

La convergence des perspectives...



CERN plans to collaborate with projects for future gravitational-wave observatories

June 19 2023, by Kristiane Bernhard-Novotny

Connecting the small and the large scales

By collaborating with projects for future gravitational-wave observatories, CERN helps to find echoes from the past

19 JUNE, 2023 | By [Kristiane Bernhard-Novotny](#)





Développements expérimentaux pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles

J. Degallaix

Quelques mots de précaution



- les prospectives scientifiques s'organisent aussi, rendez vous à la rentrée !
- je vais me consacrer aux détecteurs terrestres dit de 3^{ème} génération (Einstein Telescope ou Cosmic Explorer)
- présentations séparées pour PTA / LISA / interférométrie atomique
- je vais essayer d'être exhaustif dans les thématiques de recherche

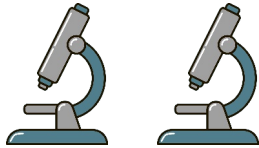
Code

L Δ L < ▽ ∇ Γ Δ ^ Δ ^ Δ ⊔ ▽ ⊓ ▷ ⋈ Δ] Δ] ▽ ✓ ▽ ✓ ▽ L Δ

Intensité de la recherche* :



Veille, activité faible



Intérêt général, quelques groupes



Très compétitif



R&D utile pour LIGO/Virgo (instruments actuels)

* au temps t, ne dit rien sur l'importance du sujet

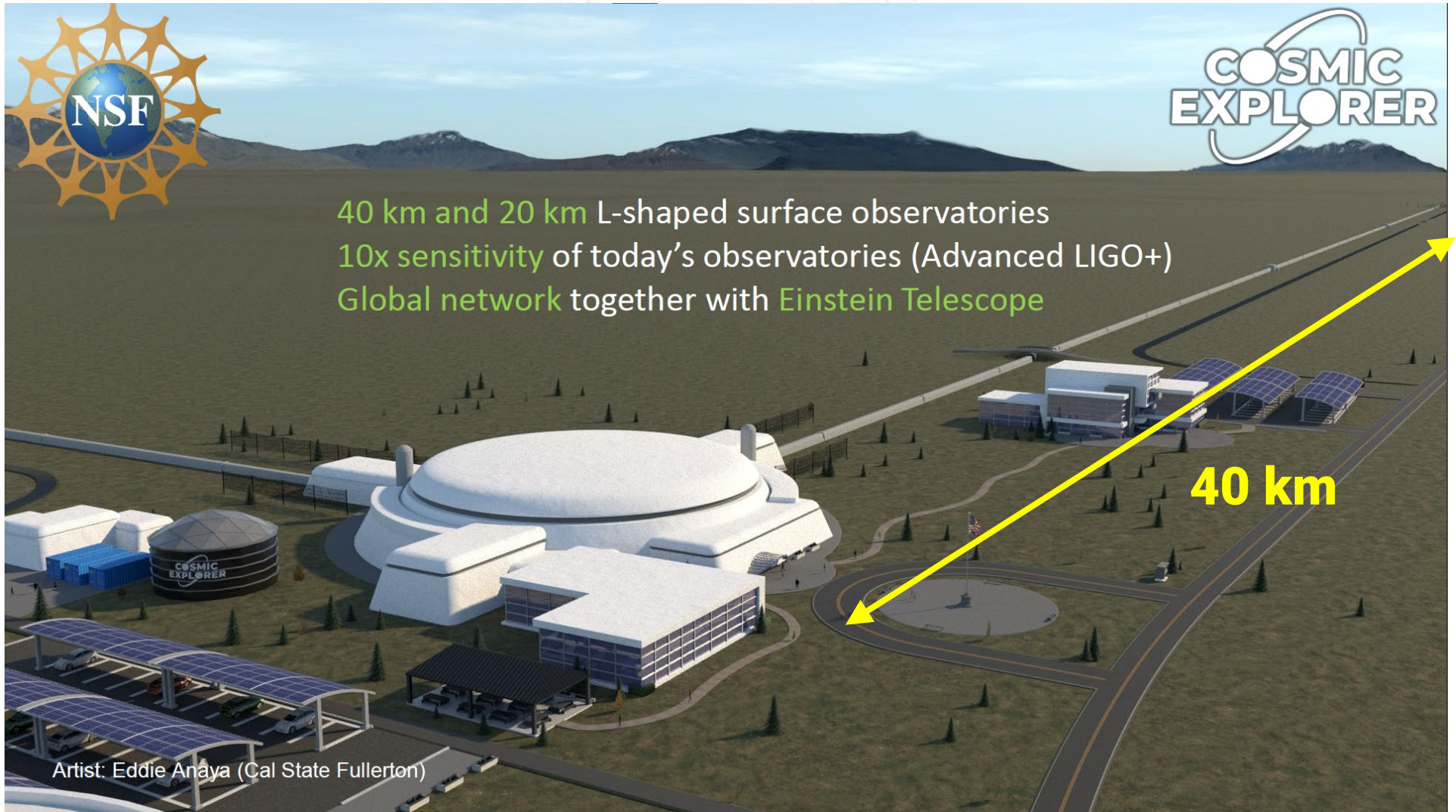
I

Construire un détecteur

Cela peut ressembler à :



