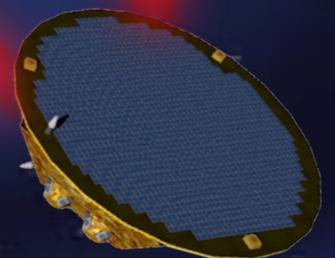


Cours LISA

MOSA AIVT

H. Halloin
07.01.2021

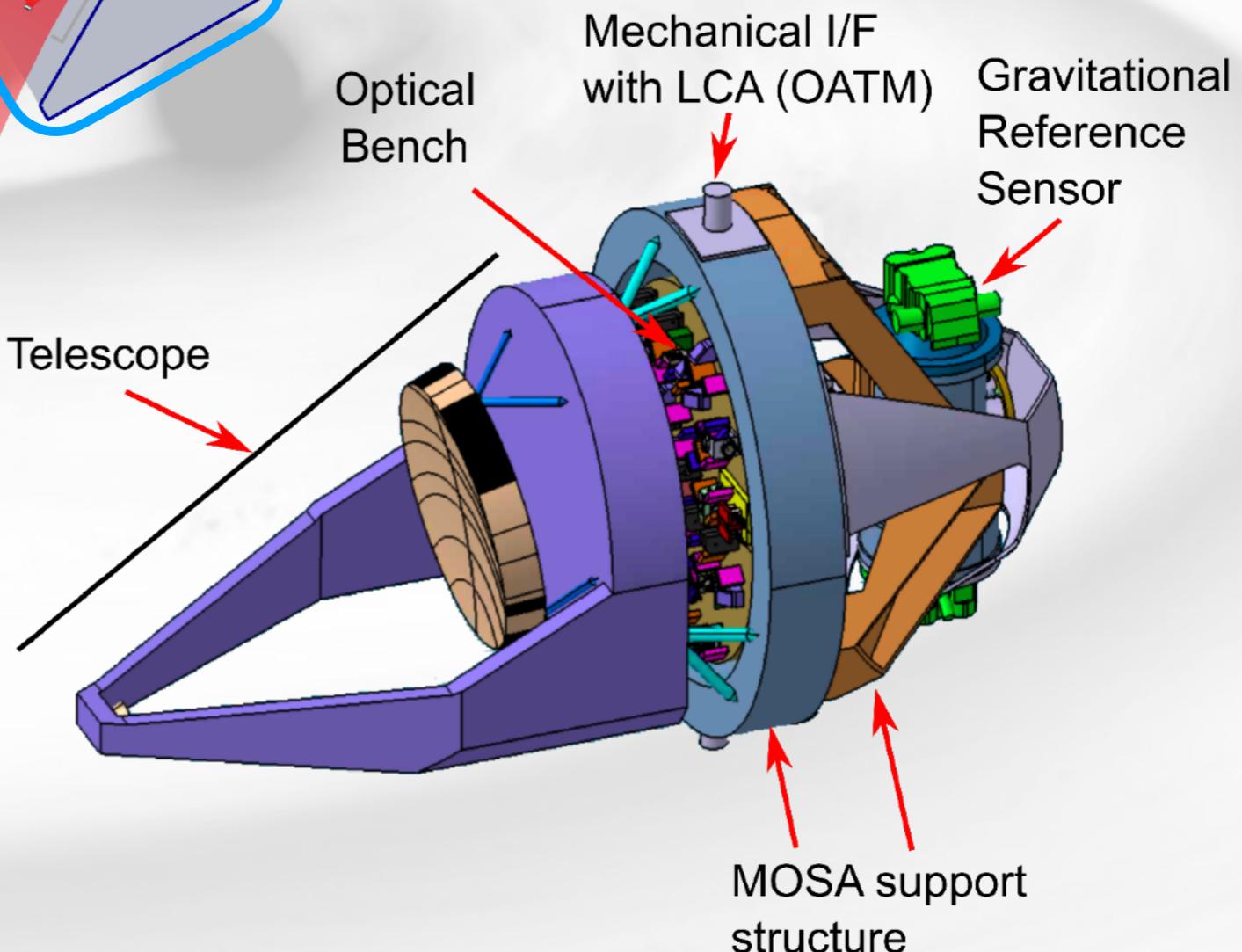
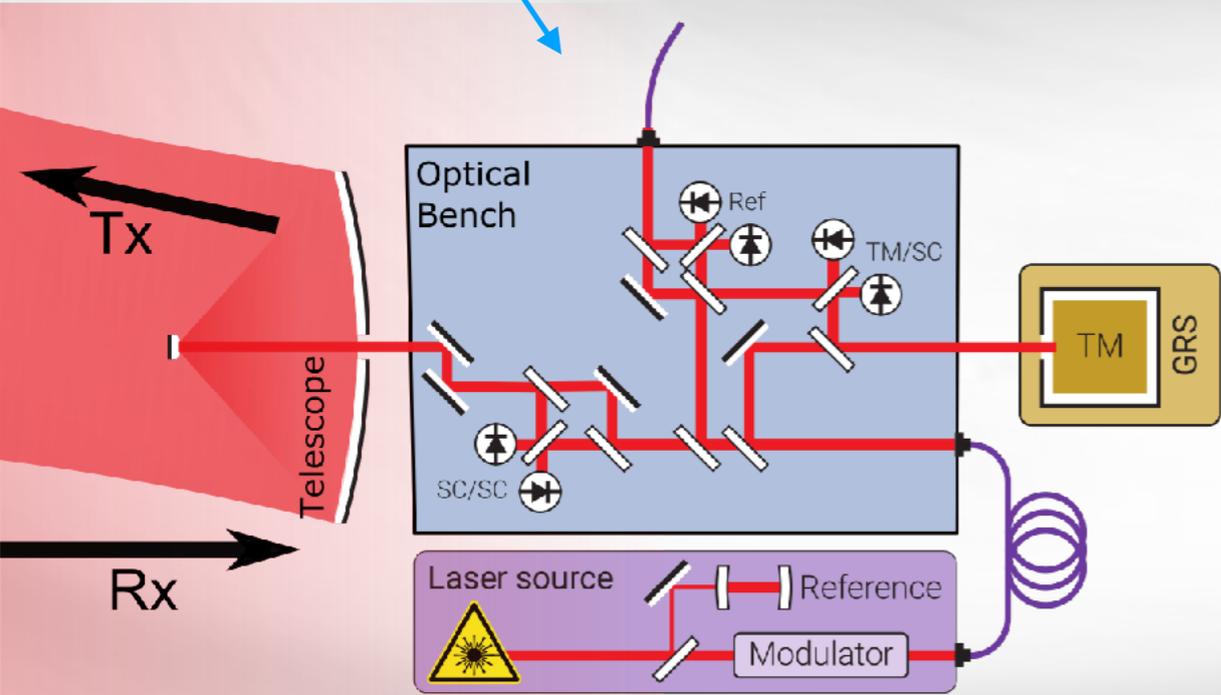
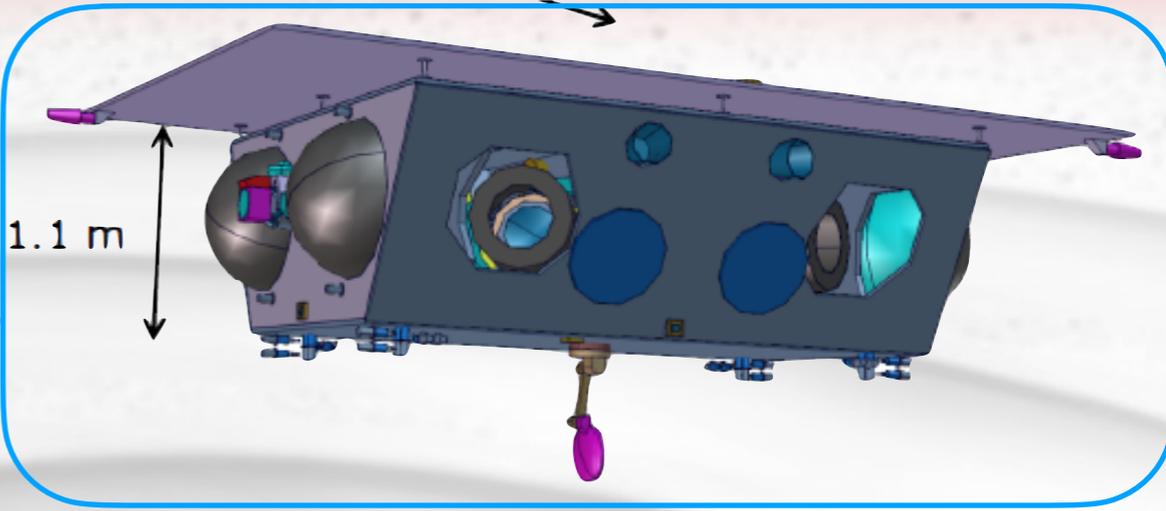
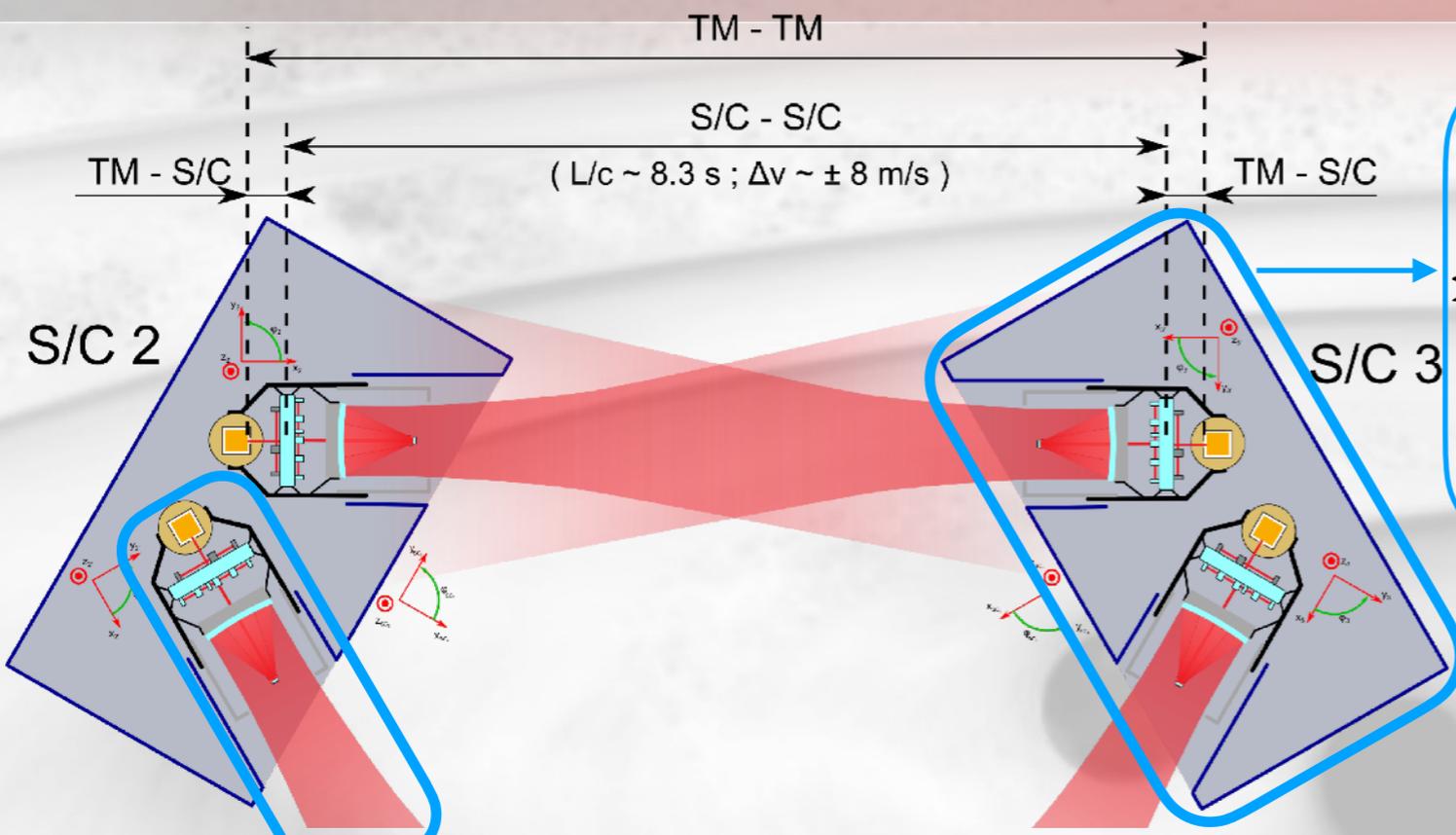


-  Flot AIVT
-  Bancs de tests optiques
-  Prototypage bancs AIVT, MIFO/ZIFO
-  Discussions



Flot AIVT

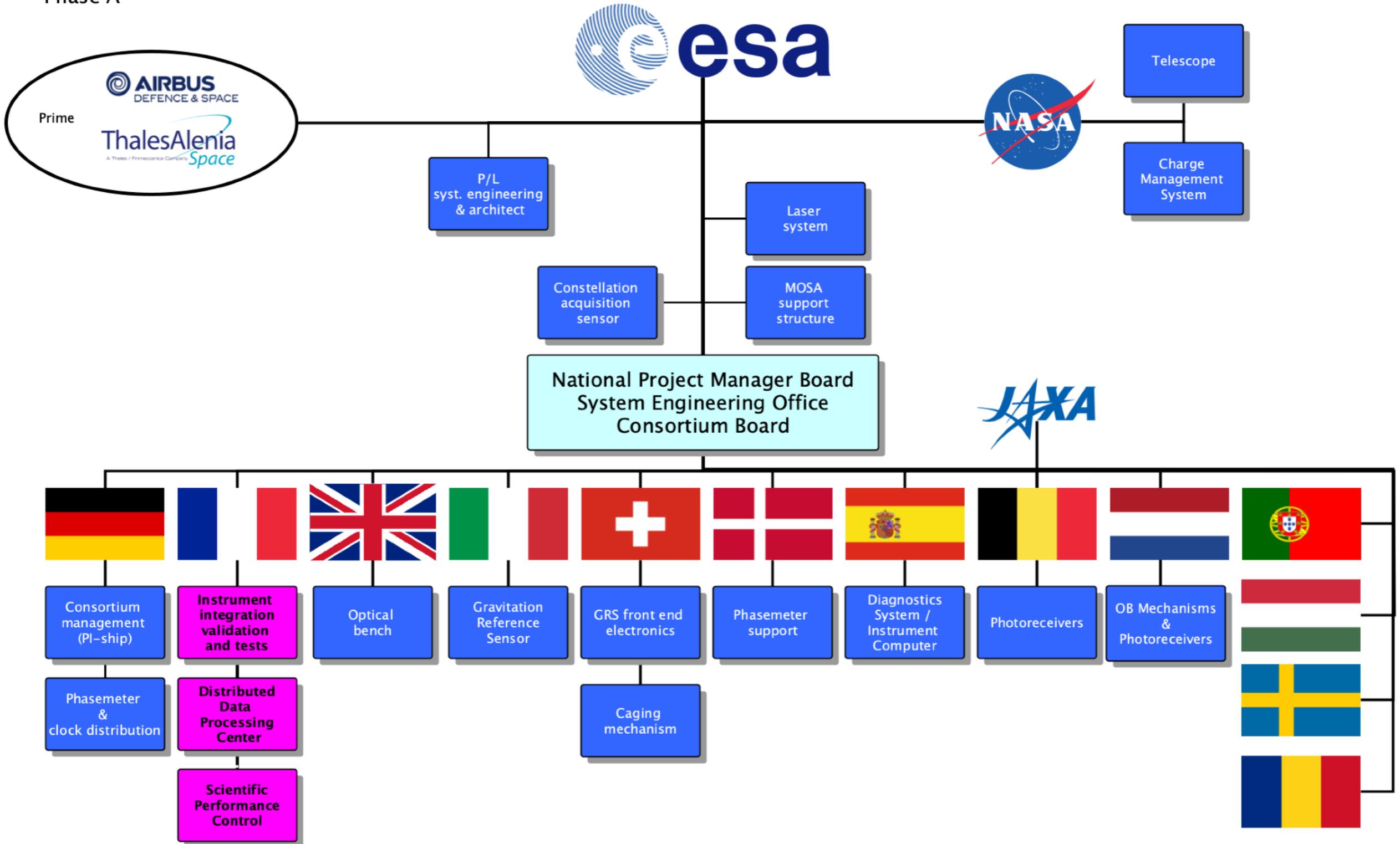
LISA instrument





What contribution for France ?

