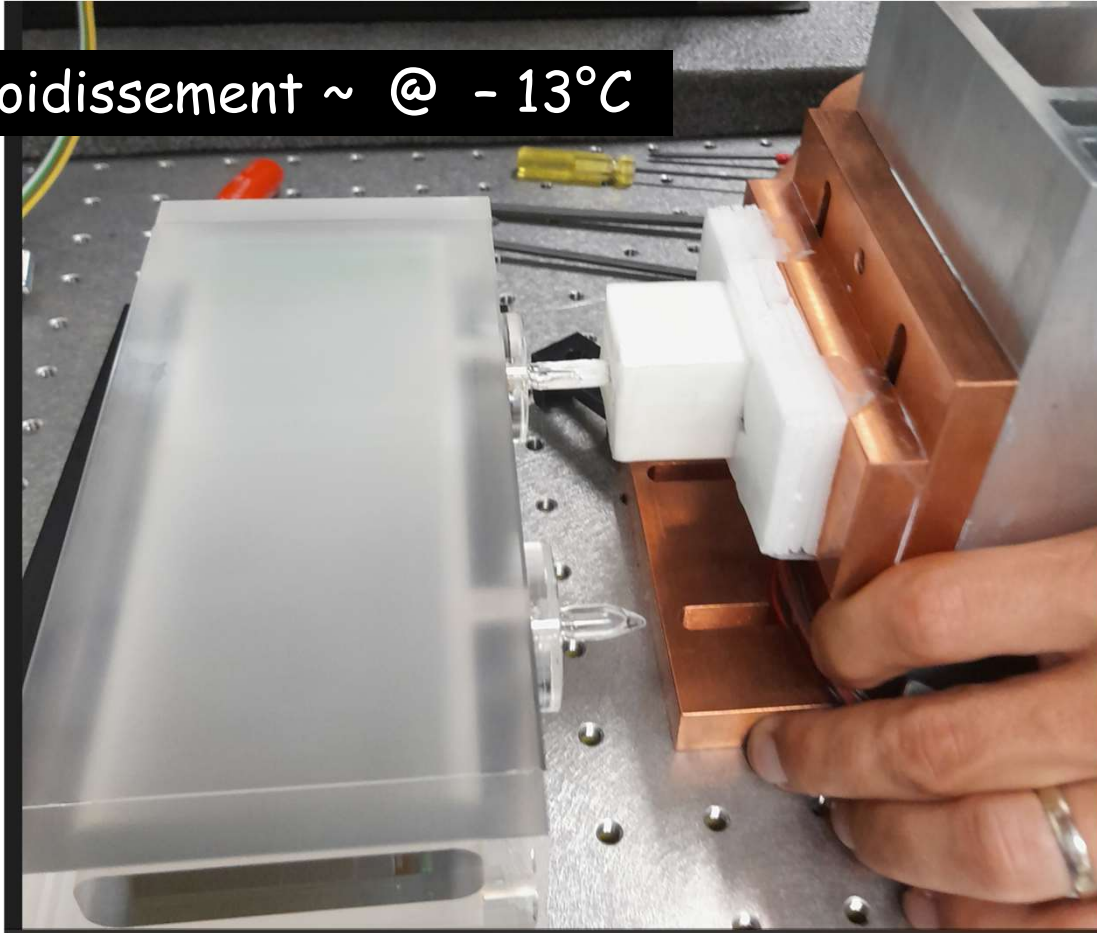
SYRTE | Observatoire de Paris | PSL
Systèmes de Référence Temps-Espace

Journées scientifiques PN GRAM, Nice 6-8 Nov. 2023

LISA
LISA

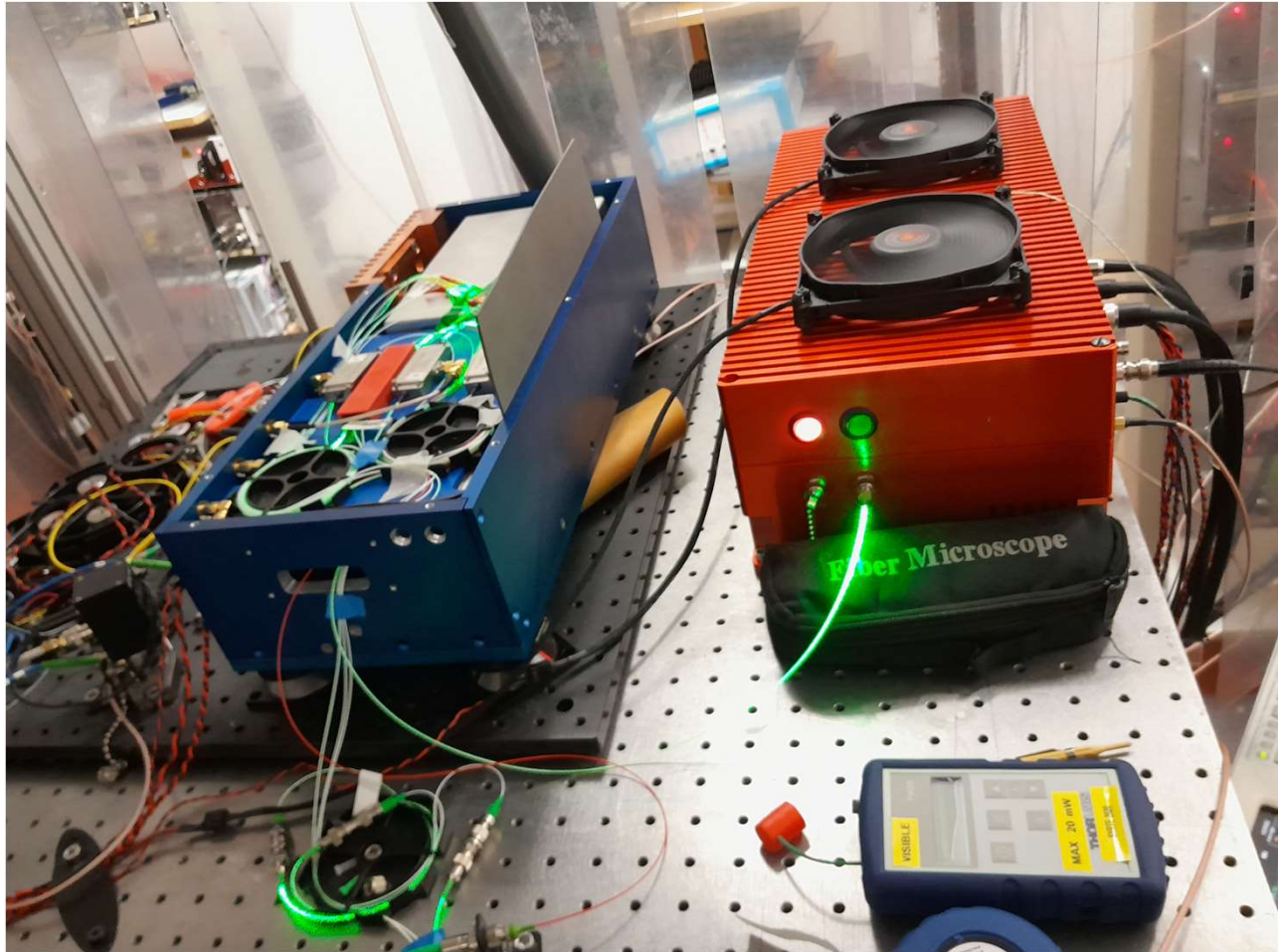
Le besoin pour les tests sol de LISA (2)