Une très grande infrastructure de recherche



L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ



Schéma simplifié

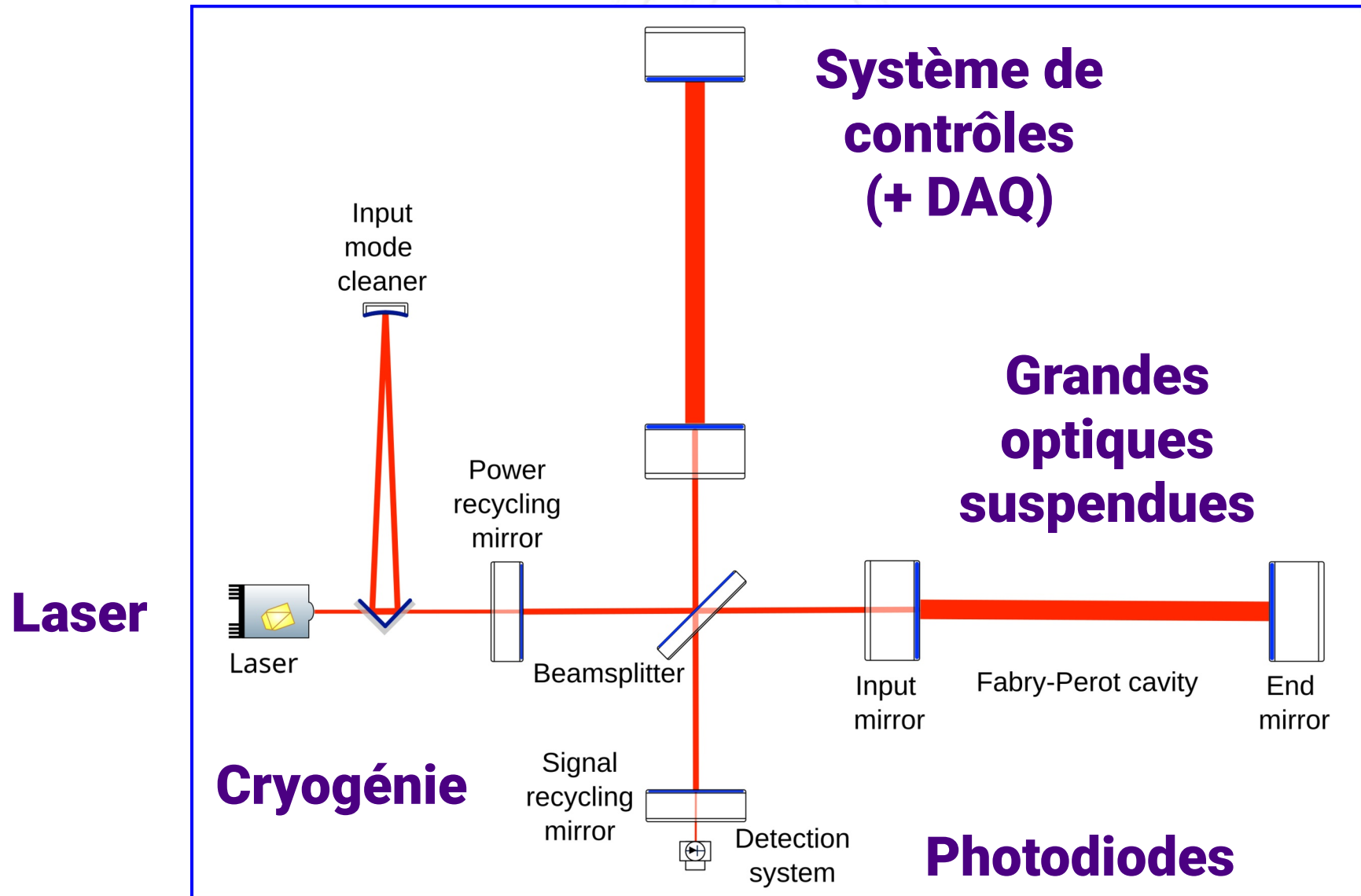
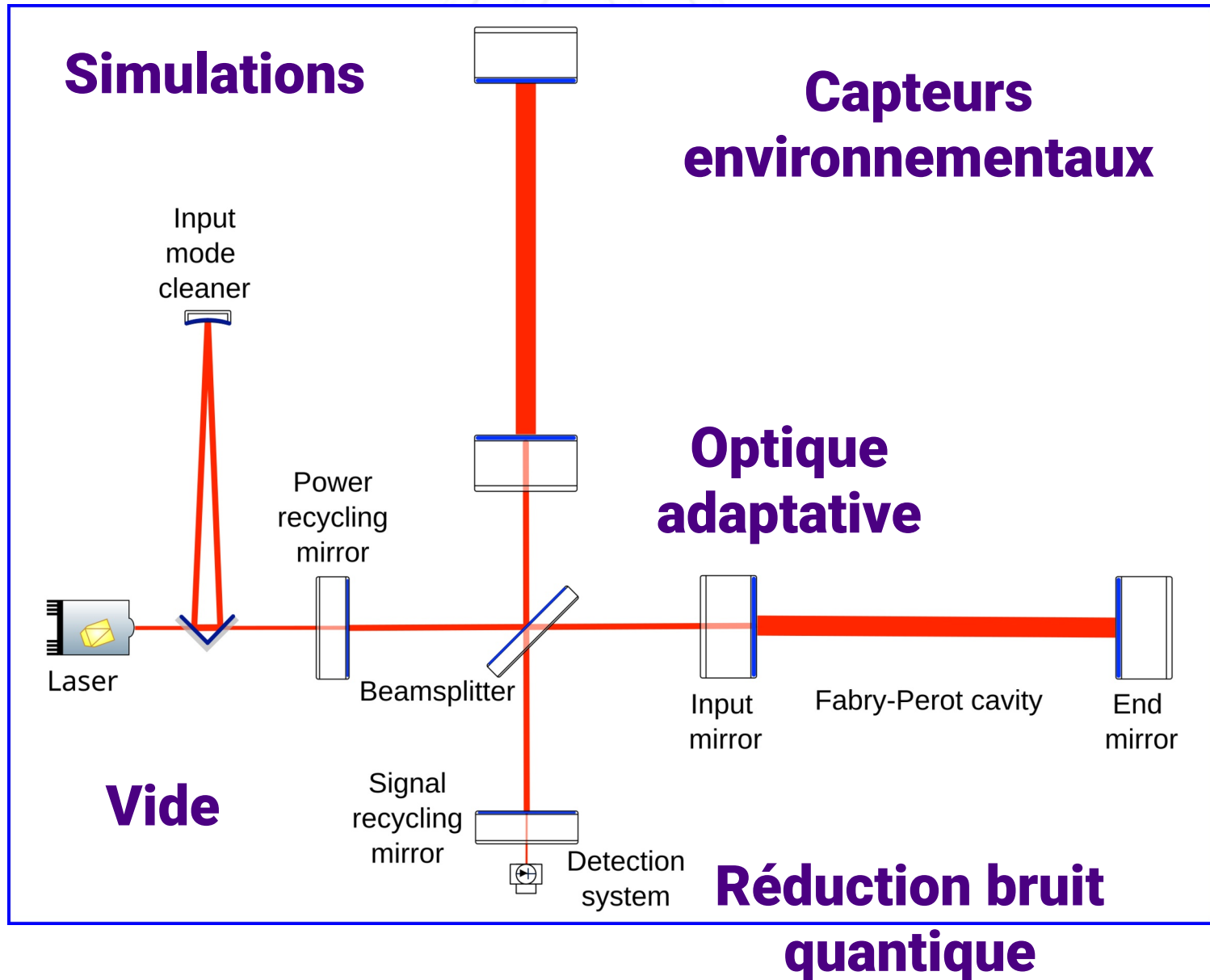