Phase A



- Planned main French contributions
- Distributed Data Processing Center
- MOSA AIVT & Perf. Control

LISA will be the first instrument of its kind

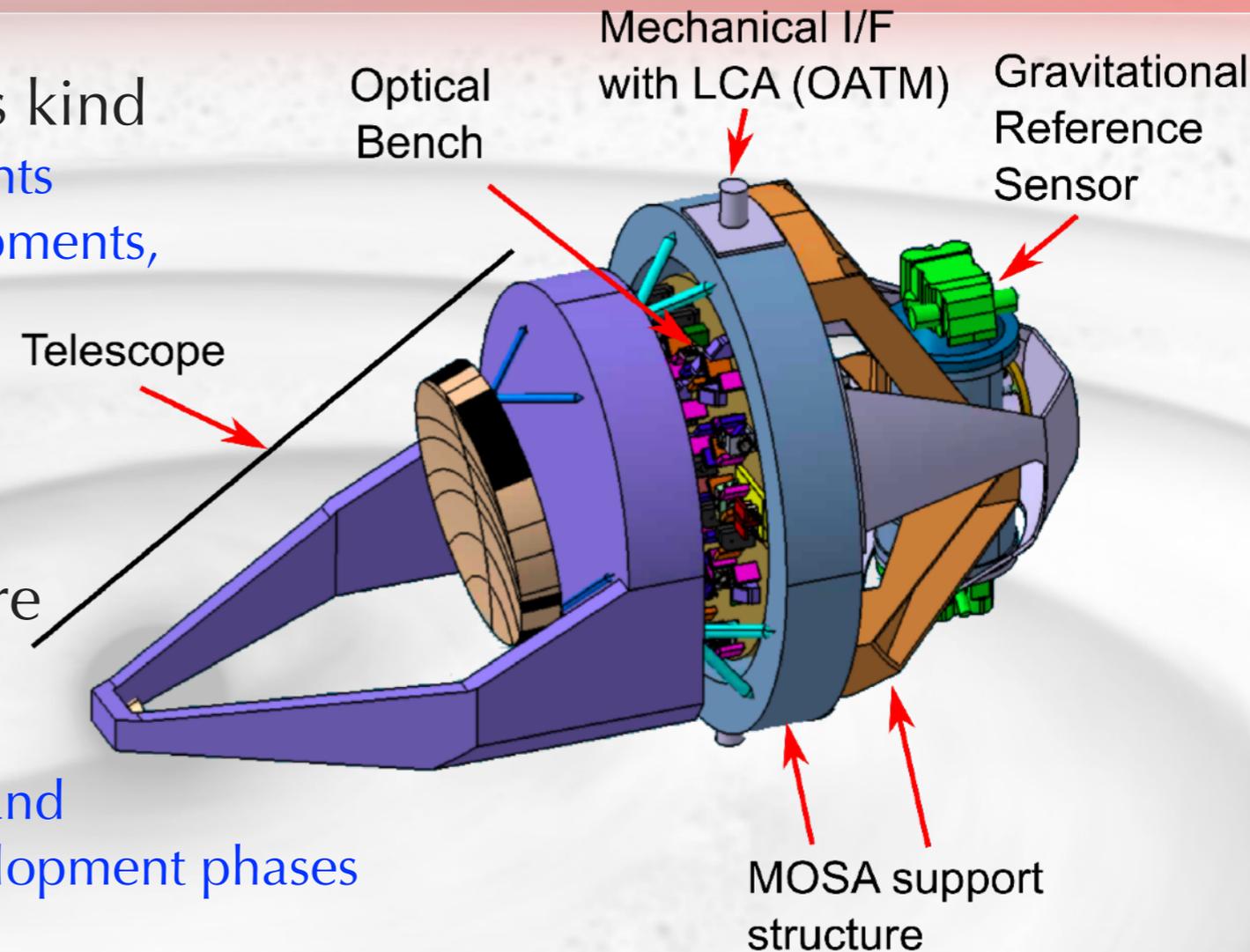
- Not a collection of separate instruments
- Combination of finely designed equipments, forming a Mkm-scale instrument

LISA science return depends on the in-depth performance characterisation of the metrology core

- Importance of the AIVT and scientific performance modelling
- Crucial activity giving high visibility and involvement in early instrument development phases

Integration and tests in close collaboration with industries

- 10 MOSAs to integrate and validate (1 STM, 1 EQM, 1 PFM, 5 FMs, 2 spares)
- Research institutes : development of optical metrology test benches and strong involvement in the EQM characterisation
 - Experience on MOSA testing transferred to industry with PFM
- Industries : integration procedures and semi-serialisation of FMs & spares AIVT
 - The research institutes still follow the process and interpret the measurements

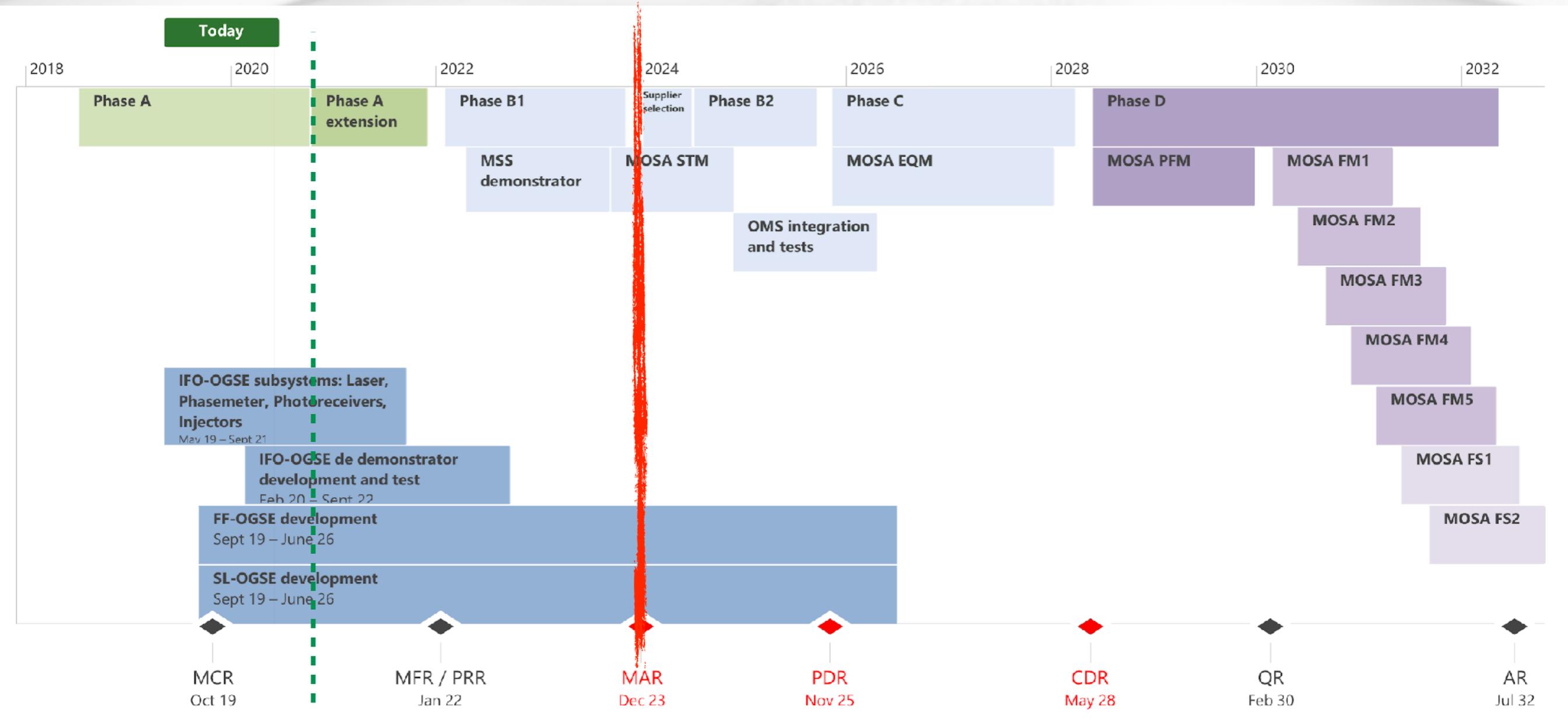


Proposition de plan AIVT MOSA

Doc de référence : LISA-LFRA-INST-TP-001

4 phases

- STM** (Structural and Thermal Model) —> validation mécanique & thermique
- EQM** (Engineering and Qualification Model) —> validation fonctionnelle et perfos complète + qualification spatiale
- PFM** (Proto-Flight Model) —> Mises à jour mineures et re-qualification (si besoin)
- 5xFM** (Flight Model) + **2xFS** (Flight Spares) —> Modèles de vol + redondants (MOSA gauche & droit), tests d'acceptance



Hypothèses et contraintes

-  Flot d'intégration 'générique' indépendant (pour l'instant) de l'architecture finale retenue pour le MOSA
 -  Pendant l'extension de Phase A : architecture MOSA sous responsabilité ESA et travaux concurrents Thales / Airbus
-  Limité au MOSA, il y a d'autres phases AIVT en amont et en aval :
 -  Amont : Sous-systèmes (OB, GRS, Mécanismes, Photorécepteurs, etc), Tests OMS (Optical Metrology System)
 -  Aval : LCA (LISA Core Assembly : Montage des deux MOSA ensemble), Satellite, etc
-  Avionique Instrument (i.e. boîtiers de contrôle + lasers) intégrés et testés séparément
 -  Pas inclus dans le MOSA
 -  Utilisation de GSEs (Ground Supports Equipments) pour l'AIVT MOSA
-  Rôle central de l'EQM dans la validation des performances et qualification instrument
 -  Campagne de tests extensive au niveau EQM
 -  Tests de validation et d'acceptance uniquement au niveau (P)FM/FS
-  Intégration quasi-parallèle des MOSAs FMs
 -  Nécessaire pour respecter les délais de production
 -  Contraintes : éviter la duplication des GSEs et infrastructures complexes, grouper les différents tests au même endroit autant que possible

Défis

-  Capacité de valider les performances MOSA au niveau de stabilité requis
 -  Action en cours (MIFO/ZIFO + TTL-OB) pour valider le savoir-faire technique et les performances attirables en environnement représentatif
 -  Etudes de définition et dimensionnement en cours pour les GSEs optiques
-  Besoin d'un 'agrandisseur de faisceau' pour illuminer le MOSA (Far-Field Simulator)
 -  Hypothèse actuelle d'utilisation du modèle d'ingénierie NASA du télescope MOSA (—> A confirmer !)
-  Production rapide et 'à la chaîne' des 5 FMs + 2 FS
 -  Collaboration étroite requise entre CNES, labos (définition et supervision des tests de performance) et industriels (infrastructure d'intégration et serialisation)
-  Liens étroits avec l'architecture et ingénierie système MOSA
 -  Interactions amont (sous-systèmes) et aval (instrument et S/C)
 -  Validation des exigences techniques et performances scientifiques
 -  Retours d'expérience (LPF, AIVT des sous-systèmes, etc)
 -  Coordination dans la fourniture des GSEs de validation des sous-systèmes

Matrice de test 'système'

 Grandes catégories de tests

 Leur contenu et étendu peut dépendre du modèle (EQM, FM, etc.)

MOSA Test matrix	STM	EQM	PFM	FM & FS
Physical properties				
Mass, dimensions, I/F	x	x	x	x
CoG	x	x	x	x
Inertias	x	x	x	x
Fit check	x	x	x	x
Self-gravity measurement tests		x	x	x
Mechanical tests				
QSL	x ⁽¹⁾	x ⁽¹⁾	x ⁽¹⁾	
Sine	x ⁽¹⁾	x ⁽¹⁾	x ⁽¹⁾	
Acoustic/Random	x ⁽¹⁾	x ⁽¹⁾	x ⁽¹⁾	x ⁽¹⁾
Shock ⁽²⁾	x	x		
Microvibration Transfer Function	Covered by upper system level if necessary (TBC)			
Electrical/EMC tests				
Integration checks		x	x	x
Electrical test (power consumption, timing...)		x	x	x
Conducted EMC test		x	x ⁽³⁾	
Radiated EMC test	Covered by upper system level			
Self-compatibility test	Covered by upper system level			
Magnetic test		x	x	x
Thermal tests				
Thermal Vacuum Test	x ⁽⁴⁾	x ⁽⁴⁾	x ⁽⁴⁾	x ⁽⁴⁾
Thermal Balance Test	x	x	x ⁽⁵⁾	
Functional & performance tests⁽⁶⁾				
Functional & performance test		x	x	x
Optical alignment test		x	x	x
Health Check Test		x	x	x
Mechanism release test ⁽⁷⁾	TBD	TBD	TBD	TBD