Refroidissement ~ @ -13°C



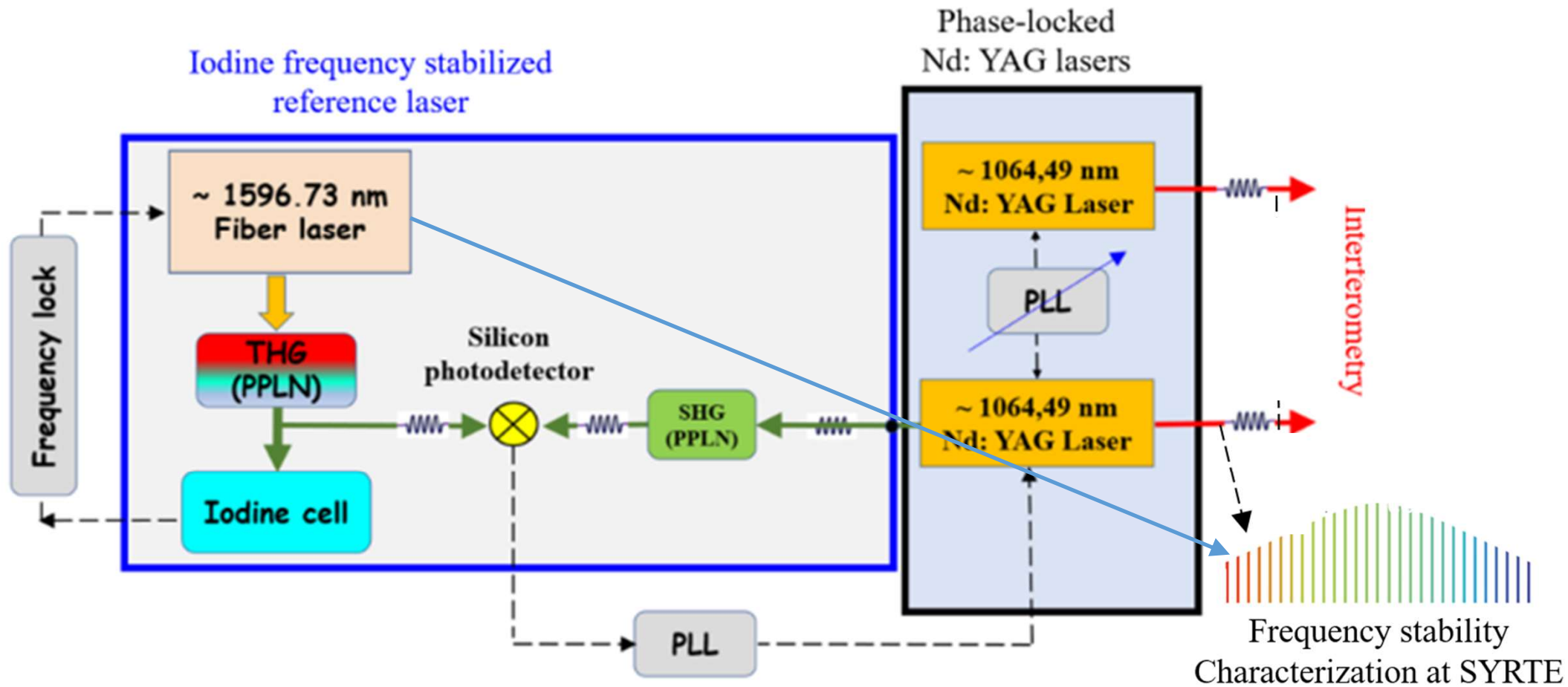
$$L_{\text{opt}} = 120 \text{ cm}$$

Le besoin pour les tests sol de LISA (2)