Schéma simplifié



II.

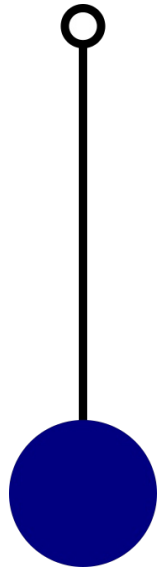
Les suspensions

But : isoler le miroir du bruit sismique

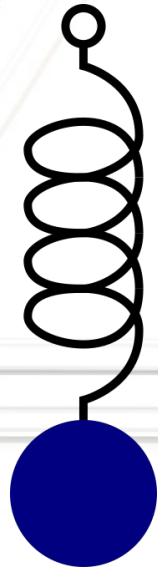


2

- doit isoler dans tous les degrés de liberté
- basé sur le principe des pendules

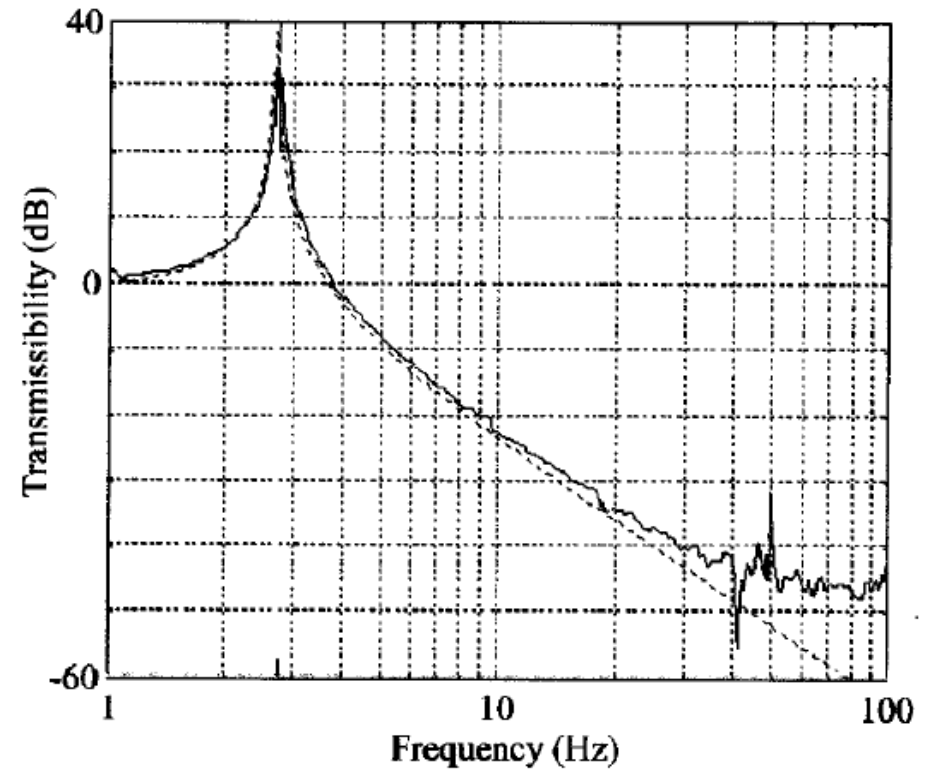