Table 1: System test matrix

Phases AIT par modèle

STM : modèle représentatif de la conception mécanique et thermique

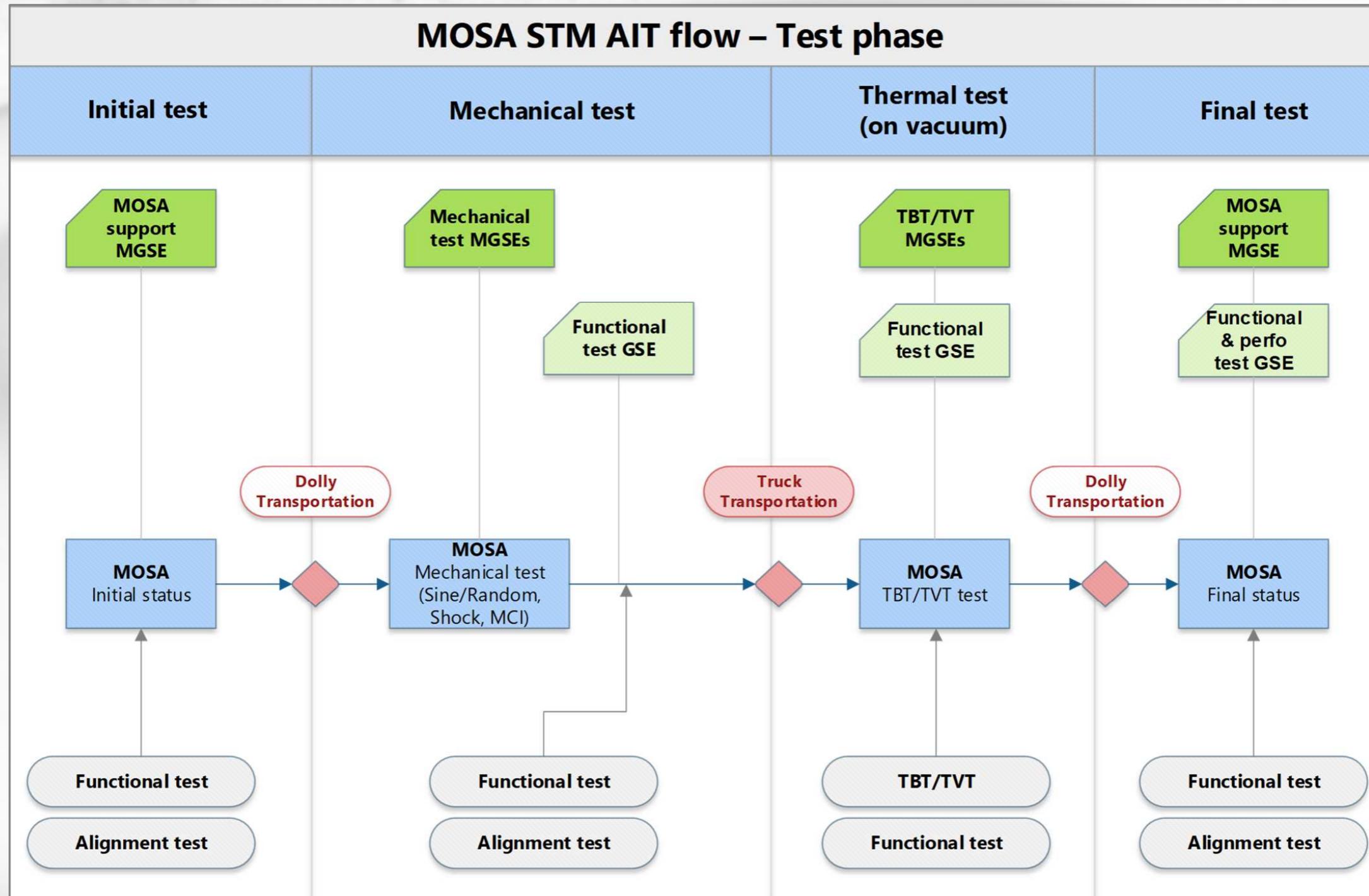
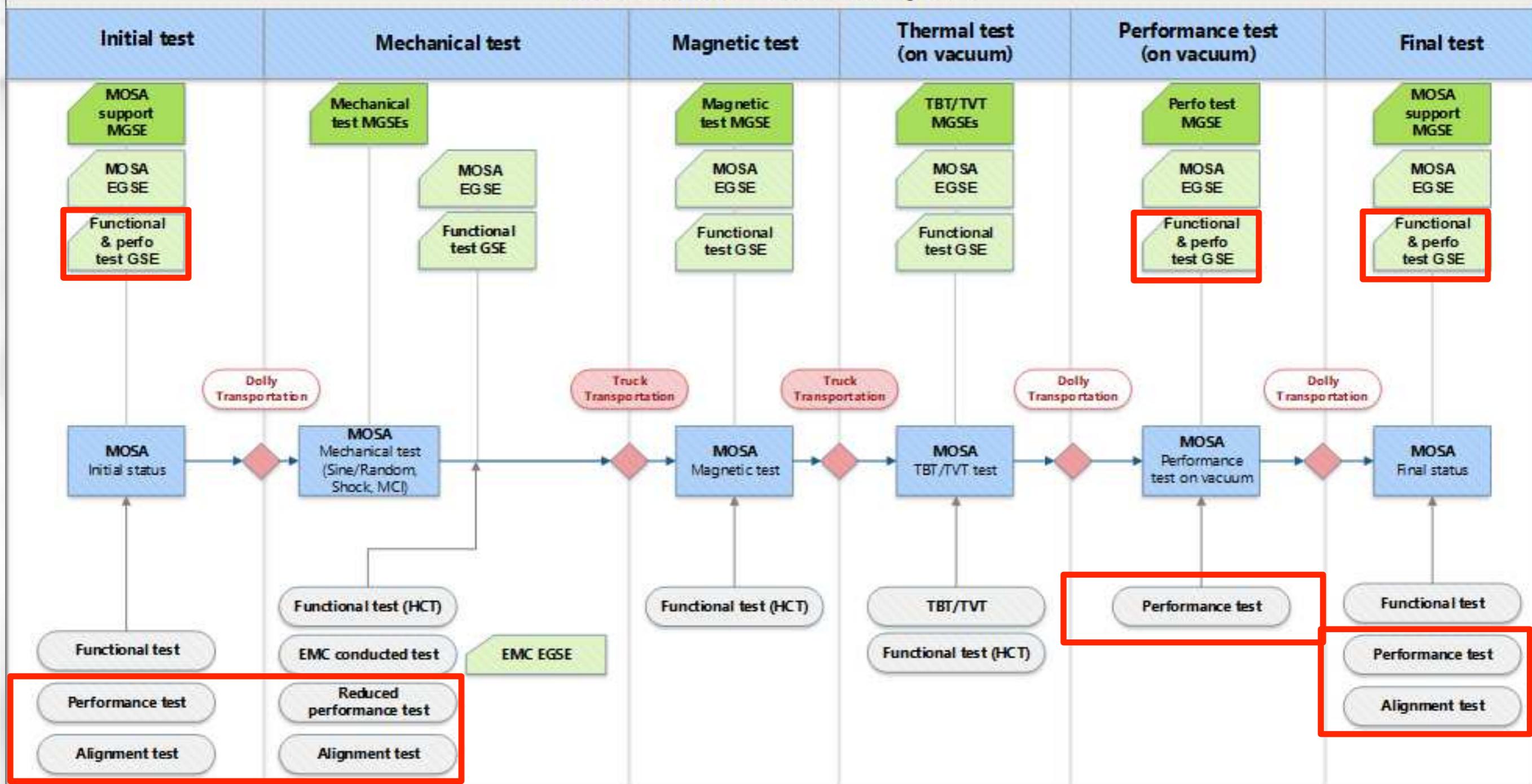


Figure 4: MOSA STM test phase

Phases AIT par modèle

EQM : modèle représentatif de l'architecture complète, fonctionnalités, performances et compatibilité spatiale

MOSA EQM AIT flow – Test phase



Phases AIT par modèle

(P)FM/FS : modèles de vol, besoin de tests d'acceptance et de calibration

MOSA FM & FS AIT flow – Test phase

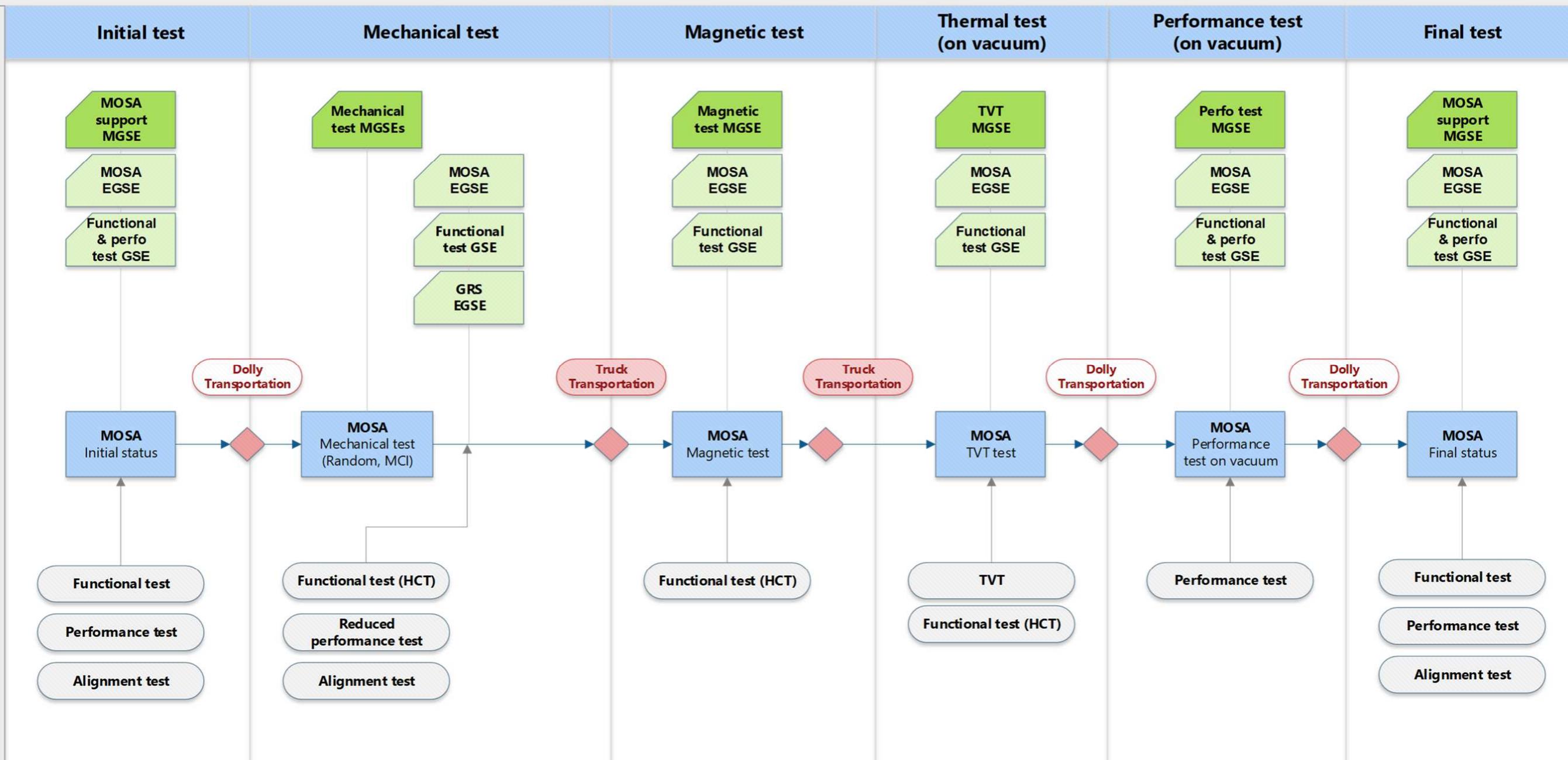


Figure 8: MOSA PFM/FM/FS test phase



Bancs de tests optiques

DFT : Detection Functional Test

Objectifs :

-  Vérification régulière des alignements internes du banc optique
-  Validation des chaînes d'acquisition AC et DC des photorécepteurs tous les IFOs
-  Intégrité des fibres et des chemins optiques
-  Similaire aux tests 'de bonne santé' effectués pendant l'AIVT OB

Fonctionnalités

-  Puissance fixe pour mesures de centrage sur les QPD
 -  Comparaison aux mesures antérieures
-  Modulations d'amplitude ~kHz (voies DC) et ~MHz (voies AC)
-  Signal hétérodyne pour IFO Ref (et TM avec un modèle optique de GRS)
-  Tests FSU (Fiber Switch Units) et isolation de polarisation
-  Pertes et retours optiques, ...

 Pas de difficulté de conception optique particulière (a priori)

 Besoins liés à l'utilisation fréquence comme outil de diagnostics

-  Fonctionnement (semi-)automatique, déroulé des différentes configuration de test
-  Facile et rapide à mettre en oeuvre
-  Identification rapide (automatique ?) des anomalies
-  —> Conception robuste et 'User Friendly'
-  —> Interface de contrôle/commande évoluée.

Tests de performance : BWA

🔗 BWA : Beam Wavefront Analysis

🔗 Objectifs :

🔗 caractériser le front d'onde + carte d'intensité émis par le MOSA

🔗 vérifier la conformité à $\lambda/20$ RMS

🔗 Outils :

🔗 Analyseurs de faisceau

🔗 Shack-Hartman, Quadriwave \rightarrow commercial, performances marginalement OK

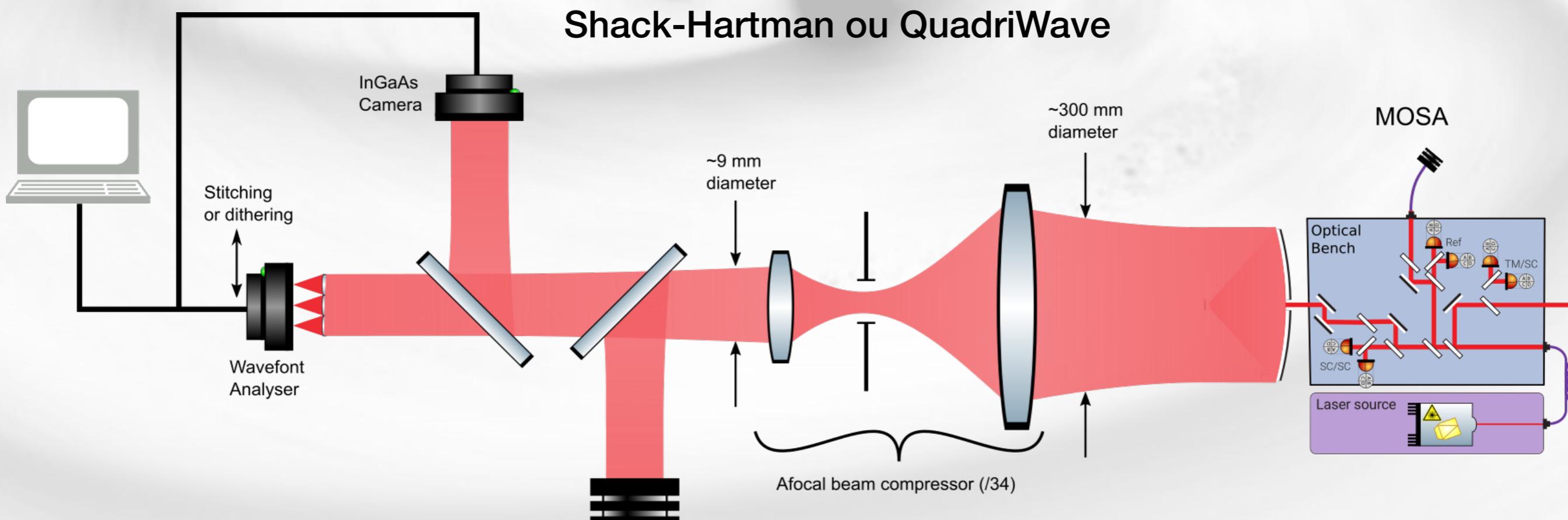
🔗 ZIGO \rightarrow très performant mais uniquement réflexion (donc pas pour le MOSA mais potentiellement pour des éléments optiques du GSE)

🔗 Hétérodyne \rightarrow prometteur et proche des autres techniques LISA (retour d'expérience !), à développer soi-même...

🔗 Compresseur de faisceau

🔗 Specs plus simples que le telescope LISA

🔗 Mécanique, contrôle/commande, etc



Tests de performance : BWA

BWA : Beam Wavefront Analysis

Objectifs :

- caractériser le front d'onde + carte d'intensité émis par le MOSA
- vérifier la conformité à $\lambda/20$ RMS

Outils :

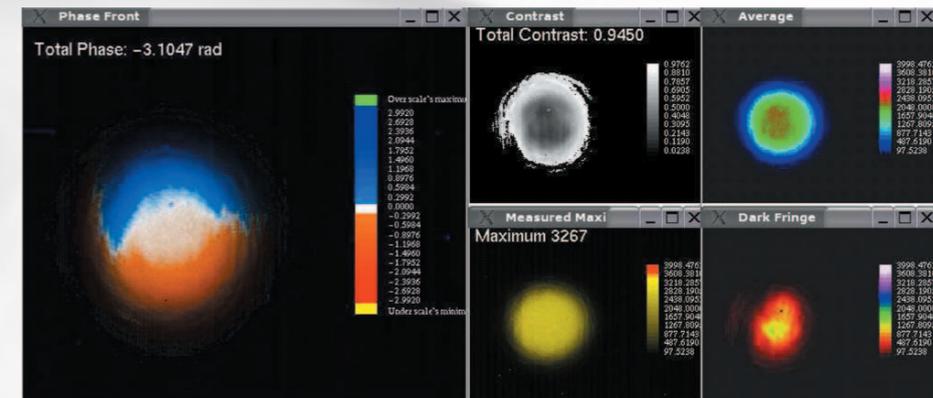
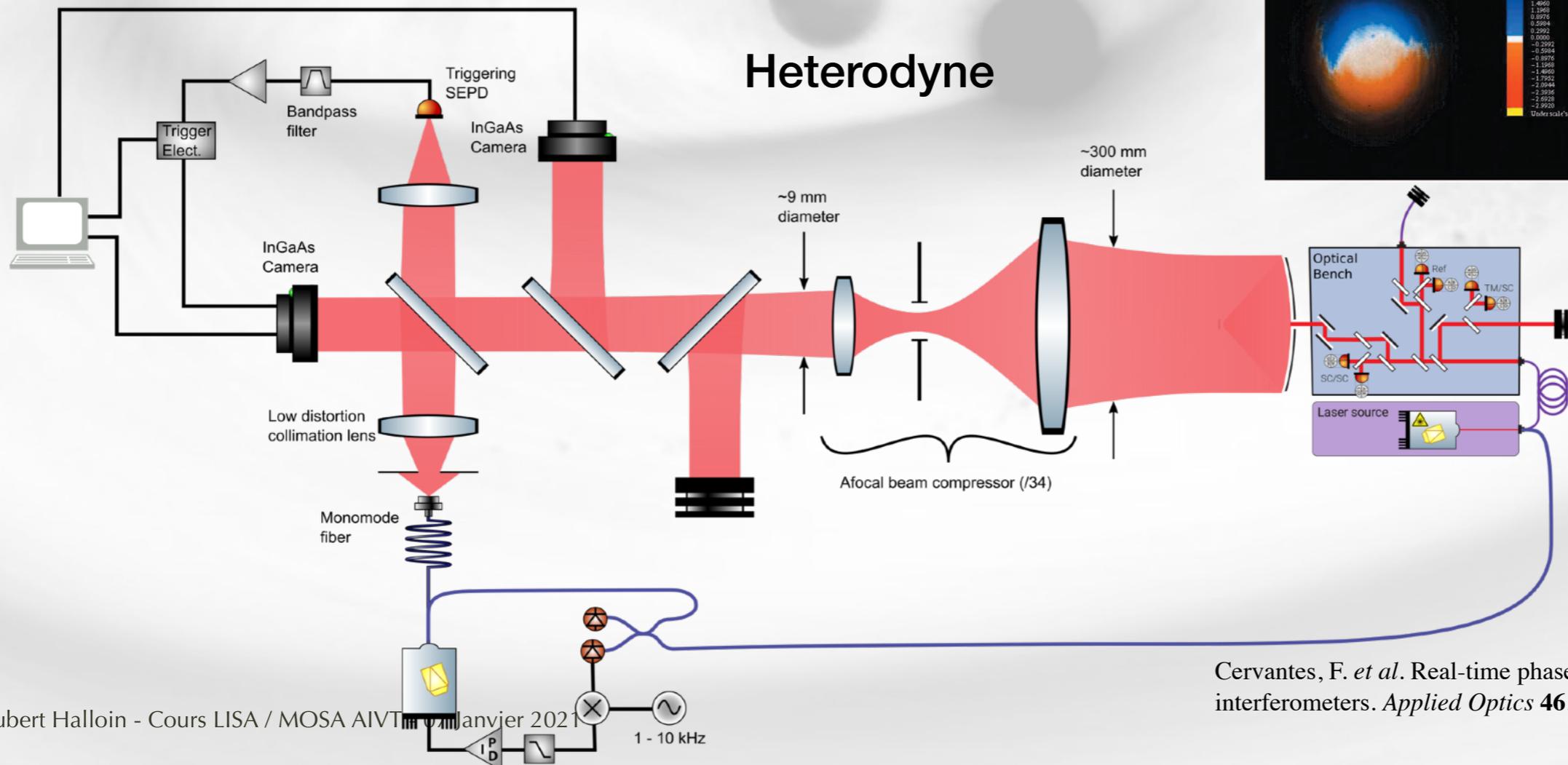
Analyseurs de faisceau

- Shack-Hartman, Quadriwave \rightarrow commercial, performances marginalement OK
- ZIGO \rightarrow très performant mais uniquement rien réflexion (donc pas pour le MOSA mais potentiellement pour des éléments optiques du GSE)
- Hétérodyne \rightarrow prometteur et proche des autres techniques LISA (retour d'expérience !), à développer soi-même...