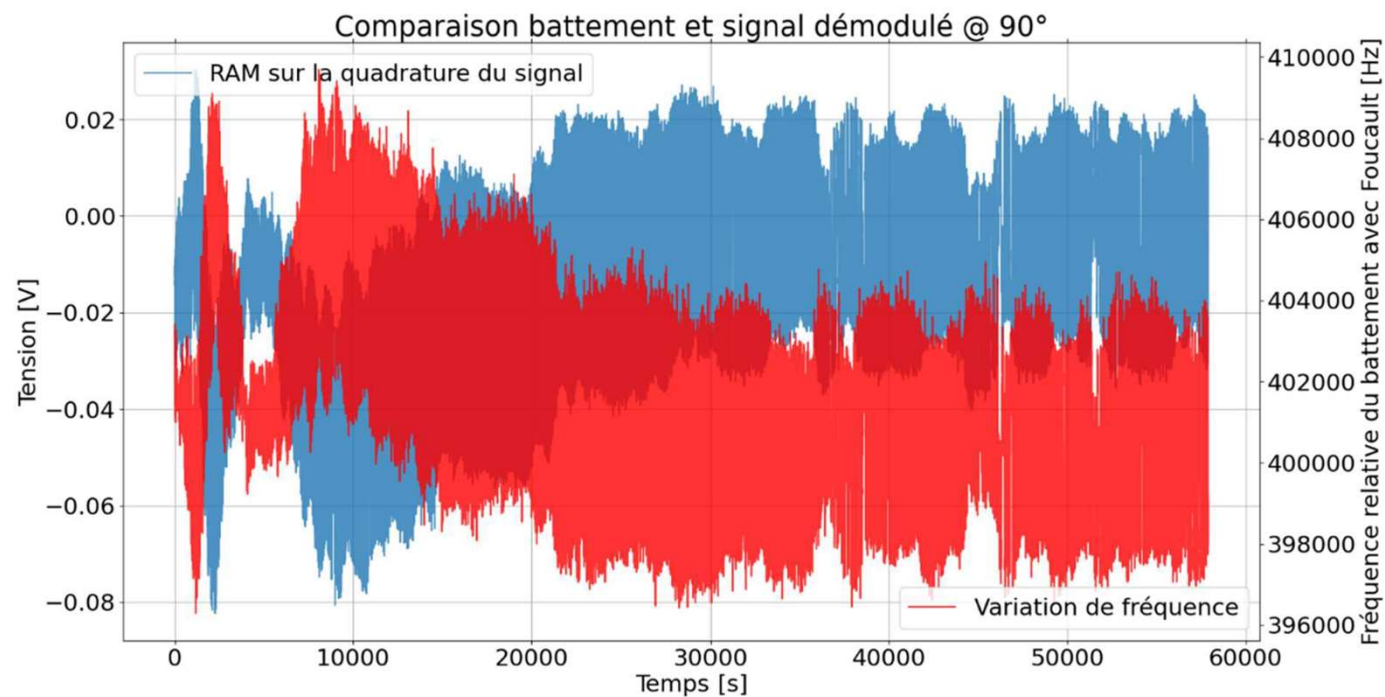
Caractérisation de la stabilité de fréquence du laser stabilisé sur l'iode

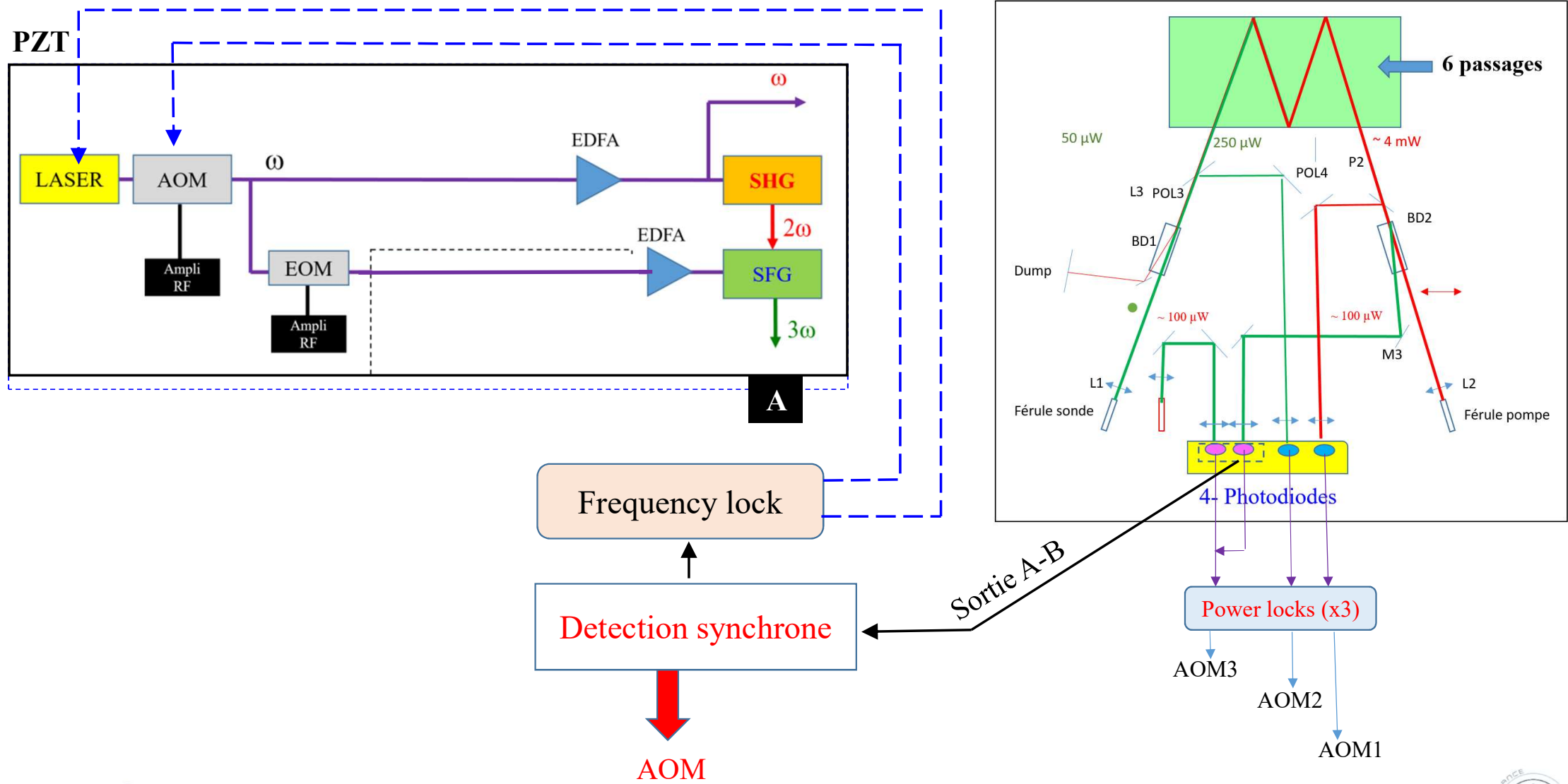
Le besoin pour les tests sol de LISA (2)