*Isolation
horizontal*



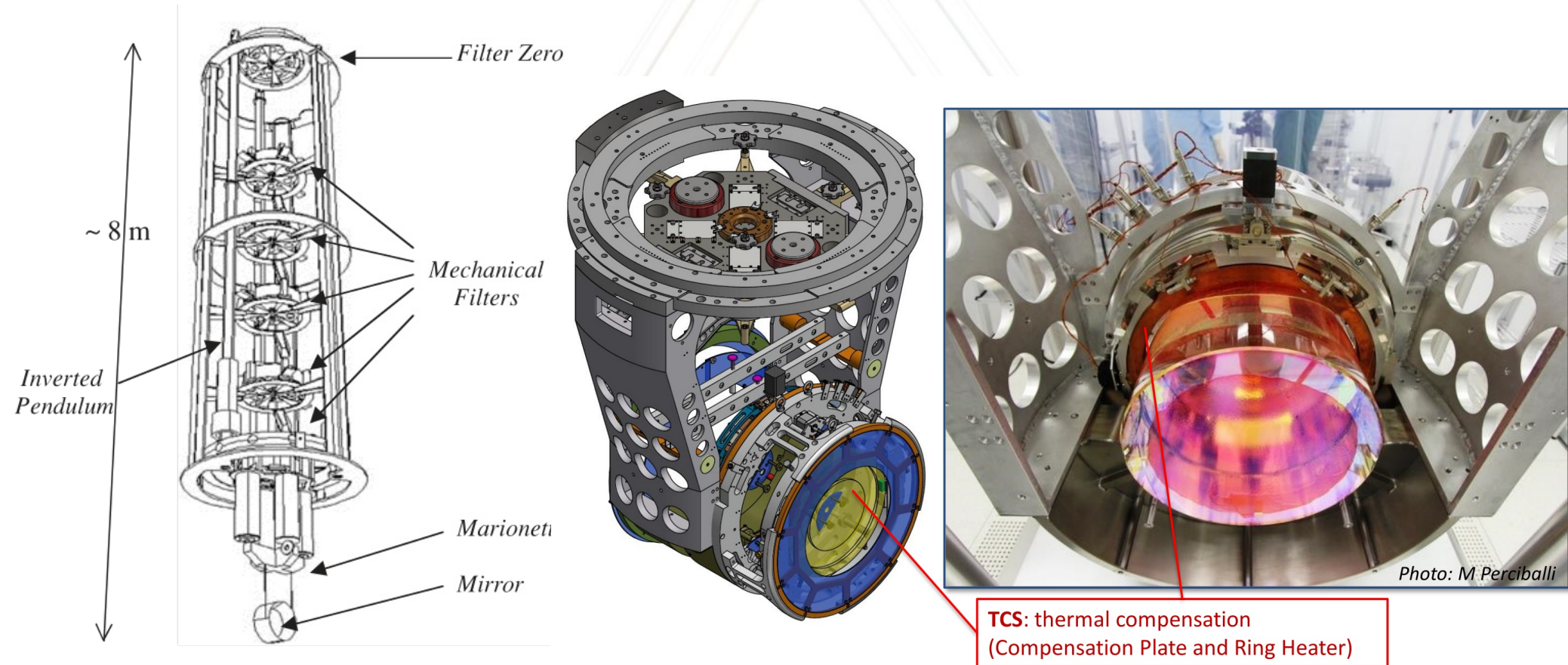
*Isolation
vertical*

miroir



fonction de transfert

Grande expérience dans Virgo



*Le super-
atténuateur
de Virgo*

Le système pour attacher le miroir

[illegible]

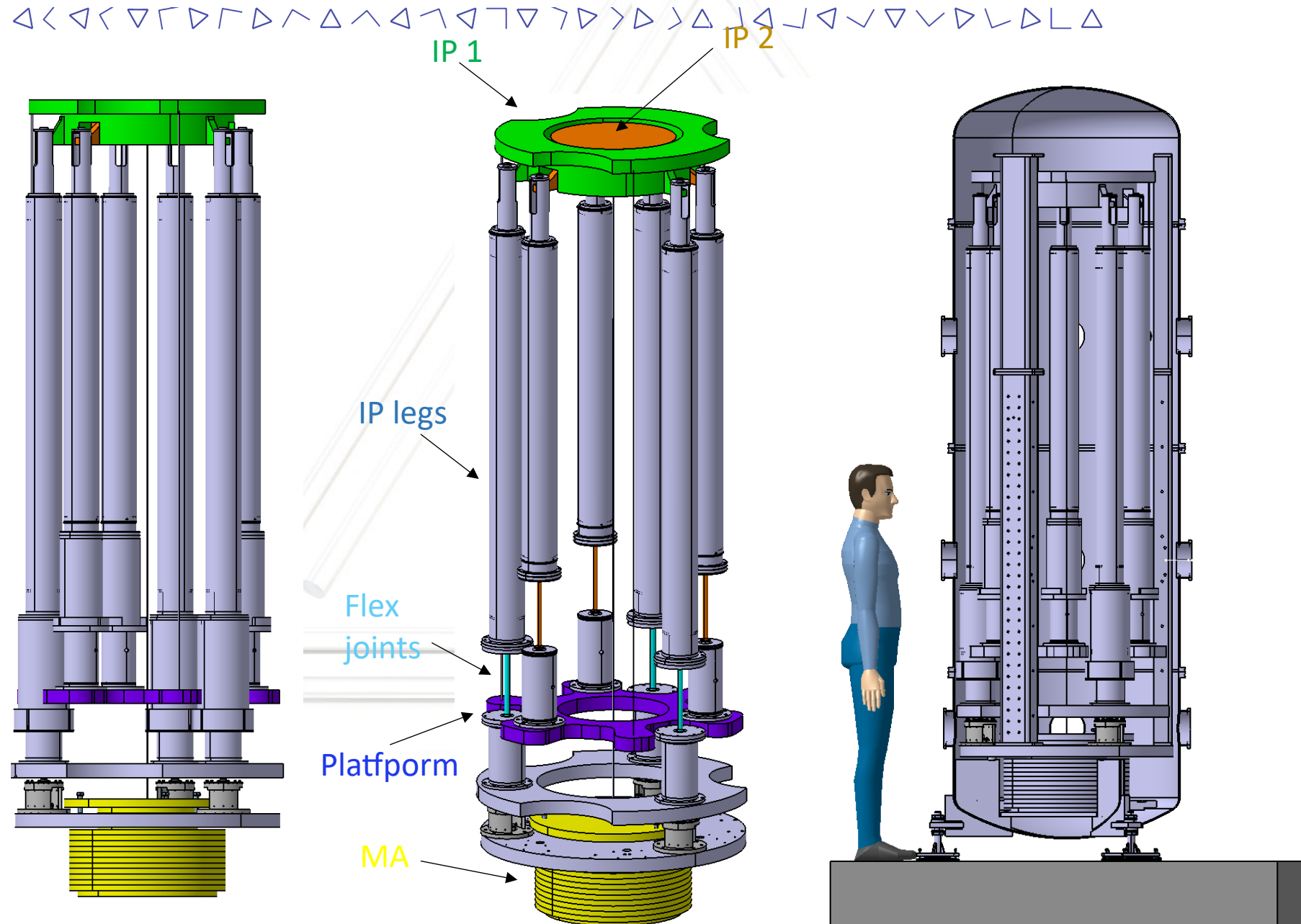
s critiques.