Compresseur de faisceau

- Specs plus simples que le telescope LISA

Mécanique, contrôle/commande, etc



Cervantes, F. *et al.* Real-time phase-front detector for heterodyne interferometers. *Applied Optics* **46**, 4541–4548 (2007).

Tests de performance : BWA

BWA : Beam Wavefront Analysis

Objectifs :

- caractériser le front d'onde + carte d'intensité émis par le MOSA
- vérifier la conformité à $\lambda/20$ RMS

Outils :

Analyseurs de faisceau

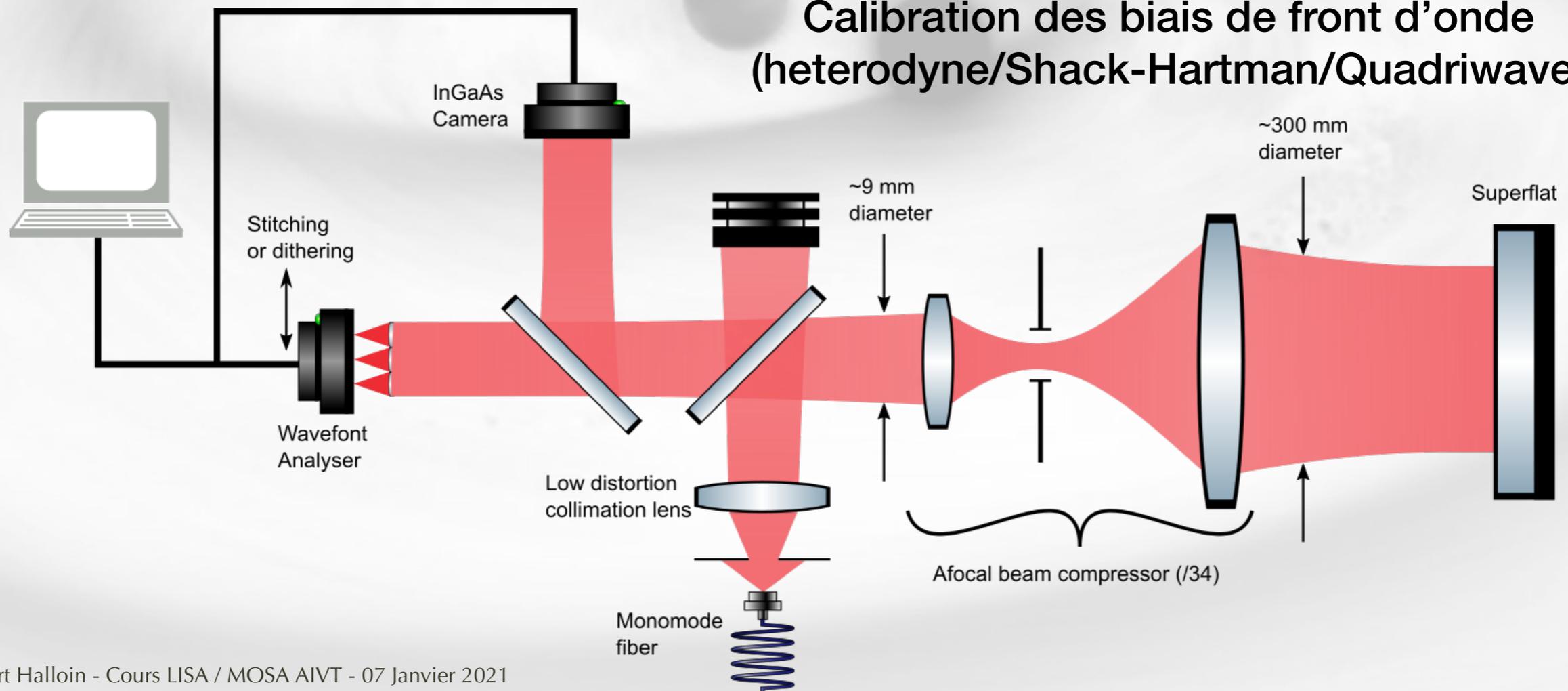
- Shack-Hartman, Quadriwave \rightarrow commercial, performances marginalement OK
- ZIGO \rightarrow très performant mais uniquement réflexion (donc pas pour le MOSA mais potentiellement pour des éléments optiques du GSE)
- Hétérodyne \rightarrow prometteur et proche des autres techniques LISA (retour d'expérience !), à développer soi-même...

Compresseur de faisceau

- Specs plus simples que le telescope LISA

Mécanique, contrôle/commande, etc

Calibration des biais de front d'onde (heterodyne/Shack-Hartman/Quadriwave)



Tests de performance : BWA

BWA : Beam Wavefront Analysis

Objectifs :

- caractériser le front d'onde + carte d'intensité émis par le MOSA
- vérifier la conformité à $\lambda/20$ RMS

Outils :

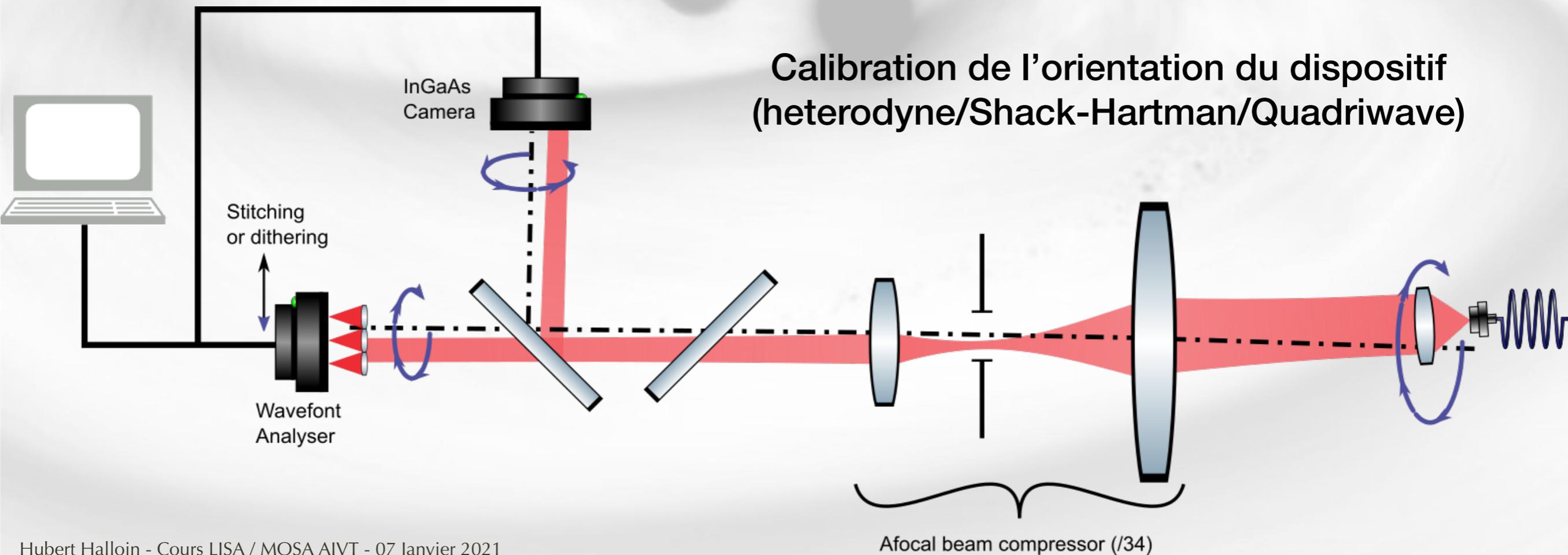
Analyseurs de faisceau

- Shack-Hartman, Quadriwave \rightarrow commercial, performances marginalement OK
- ZIGO \rightarrow très performant mais uniquement réflexion (donc pas pour le MOSA mais potentiellement pour des éléments optiques du GSE)
- Hétérodyne \rightarrow prometteur et proche des autres techniques LISA (retour d'expérience !), à développer soi-même...

Compresseur de faisceau

- Specs plus simples que le telescope LISA

Mécanique, contrôle/commande, etc



 BWA : Beam Wavefront Analysis

 Objectifs :

 caractériser le front d'onde + carte d'intensité émis par le MOSA

 vérifier la conformité à $\lambda/20$ RMS

 Outils :

 Analyseurs de faisceau

 Shack-Hartman, Quadriwave \rightarrow commercial, performances marginalement OK

 ZIGO \rightarrow très performant mais uniquement rien réflexion (donc pas pour le MOSA mais potentiellement pour des éléments optiques du GSE)

 Hétérodyne \rightarrow prometteur et proche des autres techniques LISA (retour d'expérience !), à développer soi-même...

 Compresseur de faisceau

 Specs plus simples que le telescope LISA

 Mécanique, contrôle/commande, etc

 A faire ...

 Définition détaillée, modélisation optique, dimensionnement

 \rightarrow validation (ou non) des performances attendues, choix technologiques

 Prototypage ?

 En particulier si utilisation de l'option 'hétérodyne'

 Specs sur le compresseur de faisceau ? Disponibilité commerciale ?

 Combinaison possible avec d'autres bancs optiques ?

 BIM ? FF-OGSE ?

Tests de performance : BIM

 BIM : Beam Intensity Measurement

 Objectifs :

 Mesure du centrage de la pupille externe telescope par rapport au référentiel mécanique externe (et donc la position théorique)

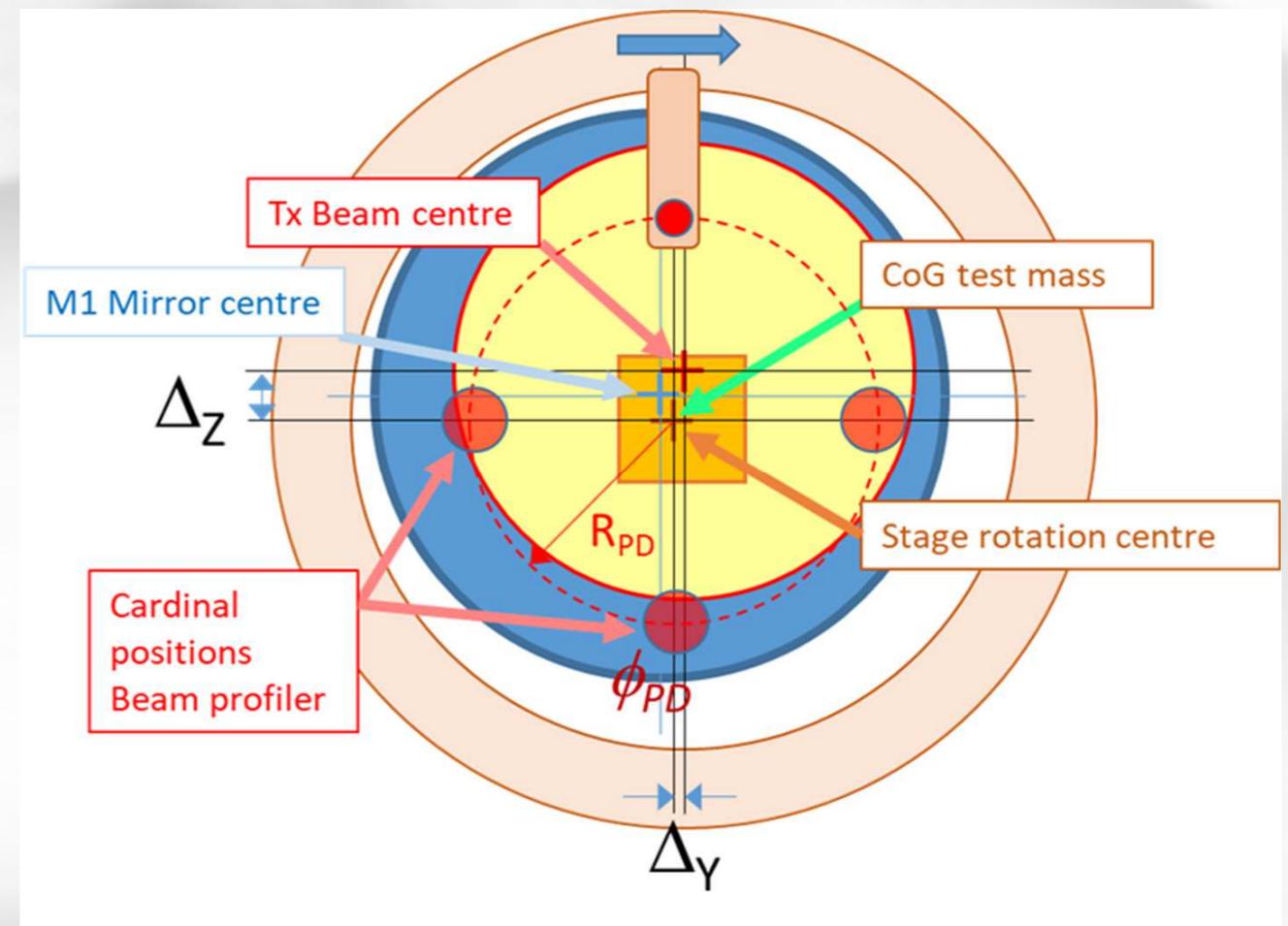
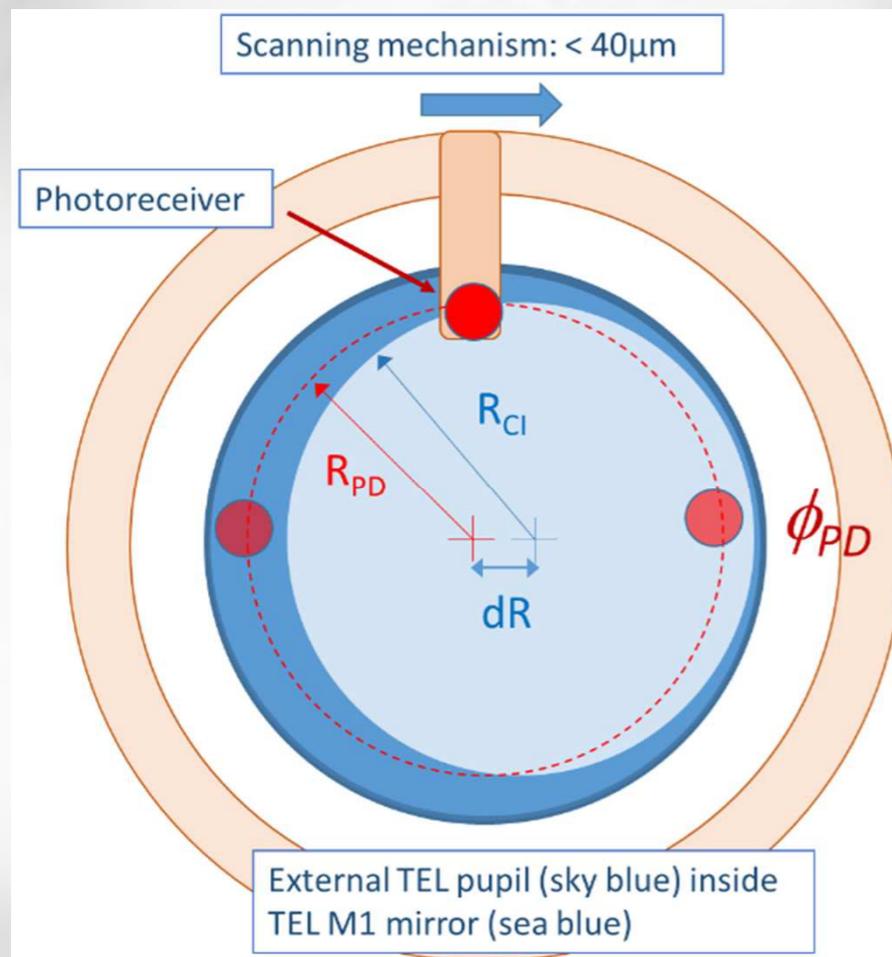
 Outils :