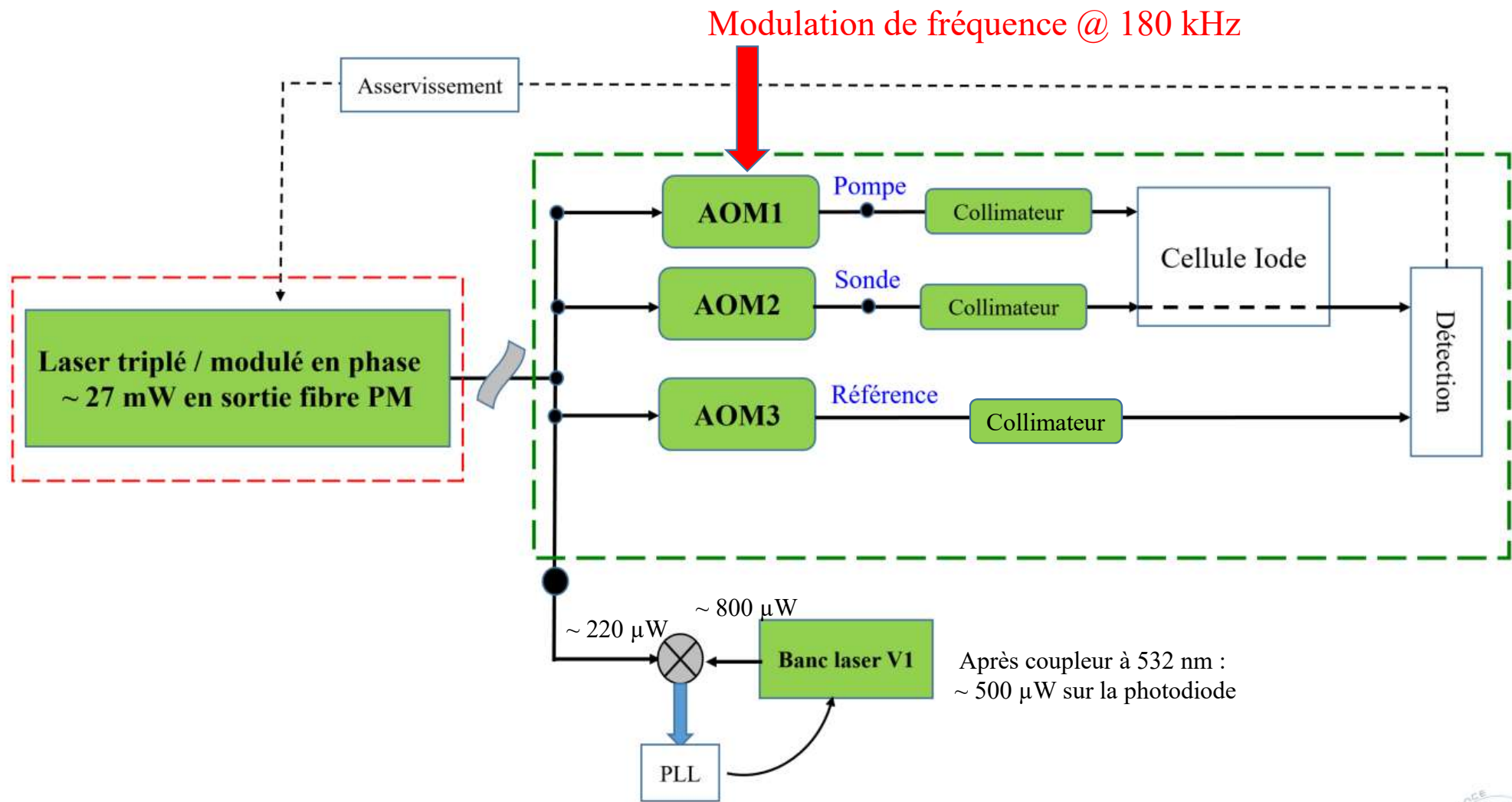
2 x liens optiques de 200 m de long chacun (@ 1 μm et 1.5 μm)

Battement de fréquence entre le laser stabilisé sur l'iode et le peigne de fréquence stabilisé indépendamment sur une référence (cavité + horloge optique)

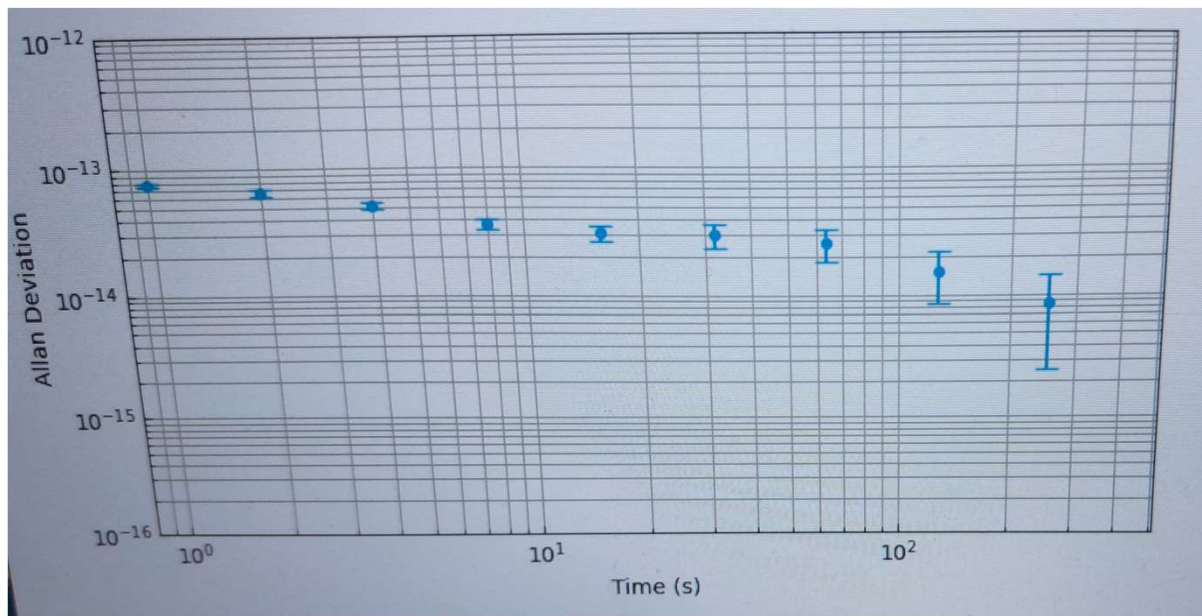
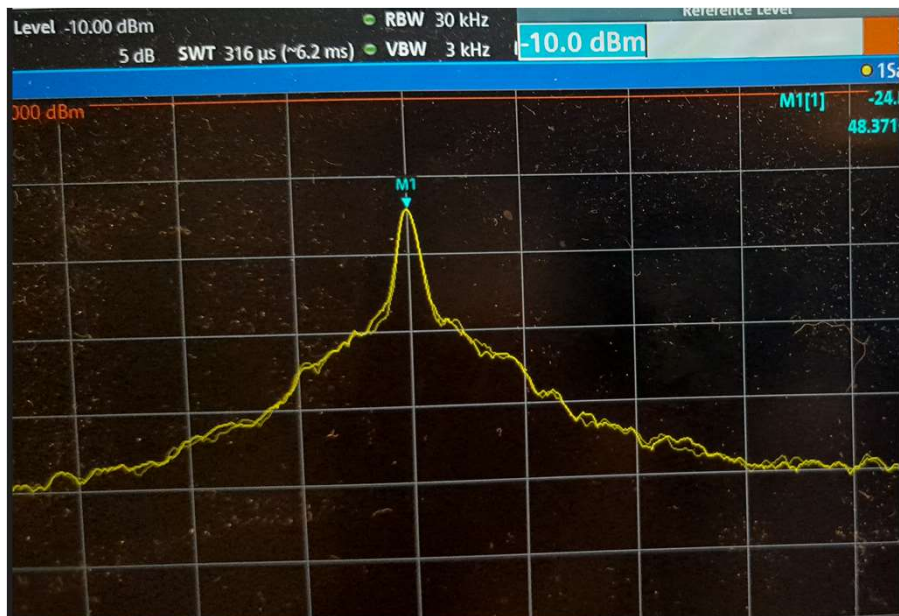