Table optique suspendue

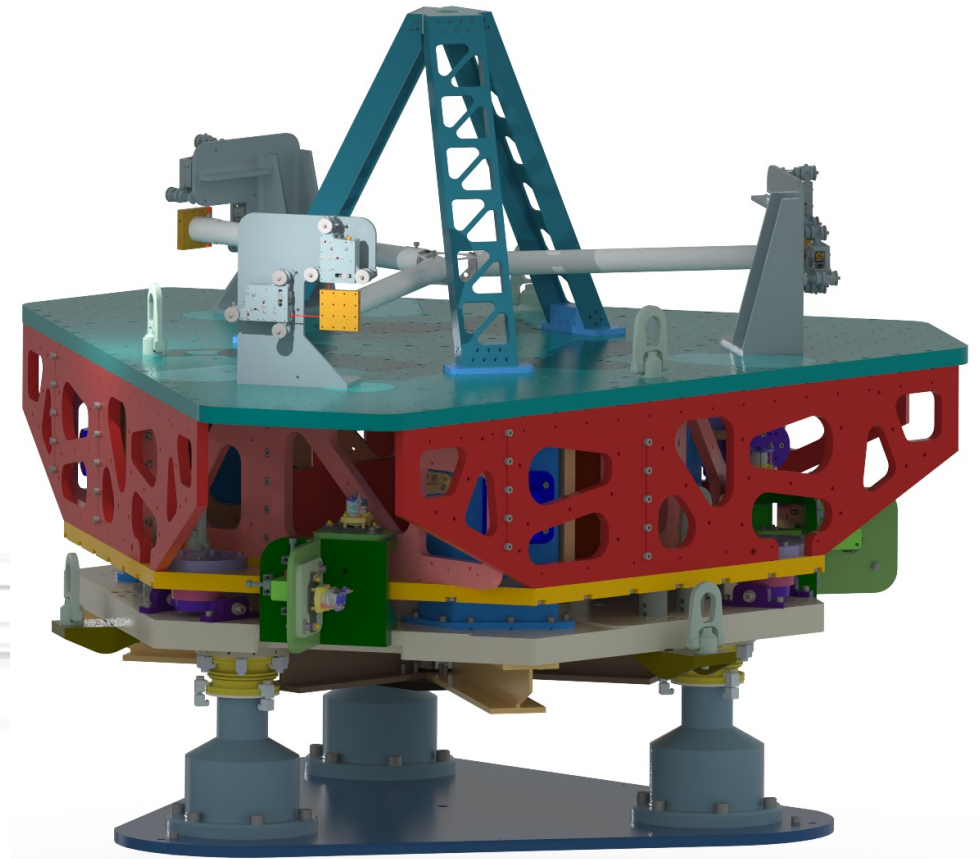


Exemple de développement



new generation seismic isolation system (Italie)

L Δ < Δ < ▽ ∇ ▴ ▾ △ ^ Δ ^ Δ ↗ Δ ↘ ▽ ▹ ▸ ▷ ▻ Δ ▿ Δ ⊂ Δ ⊃ Δ √ ▽ ∨ ▽ ∟ Δ



16

L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ L Δ



Interreg
Euregio Meuse-Rhine
European Regional Development Fund

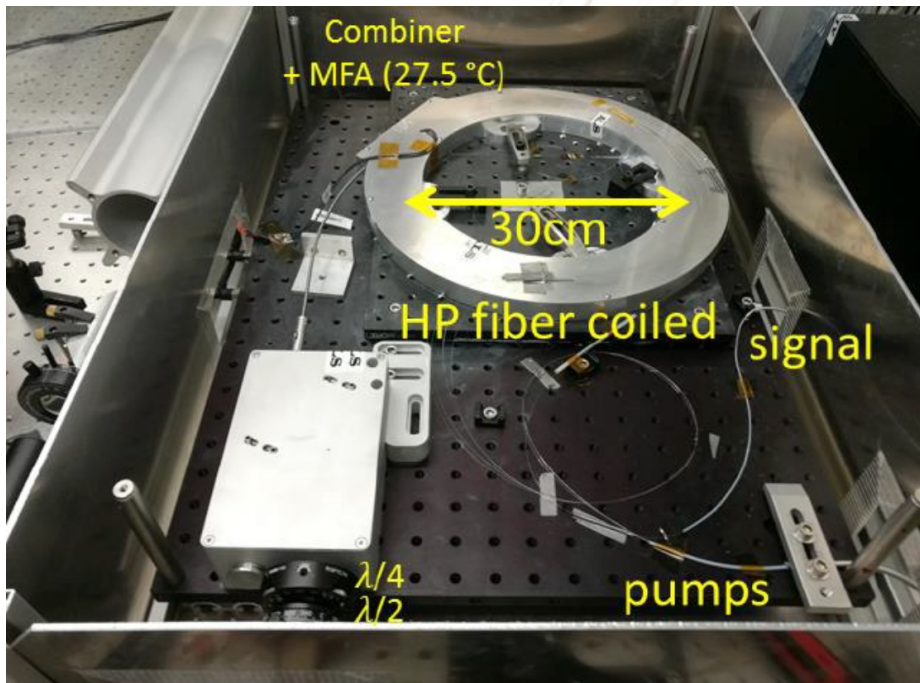

EUROPEAN UNION

II.