 Analyseur de faisceau

 Profileur de faisceau / camera / photodiode

 Platine de rotation/translation de précision ($\sim \mu\text{m}$ precision)

 Mécanique, contrôle/commande, etc



 BIM : Beam Intensity Measurement

 Objectifs :

 Mesure du centrage de la pupille externe telescope par rapport au référentiel mécanique externe (et donc la position théorique)

 Outils :

 Analyseur de faisceau

 Profileur de faisceau / camera / photodiode

 Platine de rotation/translation de précision ($\sim \mu\text{m}$ precision)

 Mécanique, contrôle/commande, etc

 A faire

 Dimensionnement complet

 Modélisation optique (propagation et aberrations des faisceaux notamment)

 Bilans d'erreurs, performances attendues, etc

 \longrightarrow Travaux en cours par O. Grosjean

Test de performances : FF-OGSE

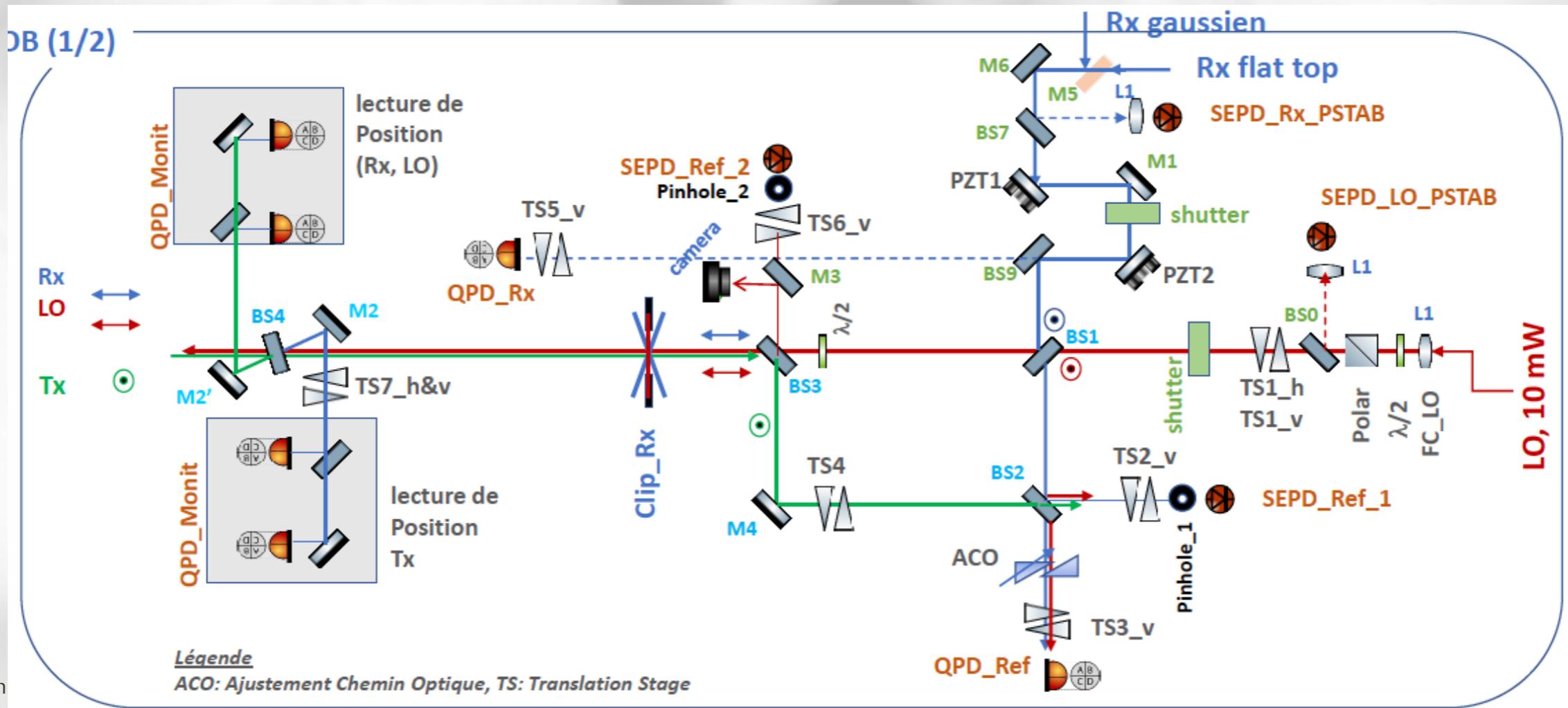
FF-OGSE : Far Field Optical Ground Support Equipment

Objectifs :

- Mesurer les coefficients Tilt-to-Length Rx suivant les 2 axes de pointage
- Permettre la détermination de la position 'optimale' des compensateurs de TTL (Active Aperture ou Beam Alignment)

A faire :

- Beaucoup de choses ...
- Consolider les specifications
- Etudier les performances optiques du FFS (C. Buy & O. Grosjean)
- Prototypage du TTL-OB (F. Cleva)
- Modélisation des performances et méthodologie de mesure
- Intégration des différents éléments, spécifications mécaniques, procédures de validation du banc, combinaison avec d'autres OGSE nécessitant un FFS ?, etc
- ...



Objectifs:

- Mesure de la stabilité relative (différentielle) entre Ref-IFO et TM-IFO
- Validation fonctionnelle des deux IFO, niveau de bruit de phase relatif
- Calibrations DWS : zero et bruit
- Nécessite un simulateur optique GRS pour certains tests
 - interfaces représentative + miroir pilotable à la place de la TM

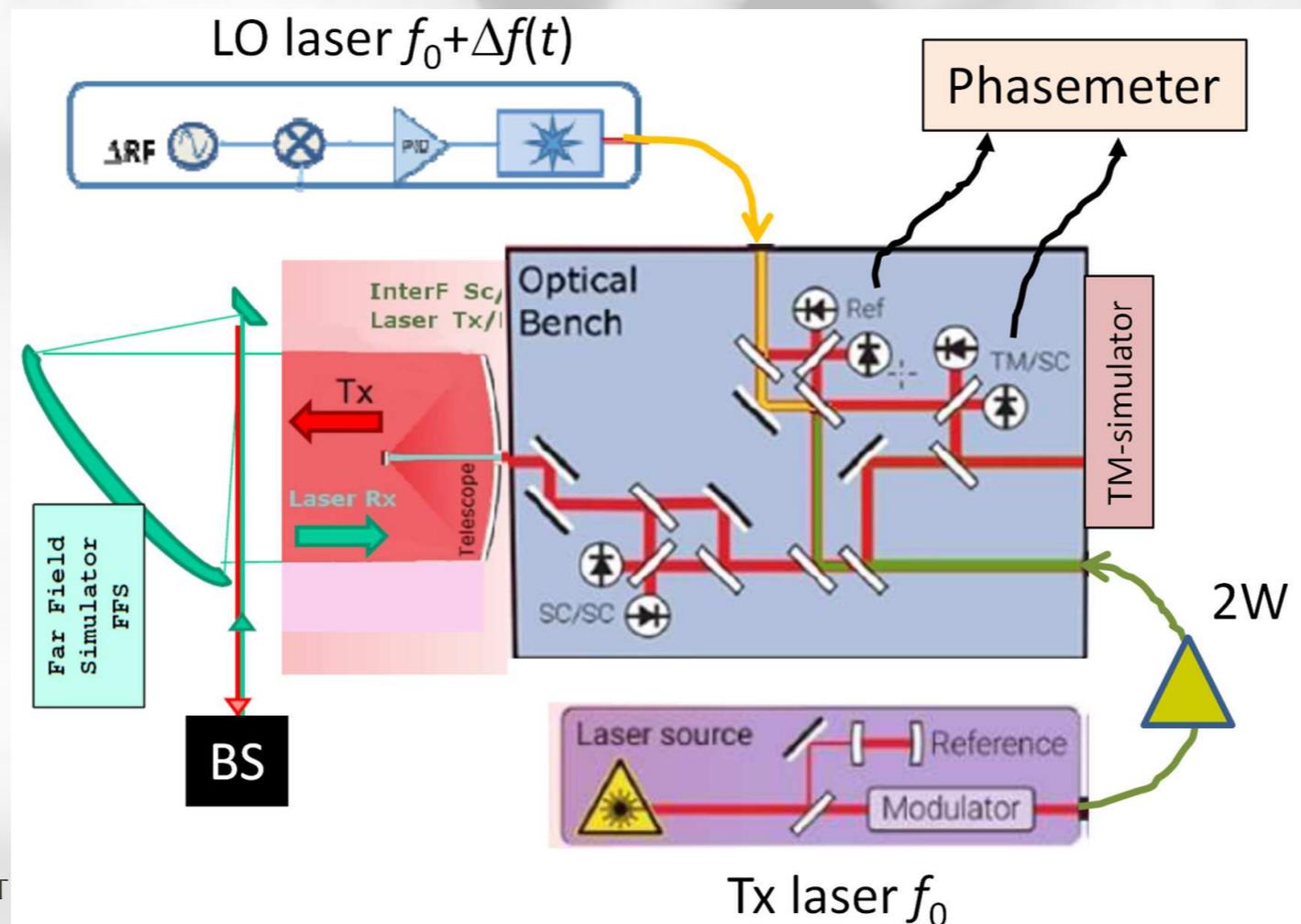
→ uniquement au niveau EQM

Défis techniques

- Absorption du faisceau Tx
- Environnement de test stable (en particulier temperature), sous vide

A faire

- Dimensionnement complet, évaluation des performances
 - En particulier en lien avec les équipes en charge du GRS
- Combinaison avec FF-OGSE en raison du FFS ?



Test de performances : PERF_IF02

Objectifs:

- Mesure de la stabilité relative (différentielle) entre Ref-IFO et SC-IFO
- Egalement TM-IFO / SC-IFO avec simulateur optique GRS (phase EQM)
- Tests fonctionnels des IFOs
- Tests extensifs en phase EQM, 'best effort' en phase (P)FM

Principe:

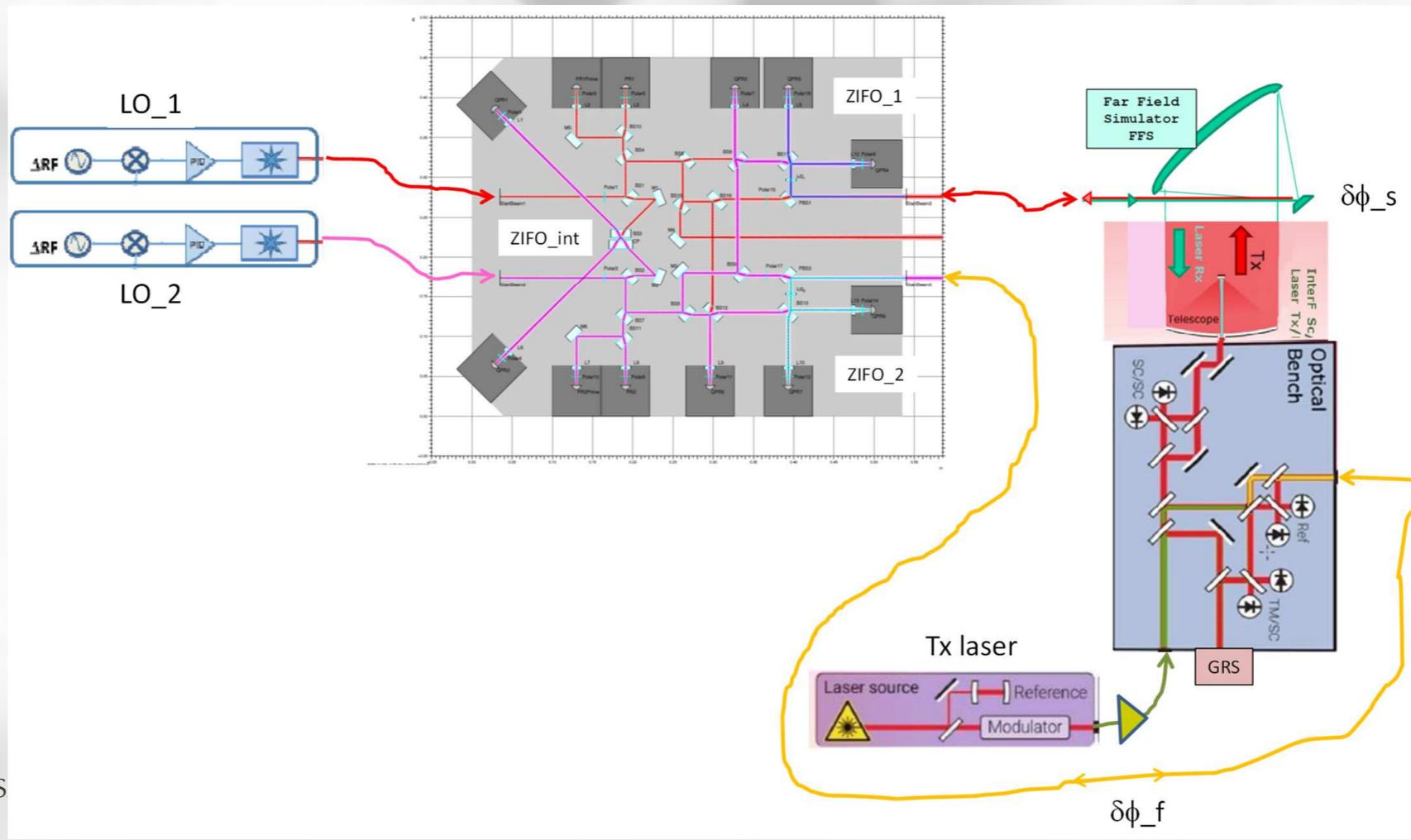
- mesures internes OB + non-réciprocité des liens fibrés avec un banc de mesure externe
- Ré-utilisation du banc ZIFO en cours de développement

Défis techniques

- Environnement de test stable (en particulier température), sous vide
- Maîtrise de la lumière parasite (notamment dans les fibres)

A faire

- Dimensionnement complet, évaluation des performances
 - En particulier en lien avec les équipes en charge du GRS
- Intégration du banc et méthodologie de tests, spécifications mécaniques, etc.
- Combinaison avec FF-OGSE en raison du FFS ?