Developpement du banc laser triple en frequence

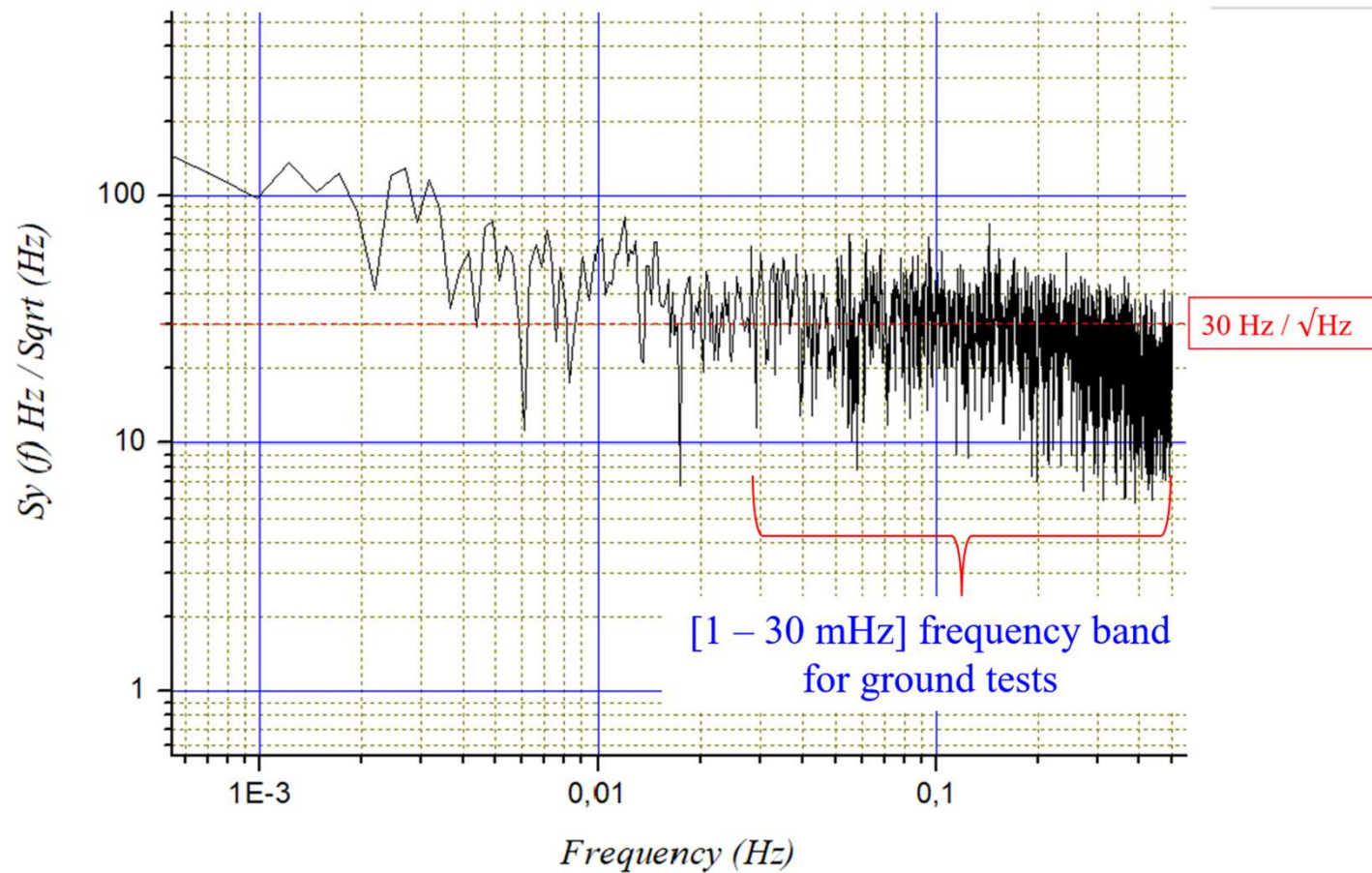


Journées scientifiques PN GRAM, Nice 6-8 Nov. 2023

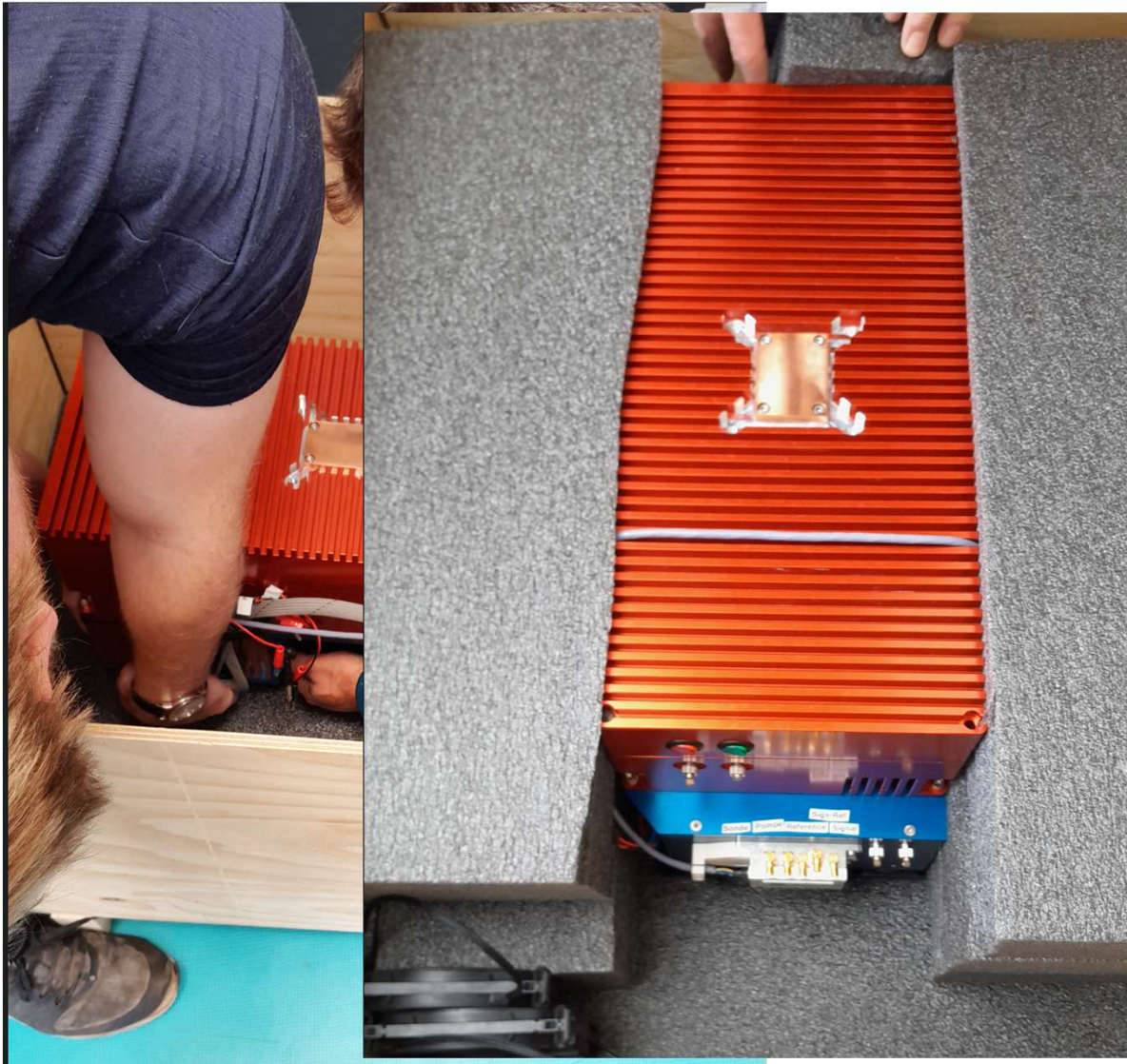