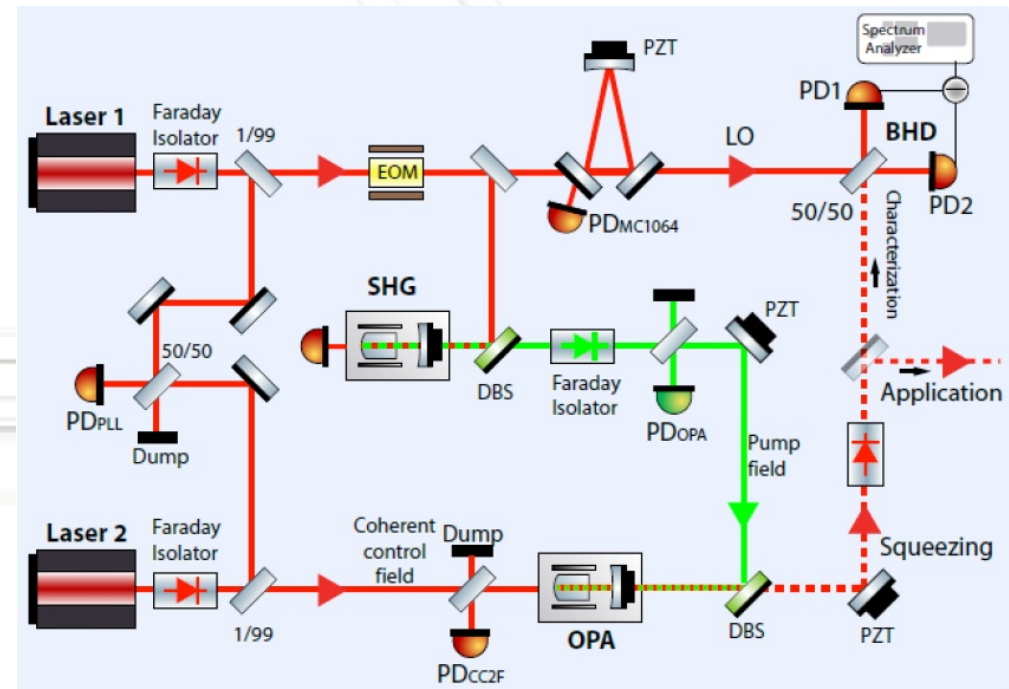
Optiques

Optique

- fournir les grands miroirs (déjà présenté)
- comprend le laser, injection, détection, lumière diffusée, contrôle des aberrations et la réduction du bruit quantique
- bonne implication française (LMA, LAPP, IJCLAB, APC, Artemis)