Test de performances: SL-OGSE

SL-OGSE : Straylight Optical ground Support Equipment

Objectifs:

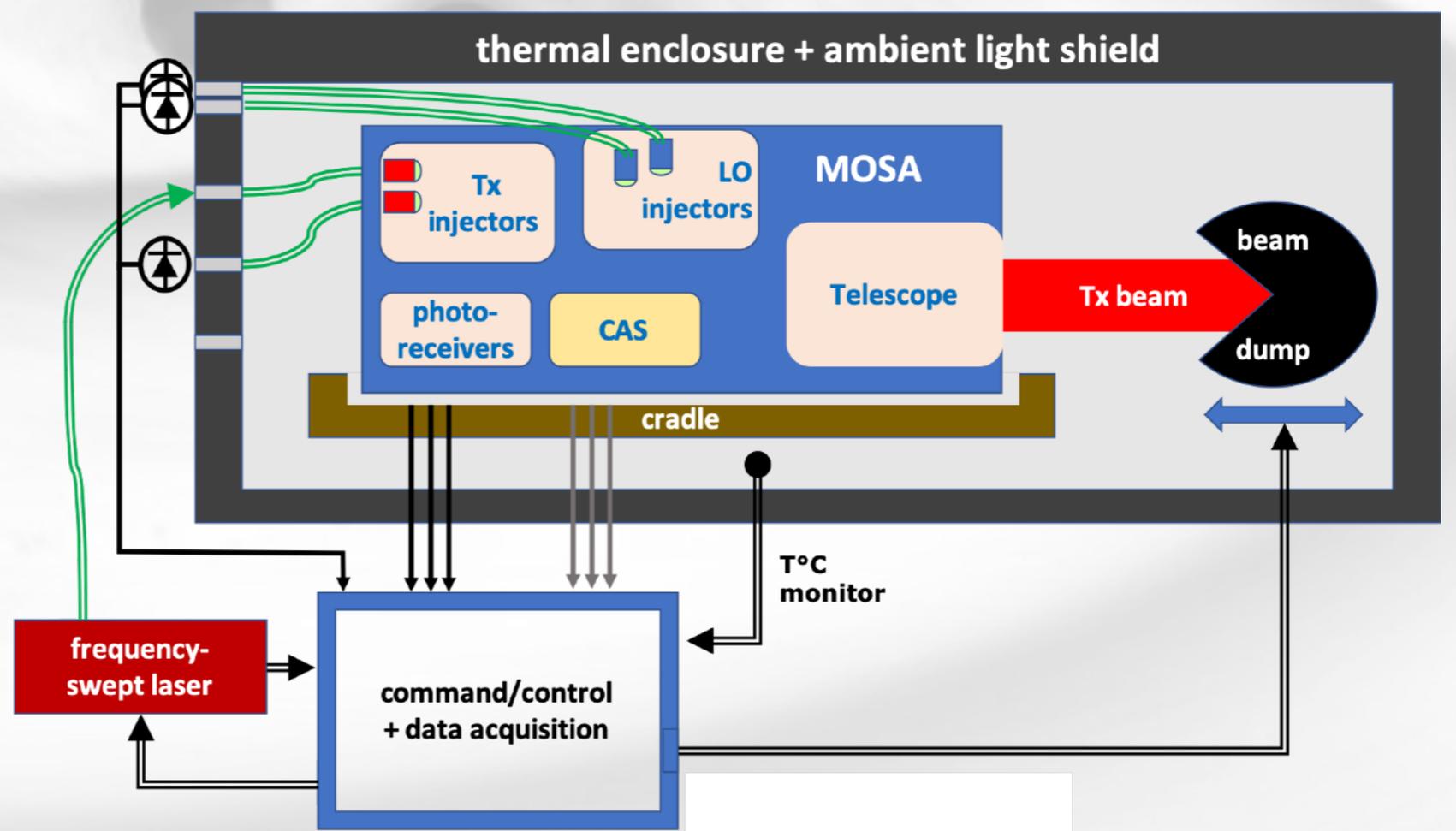
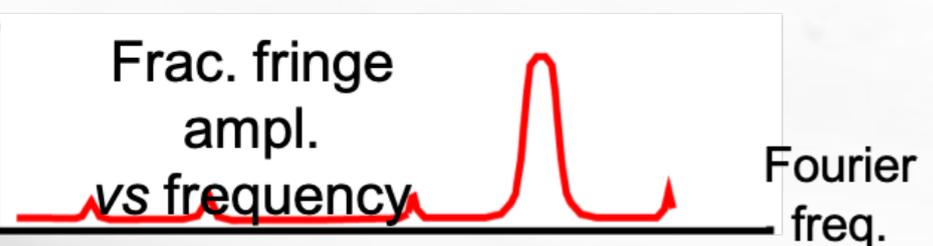
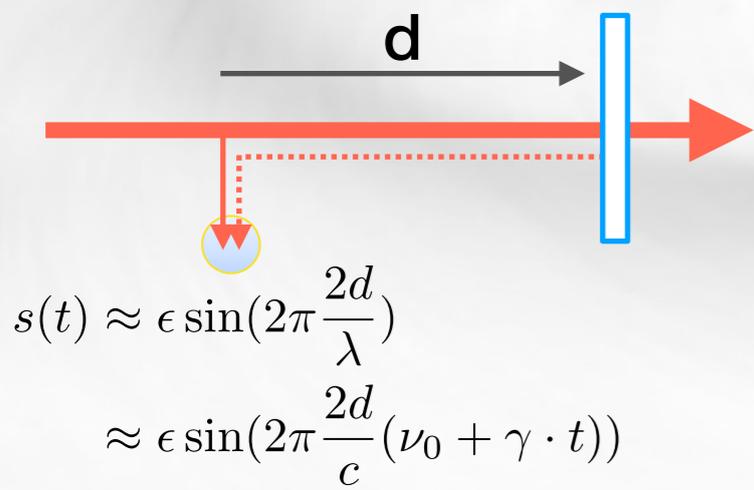
- Mesure de la lumière parasite généré dans le MOSA et des contributeurs
- Evaluation de l'effet de la contamination particulaire (retro-diffusion du telescope notamment), des reflexions parasites des structures
- Influences sur les phases et amplitudes mesurées

Principe:

- Utilisation d'une source laser avec une dérive temporelle linéaire en fréquence
- > l'amplitude du signal d'interférence dû à la lumière parasite est périodiquement variable
- > la transformée de Fourier du signal permet de récupérer l'amplitude de la lumière parasite et son lieu de production

Défis techniques:

- Gestion de la lumière parasite 'interne' et du beam dump
- Niveau de bruit de fond de la mesure
- Linéarité de la vobulation de fréquence laser
- > Travaux menés par M. Lintz





Université de Paris



LISA France

Prototypage bancs AIVT: MIFO/ZIFO

Purpose

-  Development of an ultra-stable optical bench for demonstrating the on-ground characterisation capabilities

Goals

-  Pathlength stability of $\sim 10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ in [10 mHz:1 Hz]
-  Set up collaborations with private companies on key technologies (e.g. optical contacting and ultra-stable mechanical designs)
-  Organise the French community in view of the development of the MOSA GSEs
-  Identify and quantify the main noise sources in a relevant environment
-  Characterisation and impact on measurements of typical integration facilities environment
-  Build the expertise on the full acquisition chain, from laser source to acquisition and command/control
-  Evaluate the complexity (+cost, duration, etc) of MOSA performance tests

2 steps approach

-  'Metallic' bench (MIFO) with an invar base plate
 -  Integrated and tested in a 'lab' vacuum chamber
 -  Validation of the mounting and tuning procedures, acquisition chain, analysis tools and performance model
 -  Final results expected end 2021
-  Zerodur bench (ZIFO) with optically contacted components
 -  Designed and integrated by Winlight (except photo receivers and injectors)
 -  Tested and characterised in a vacuum chamber representative of AIVT environment
 -  Final results expected end 2022

French Institutes involved in LISA AIVT and OGSEs demonstrators

CNES

 Financial and engineering support, project management

9 research labs :

 APC, CNRS/Université de Paris

 CEA/IRFU, Saclay

 SYRTE, CNRS/Obs. de Paris

 IP2I, CNRS, Lyon

 CPPM, CNRS/Université Aix-Marseille

 LAM, CNRS/Université Aix-Marseille

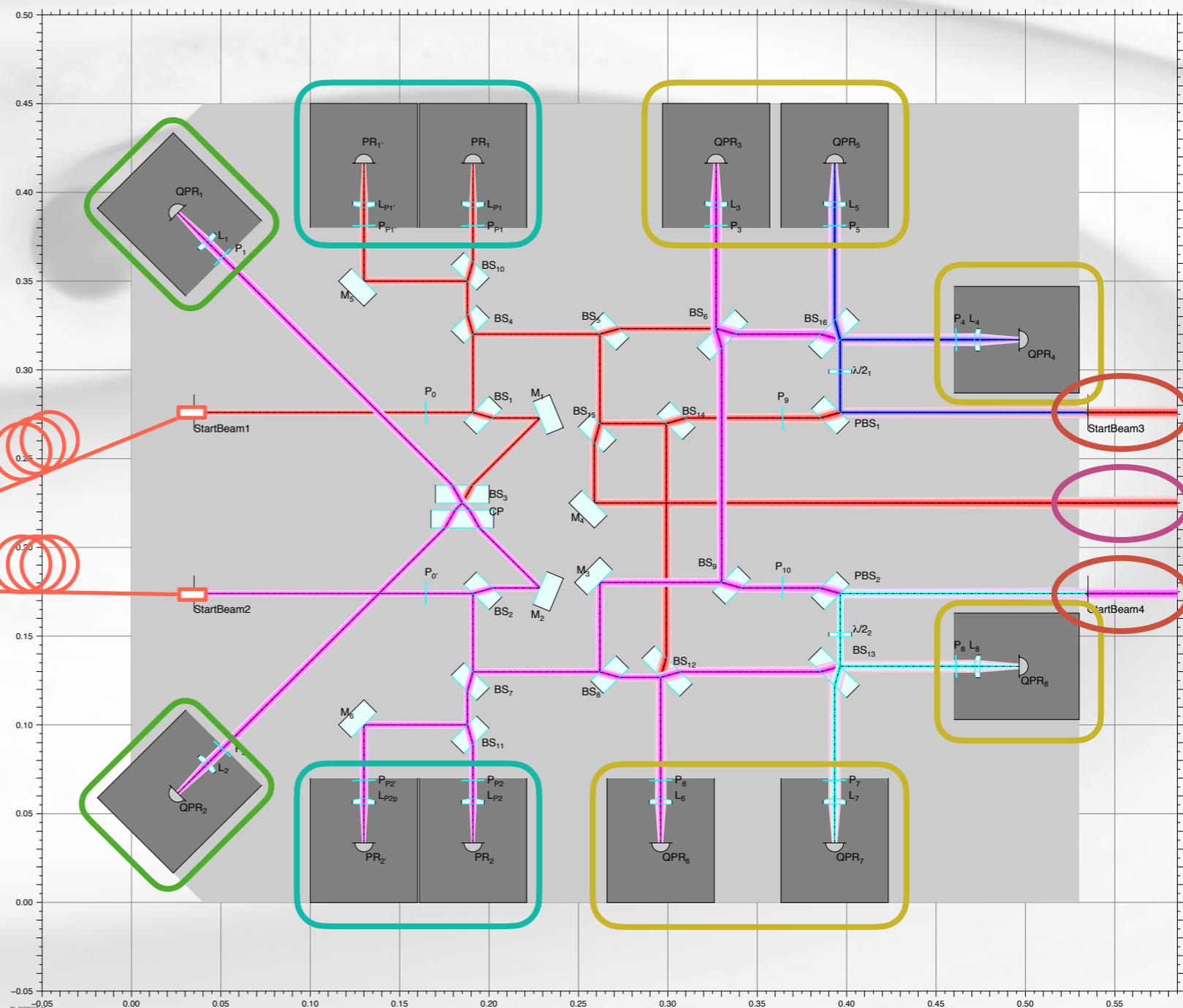
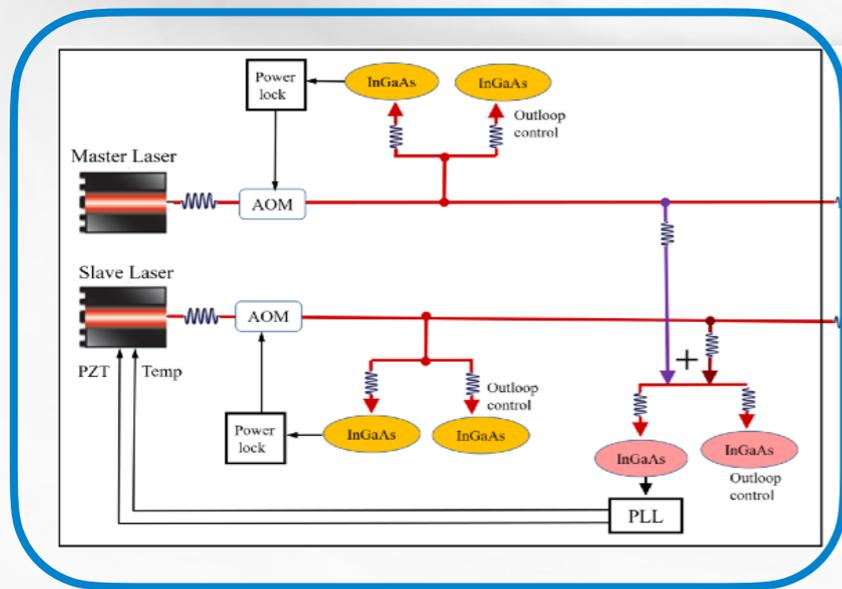
 Fresnel Institute, CNRS/Université Aix-Marseille

 ARTEMIS, Obs. de la Côte d'Azur / Université de Sophia Antipolis

 L2IT, CNRS/Université Paul Sabatier

Common design MIFO/ZIFO

- Heterodyne interferometry (100 kHz - 25 MHz)
- Power monitoring
 - In-loop and out-of-loop
- Equal arm-length IFO
 - Reference measurements, remove differential fibre OPL noise
- 2 unequal (~20 cm) arm-length IFOs
 - Evaluate bench stability and common-mode rejection (e.g. residual freq. noise & thermal)
- Input/output ports for connexion to an external bench
 - Phase reciprocity measurements
- Bench tilt stability monitoring



Developed by SYRTE/OBSPM (Paris)