Frequency stability measurements dependent
 On the optical link with femto second laser

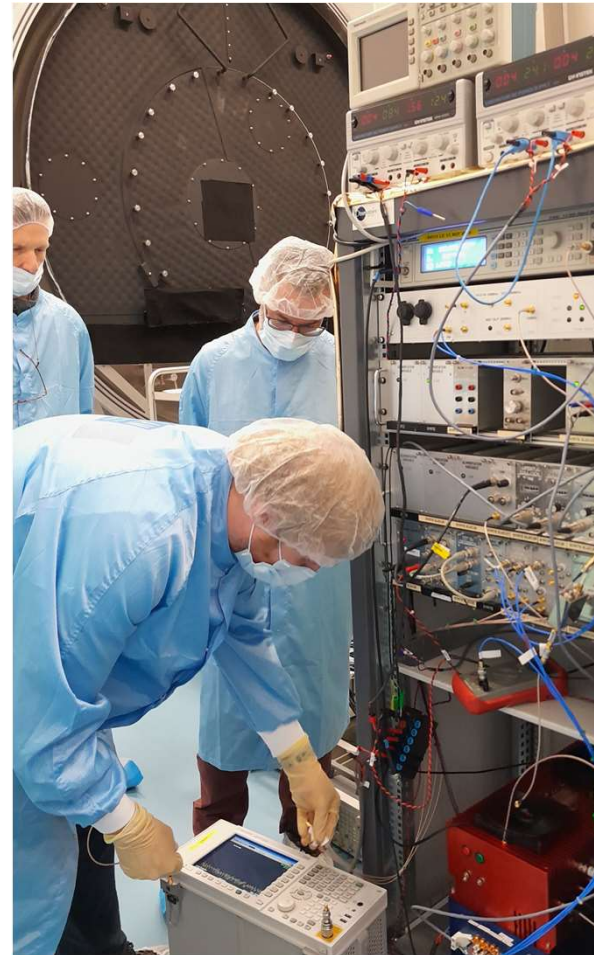
Mesure vs horloges SYRTE : $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$