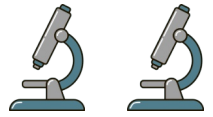


Laser fibré



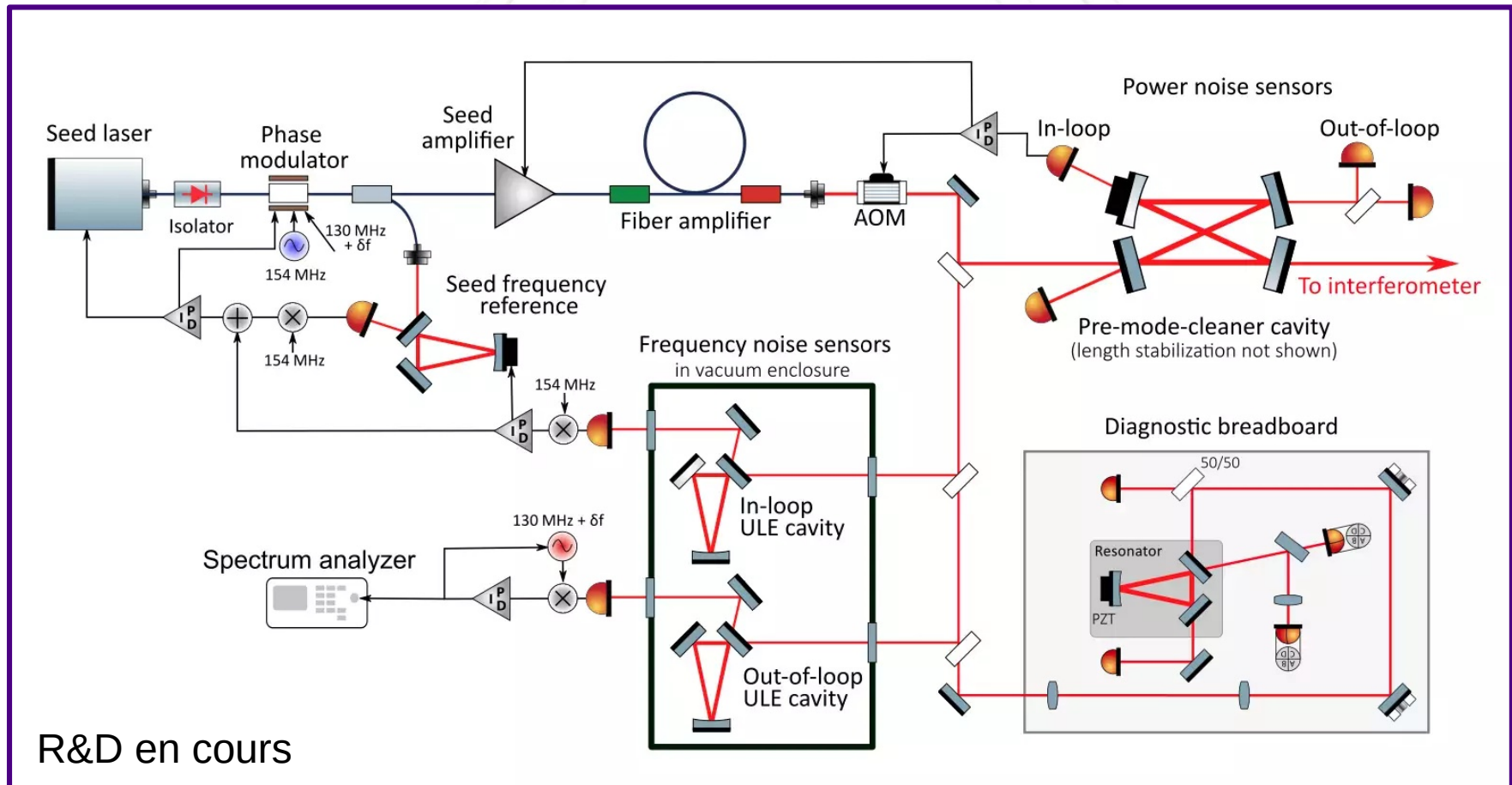
Génération de lumière comprimée

Le laser



2

- laser de puissance (1064 nm) ~700W
- stabilisé en amplitude, fréquence, pointage
- plusieurs cavités amplificatrices, fibrées ou non

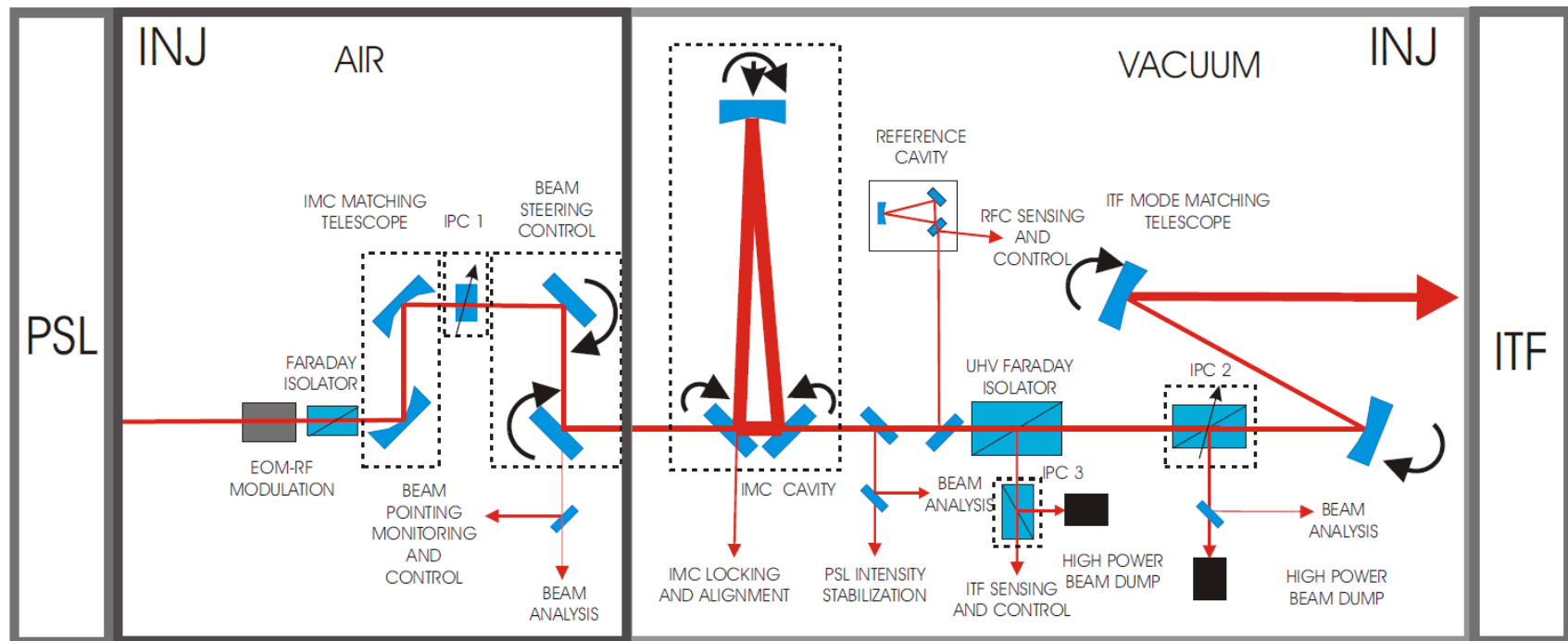


L'injection



2

- entre le laser et l'entrée de l'interféromètre
- conditionne le faisceau pour le couplage optimal
- travaux de design optique et asservissement