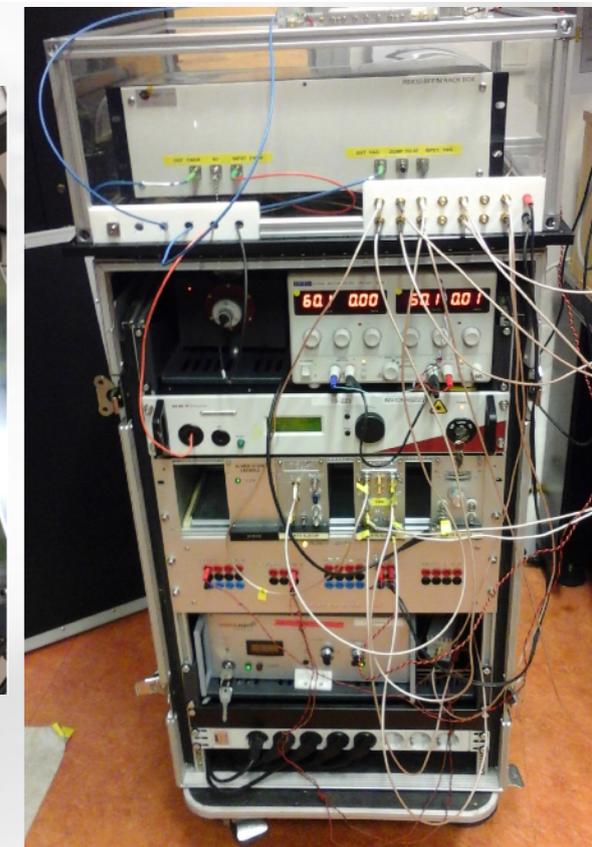
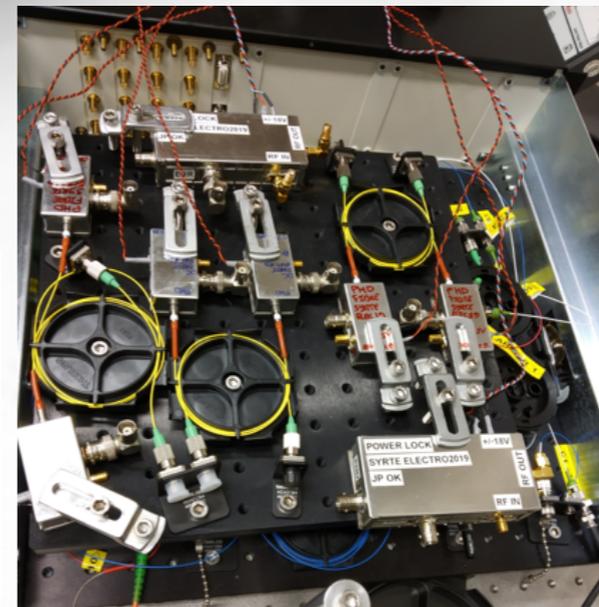
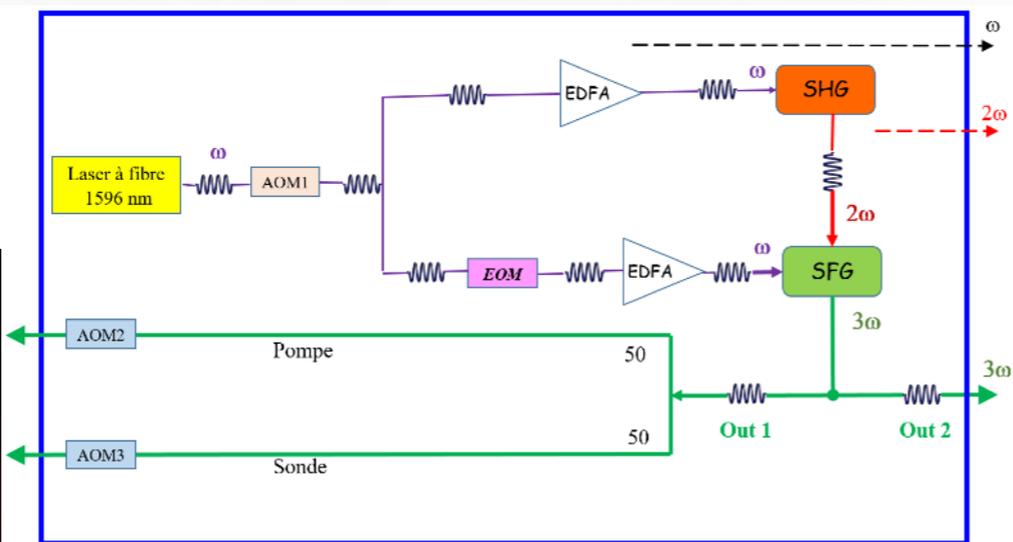
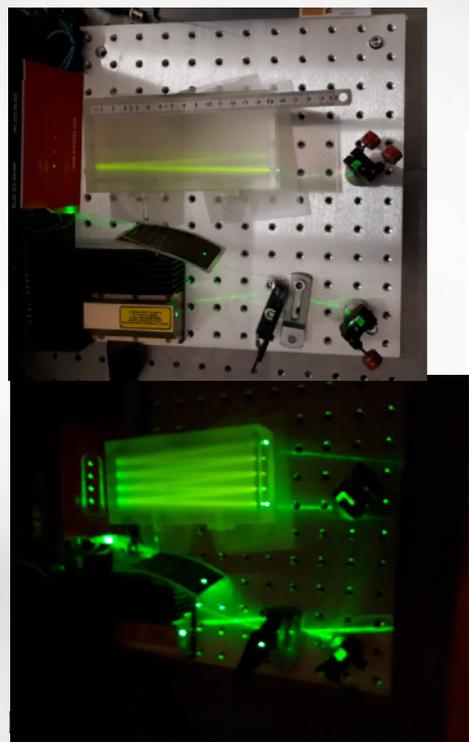
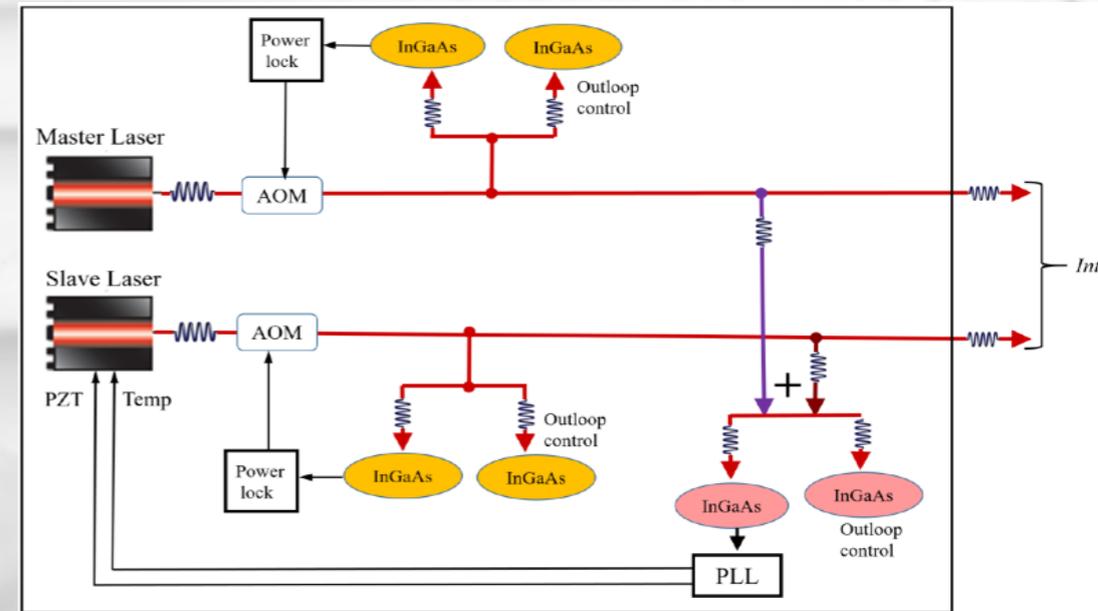
2 steps development

Step 1 : phase locked lasers

- 1064 nm laser sources (fibered)
- Frequency offset : 100 kHz - 25 MHz (tuning slope up to 10 kHz/s)
- PLL bandwidth >30 kHz
- Power stabilised

Step 2 : freq. stabilised on iodine

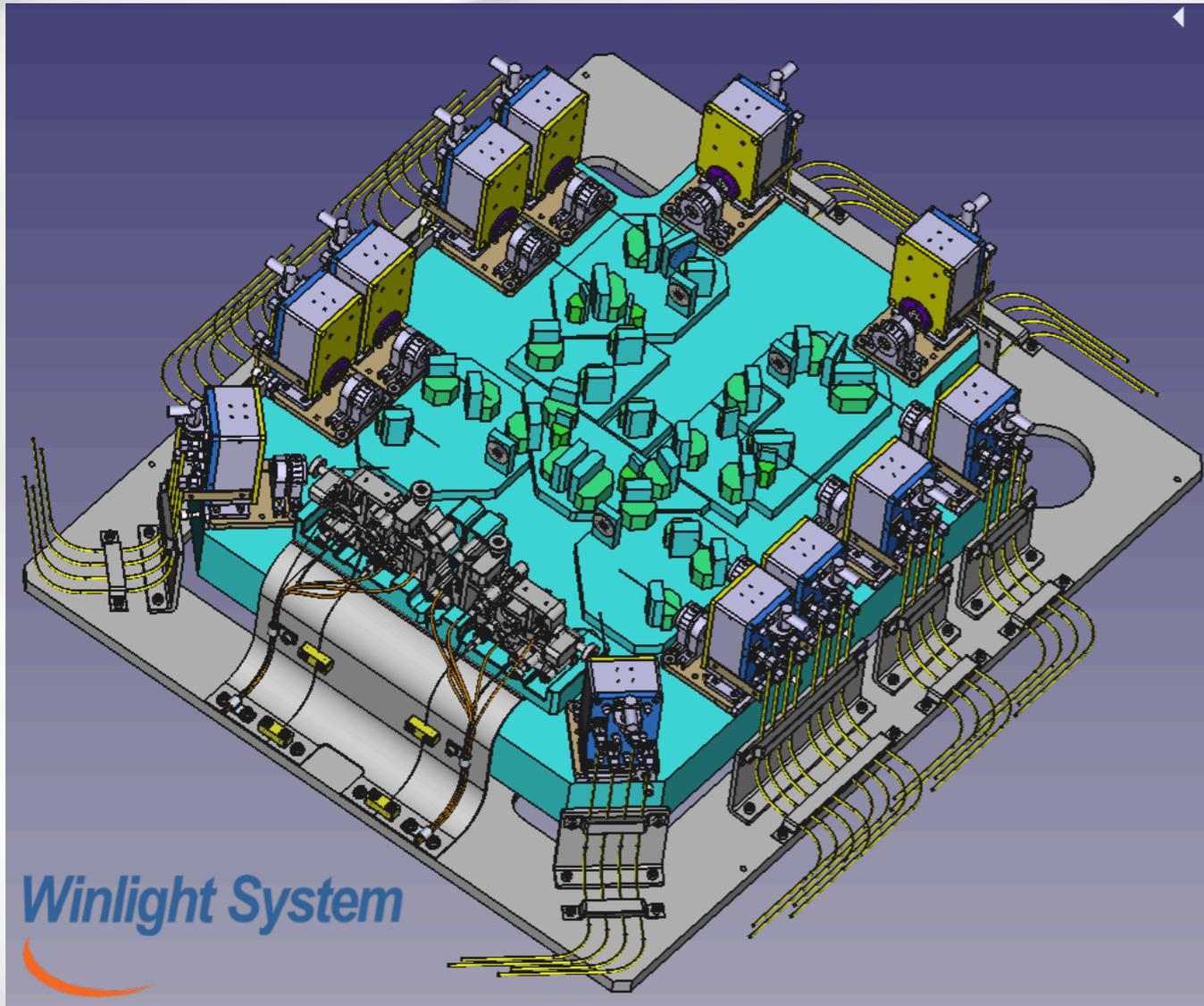
- External reference based on triple telecom laser and iodine cell
- Expected noise residuals <30Hz/√Hz in the LISA band



Optical benches

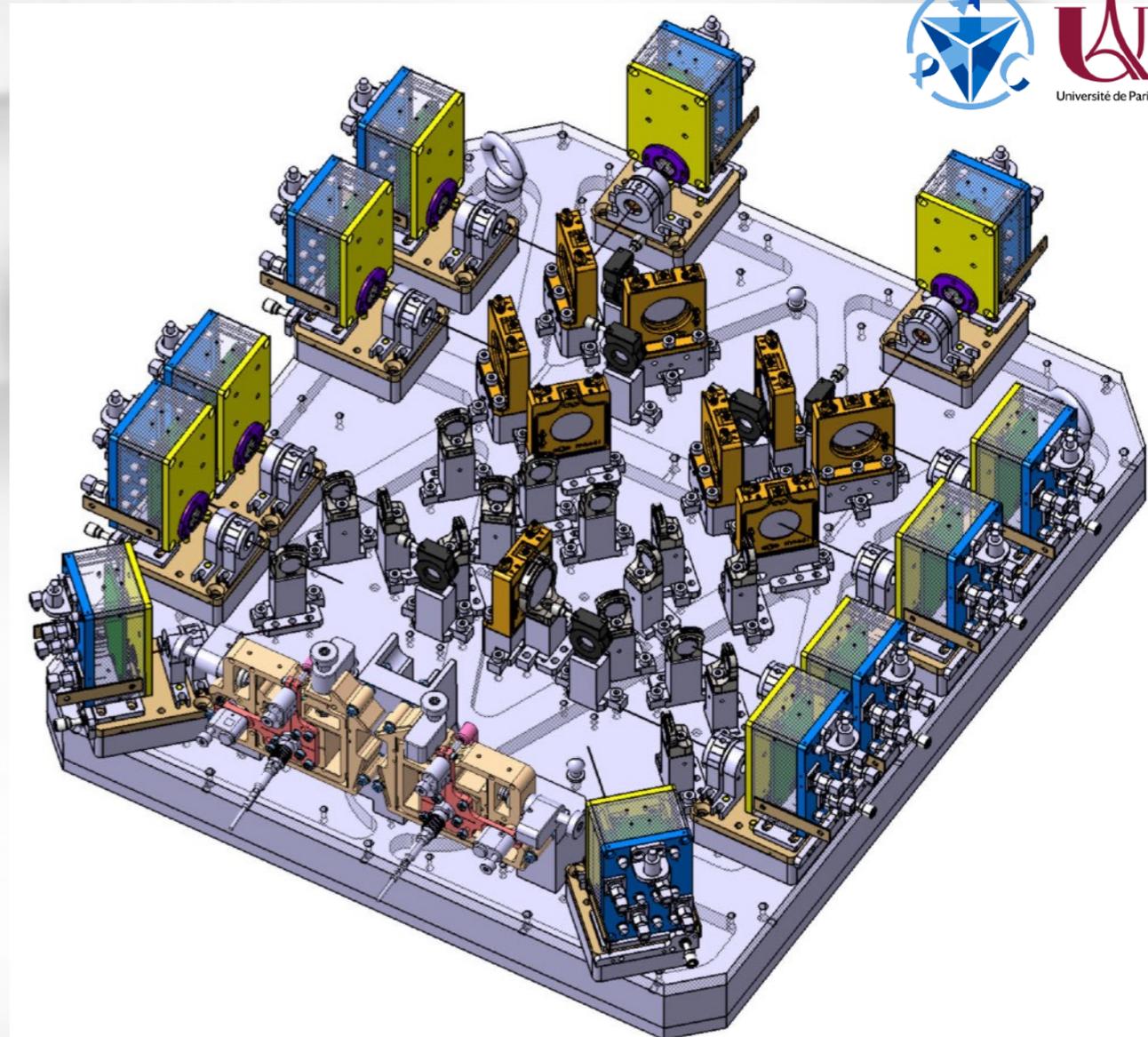
ZIFO

- Zerodur base plate + optically contacted elements
- designed by Winlight Systems



MIFO

- Invar base plate + COTS optical mounts
- designed and manufactured at the APC



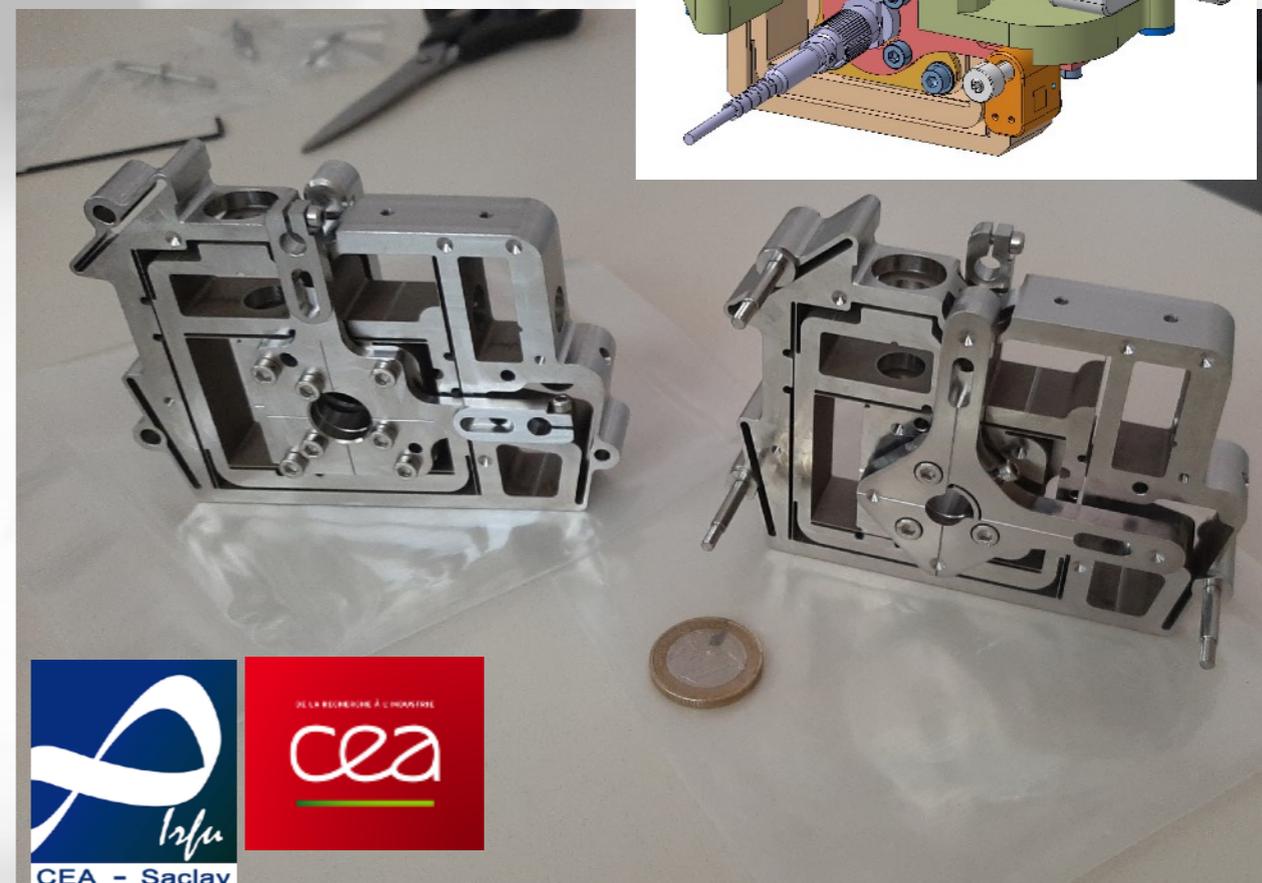
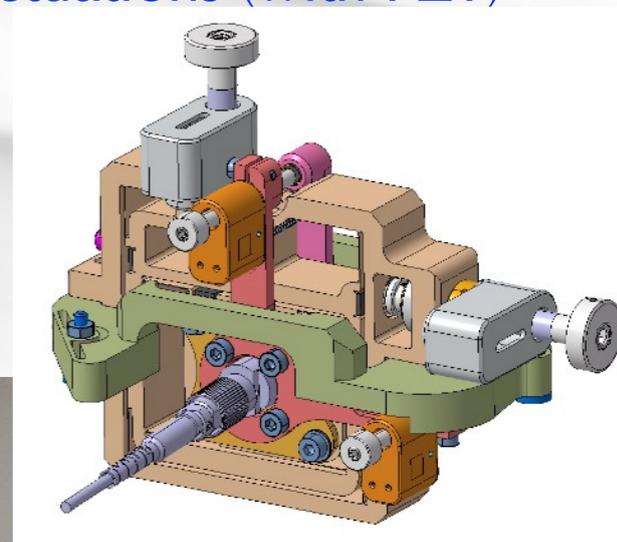
Photoreceivers & Injectors