Transfert du système lasers du SYRTE au LAM Marseille le 04/07/2023



Entrée dans la salle ERIOS le 05/07/2023

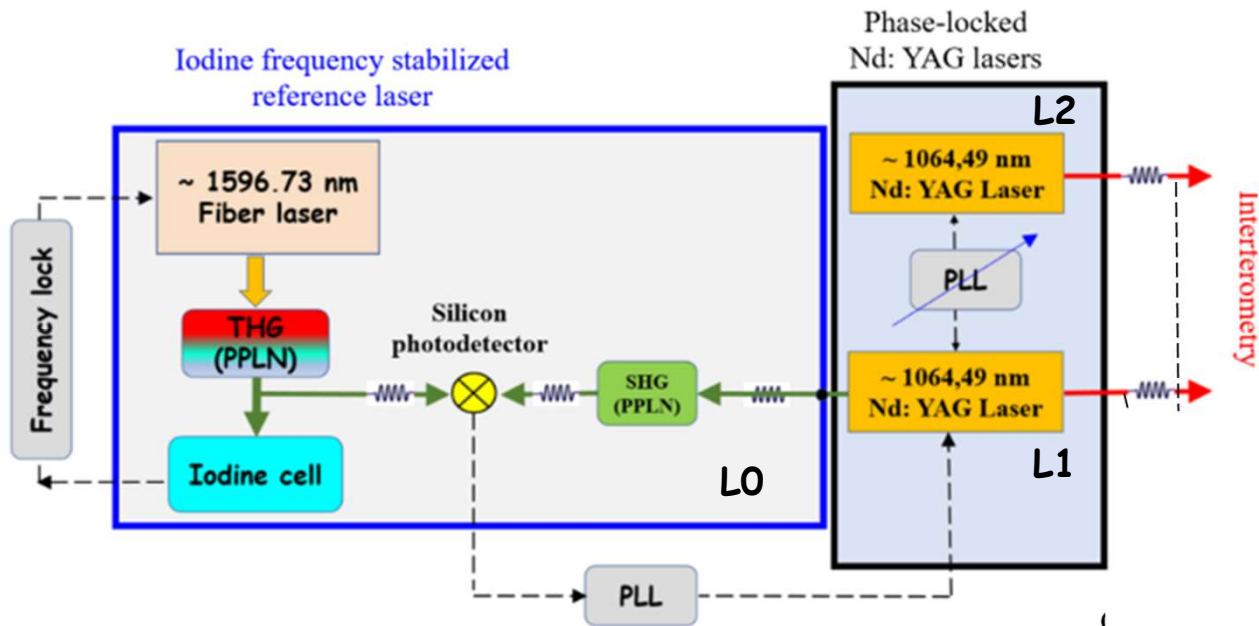


Entrée dans la salle ERIOS le 05/07/2023



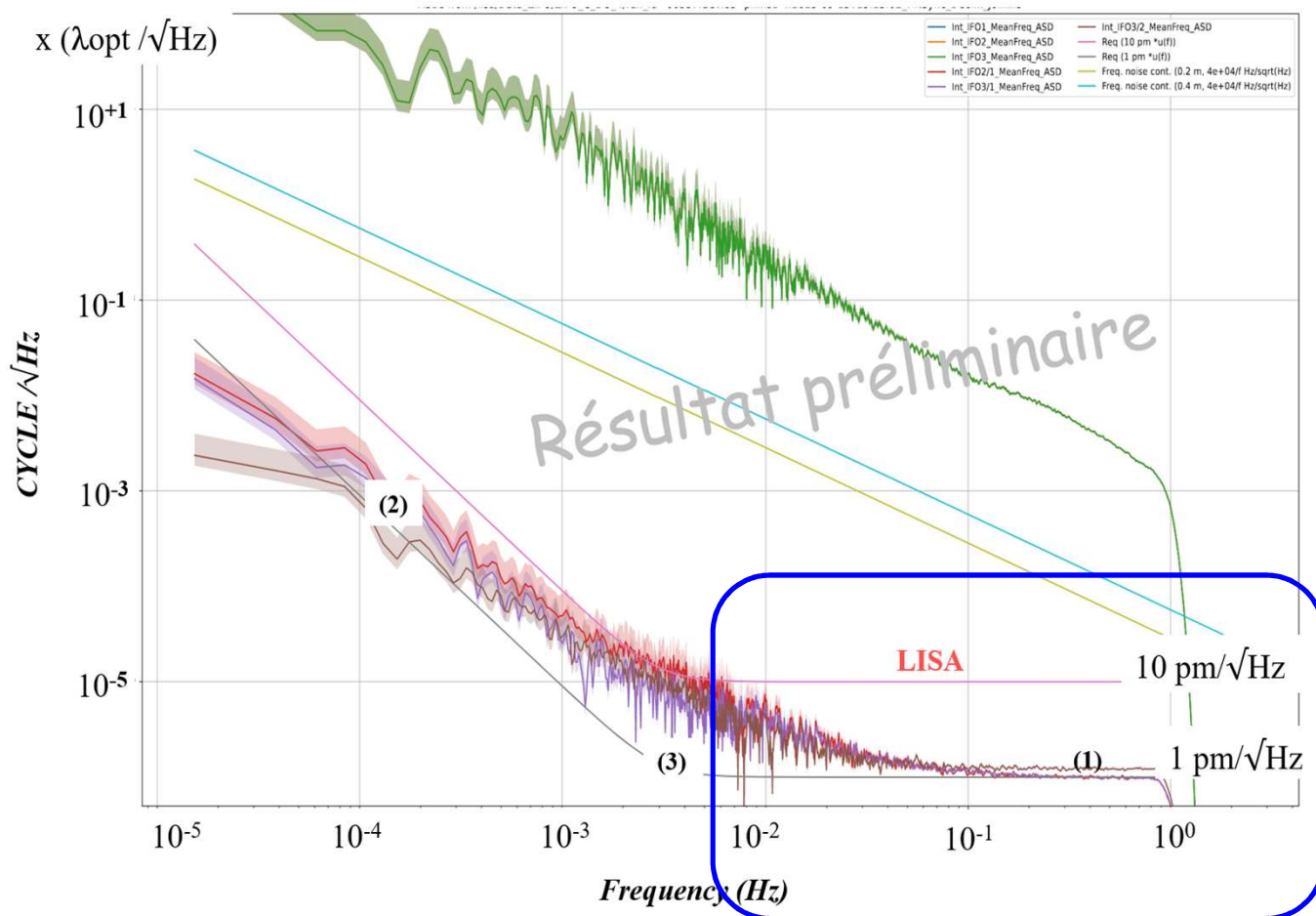
Entrée dans la salle ERIOS le 05/07/2023





En résumé, sont restés continument asservis

- Laser Triplé en Fréquence et stabilisé sur l'iode = LO
- Le laser Nd: YAG maitre (L1) asservi en phase sur LO
 - Du 06/07 au 13/07 (puis congés)
 - Du 26/08 au 08/09 (Maintenance électrique au LAM)
 - Du 10/09 au 28/09 (Fin de la phase B1 du projet)
- Asservissement en phase L2 /L1 ON / OFF toutes les 15 h pour les besoins du projet



Résultat répétable pendant les 3 semaines de tests sous vide au LAM

Consortium LISA-France :
 APC, ARTEMIS, CEA, CPPM, Institut FRESNEL, LAM, SYRTE, CNES

Fin de la campagne de mesures interférométriques (Phase B1) le 28/09/2023



Conclusions / Perspectives:

- ✓ Le dispositif lasers développé au SYRTE satisfait le besoin pour la phase B1 (CNES) de LISA
- ✓ Le niveau de TRL atteint permet d'envisager un passage à un développement industriel
- ✓ Le système sera dupliqué, avec un durcissement technologique pour la phase B2 (~ 2025)

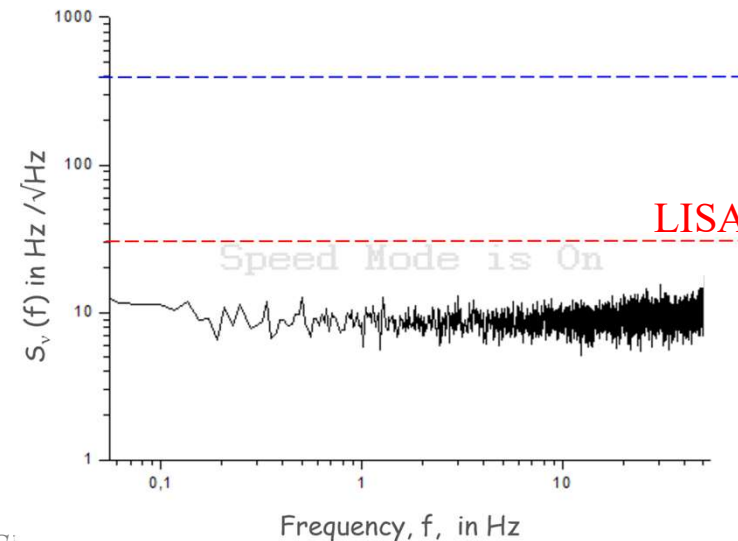
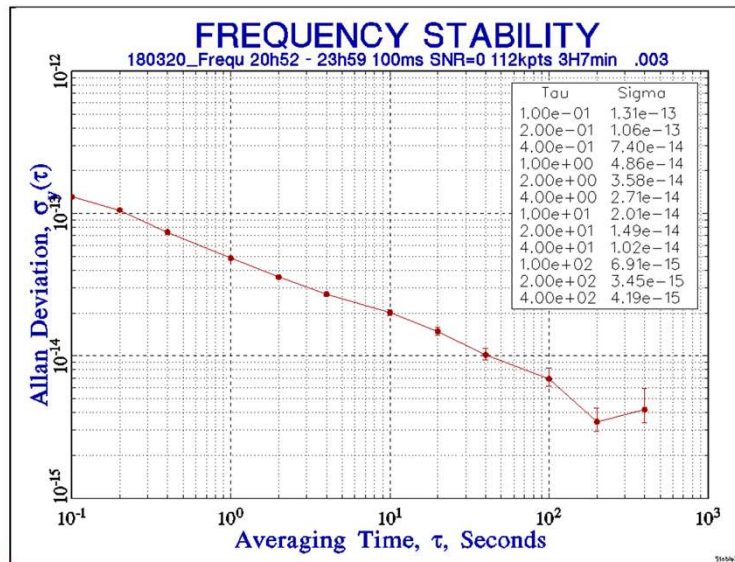
Merci pour votre attention

Le besoin pour les tests sol de LISA (2)

Justification :

- ❑ Le SYRTE a souhaité livré « ce qu'il savait faire »
- ❑ Développements avec succès de 2 système lasers basés sur le triplage de fréquence de laser Telecom
 - à 1542 nm (2014 – 2017)
 - à 1544 nm [2017 – 2020)
- ❑ Cavité optique (FP) plus sensible à l'environnement qu'une transition atomique
- ❑ Transport sur plusieurs sites du consortium LISA-France, plus risqué
- ❑ Nécessite une mesure / compensation (inévitable ?) dérive: Donc une référence supplémentaire

@ 1542 nm



Le besoin pour les tests sol de LISA (2)

Bandes C & L des Telecom optiques (x 3)

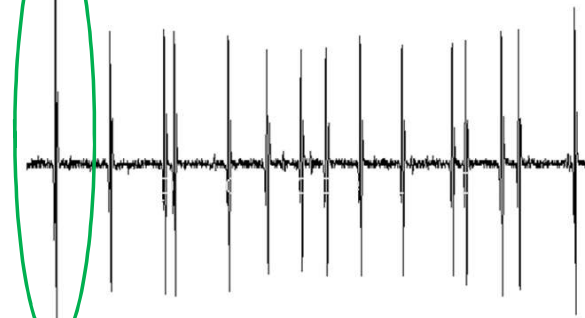
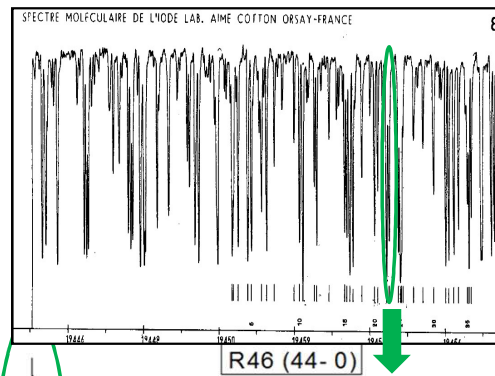
1530 nm

1560 nm

Limite de dissociation

$\lambda \sim 500$ nm

$\lambda \sim 730$ nm



> 10^5 raies de $^{127}\text{I}_2$ disponibles
➤ Intenses et étroites entre 510 nm et 540 nm