Photoreceivers

- Quadrant (1 mm) and single (2 mm) photo receivers

Fiber injectors

- 4 DoF
- $\pm 0.5 \text{ mm} / < 30 \text{ nm}$ step
- $\pm 10 \text{ mrad mm} / < 0.7 \mu\text{rad}$ step
- Set-and-forget actuations (with PZT)

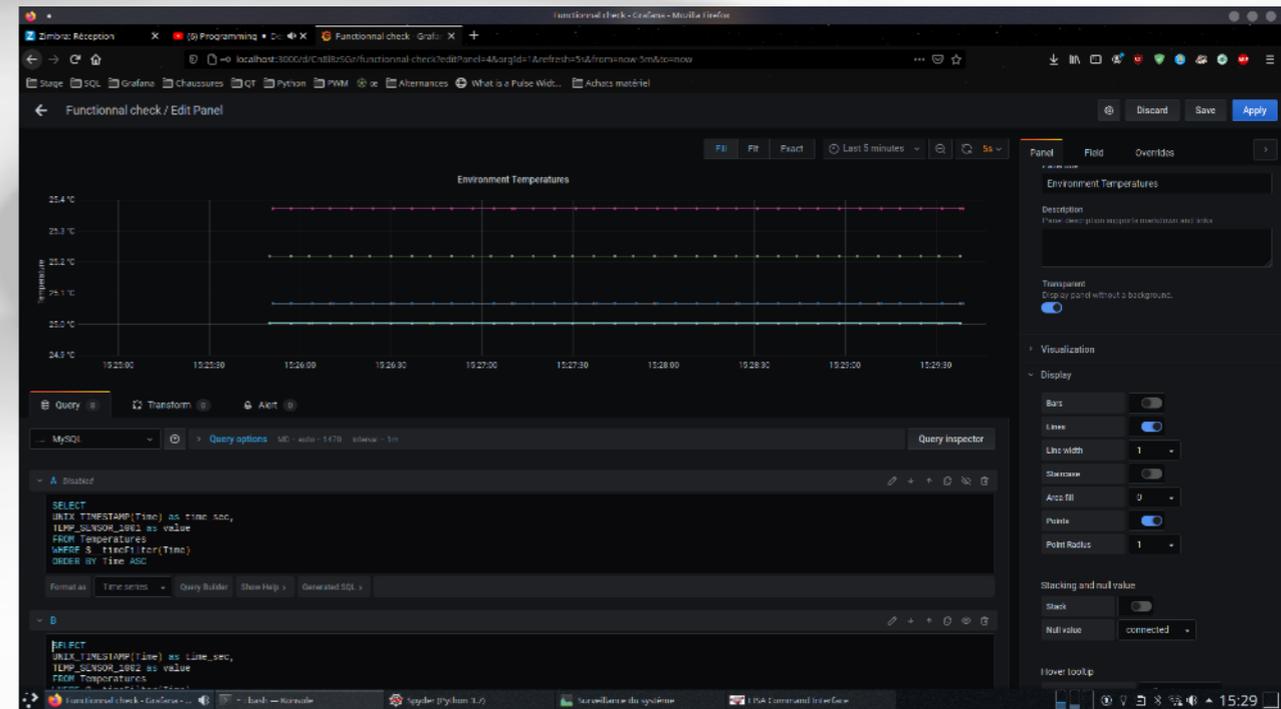
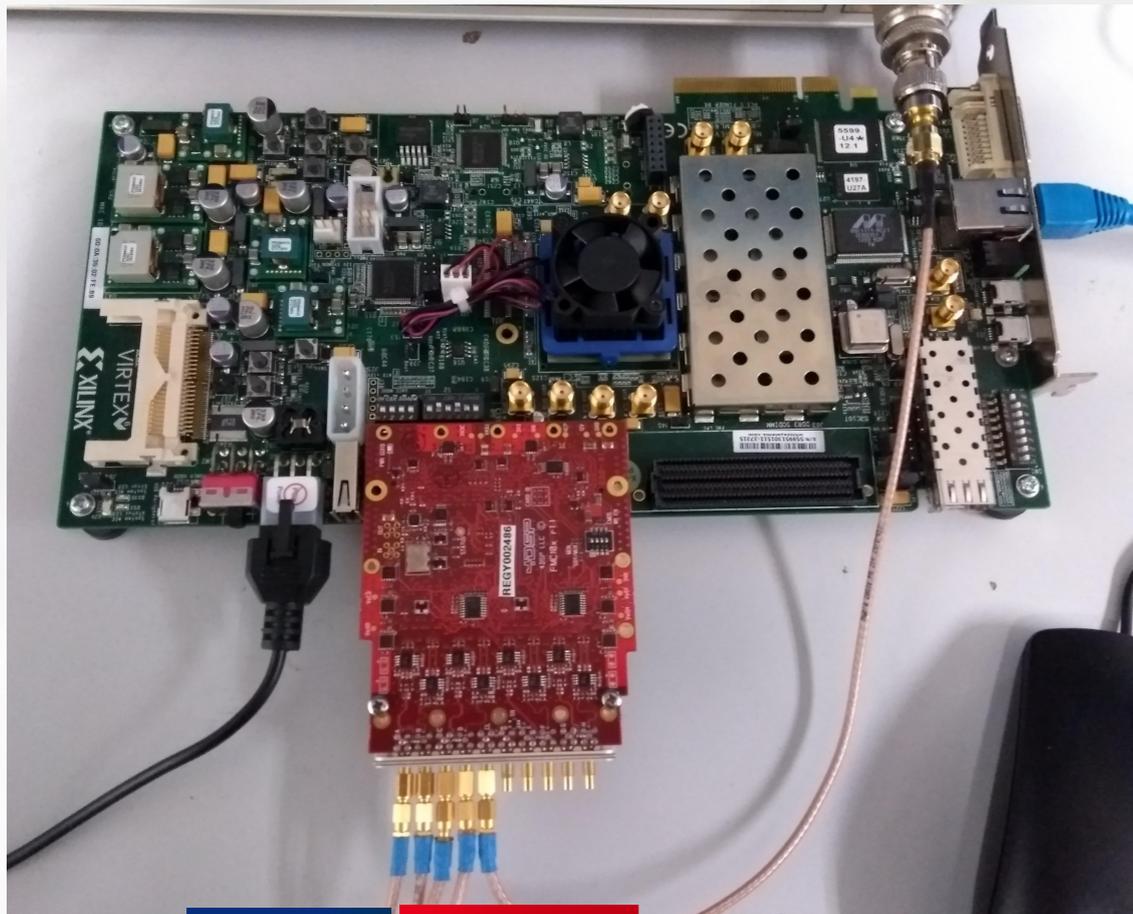


Phasemeter

- 8-channels phase-meter
- Based on COTS
 - Original design (SW+HW) from the AEI
- Being upgraded for new ADC & FPGA boards and MIFO/ZIFO specific needs

Command/control

- Centralised interface for monitoring and control of the system
 - Phasemeter outputs, Temperatures, power levels, actuators, heaters, alerts, etc
- Open-source software suite
 - Grafana (visualisation)
 - Python (+C) for low-level communications and processing



❁ MIFO/ZIFO to be tested in clean room / vacuum chamber

❁ MIFO tested at the APC

❁ 'lab' vacuum tank

❁ ~ 1.1 x 1.1 x 0.5 m

❁ 'Low vacuum' ~0.1 mbar

❁ ISO8 clean room

❁ ZIFO tested at the LAM

❁ Large vacuum tank (ERIOS)

❁ ~ Ø4 x 6 m

❁ Representative of infrastructure required for the MOSA

❁ HV ~10⁻⁶ mbar

❁ Inner bench on a 10t seismic mass

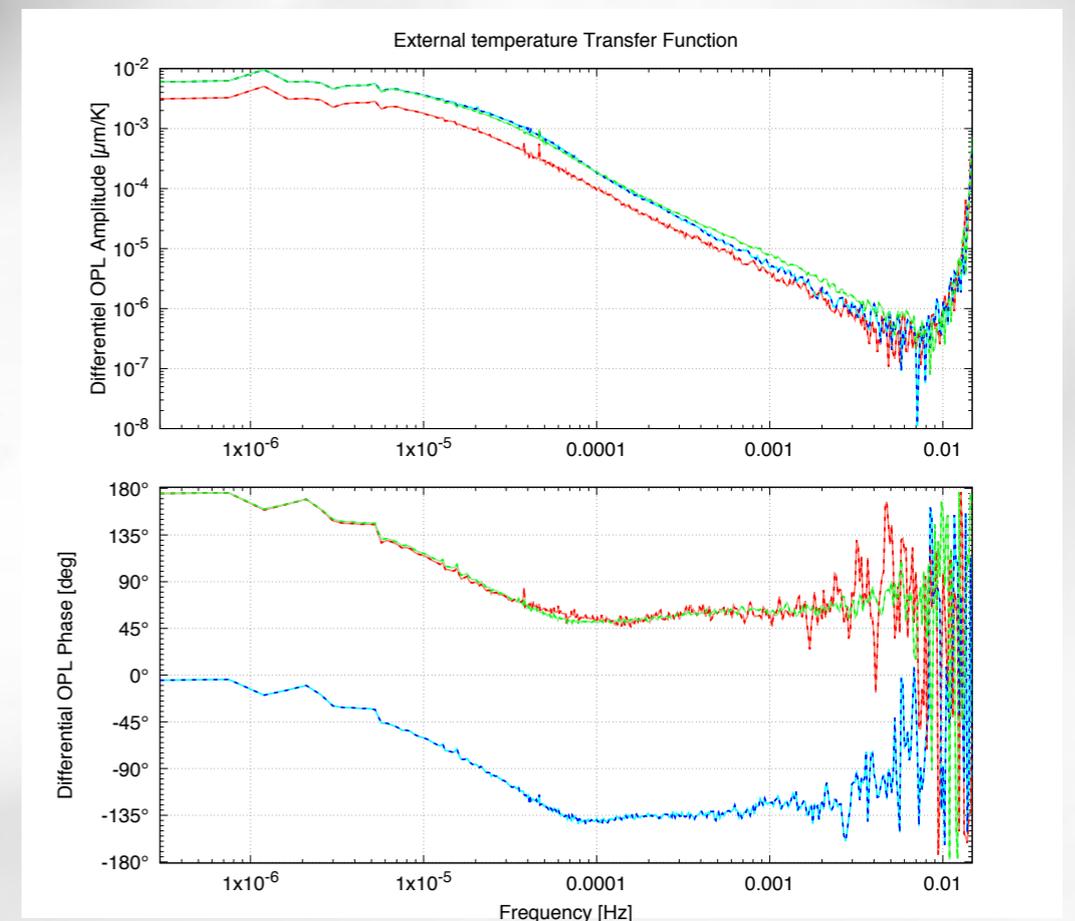
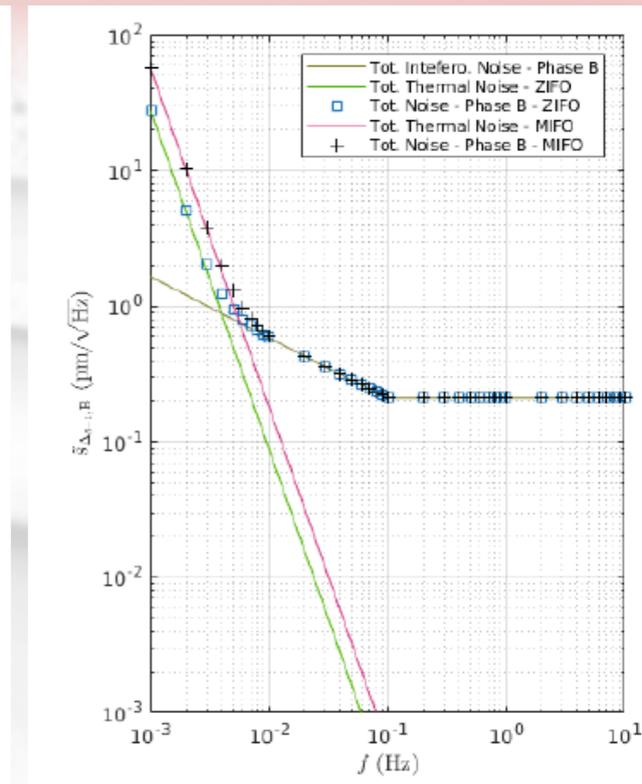
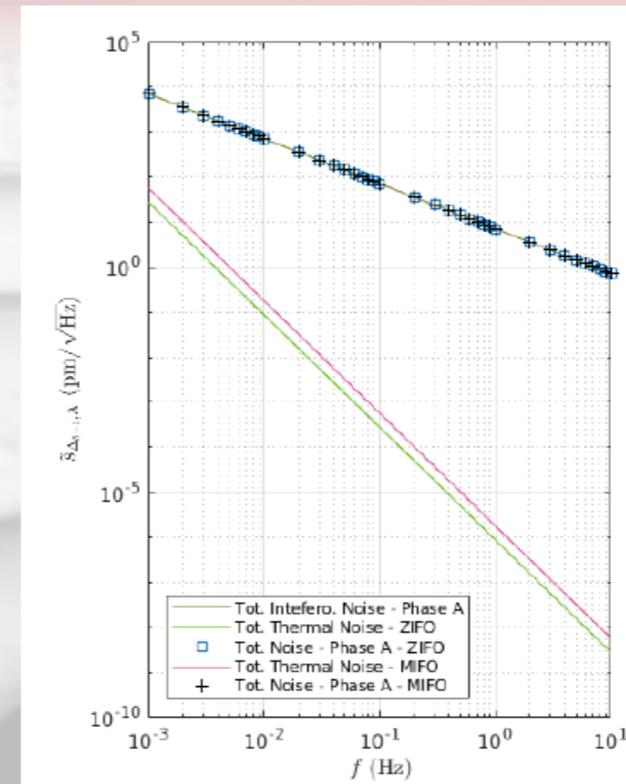
❁ decoupled from the building

❁ ISO 7/8 clean room



Detailed performance modelling:

- Used to identify main source contributors and interpret the results
- Partly based on the LISA performance model
 - Freq. noise, shot noise, RIN, etc.
- Simulations on-going for integrating:
 - TTL effects
 - Thermo-elastic effects and corresponding Temp to OPL transfer functions
 - Straylight and cross-talks contributions





Discussions