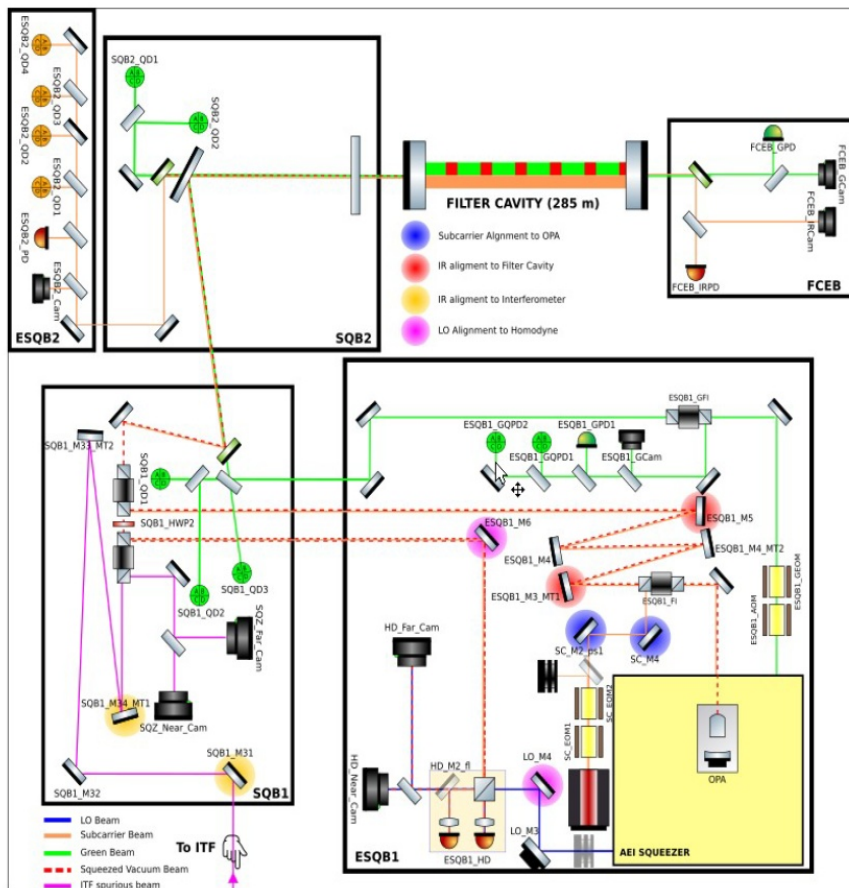


Exemple pour Advanced Virgo

- pas toujours évident mais on sait faire !

La lumière comprimée du vide

- pour augmenter la sensibilité, réduire les incertitudes liées à la nature quantique du vide
- système complexe en sortie de l'interféromètre, déjà démontré sur LIGO et Virgo



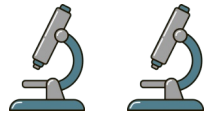
Unresolved aspects* of simulating quantum squeezed noise

*really just a cry for help

Mikhail Korobko

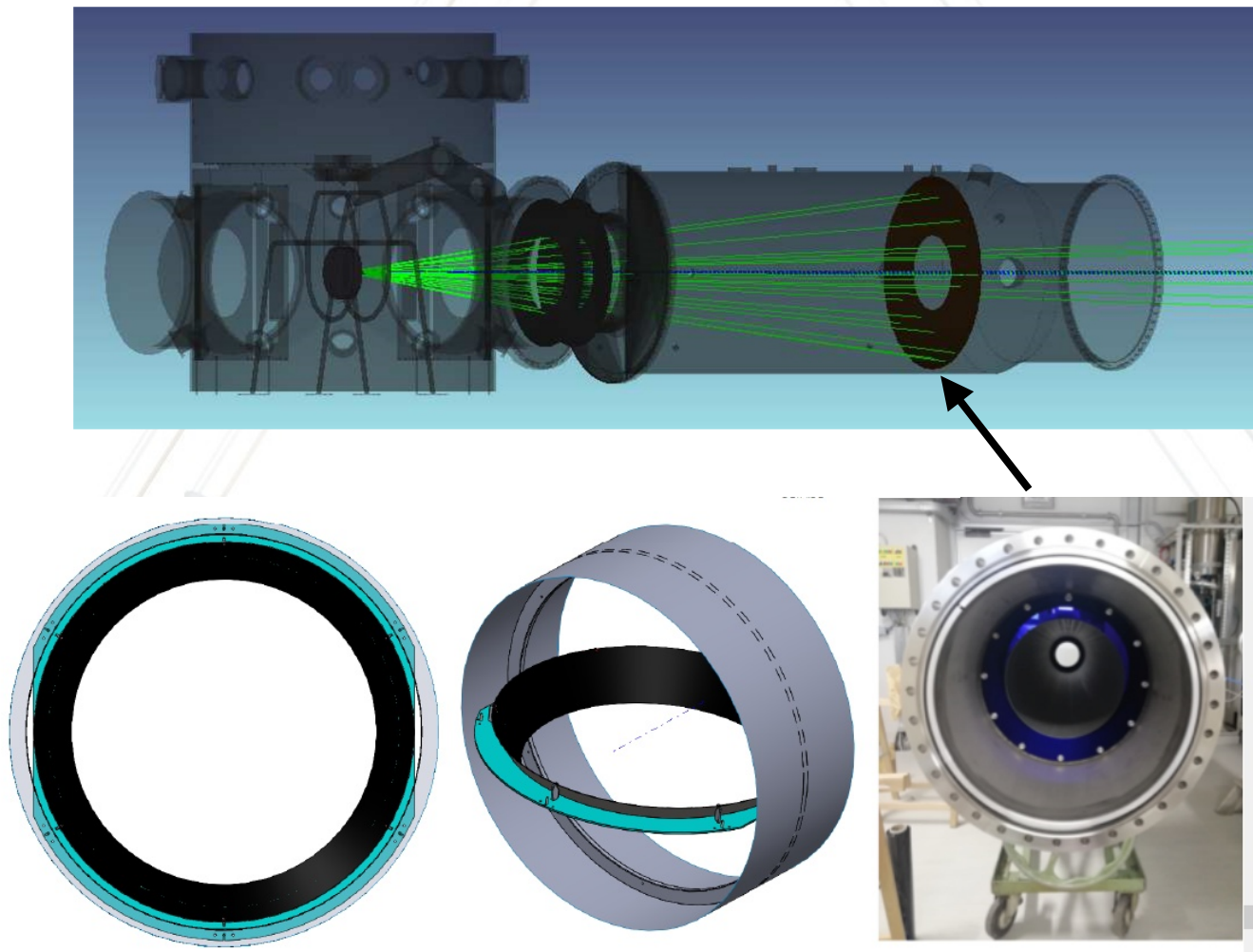
XIII ET Symposium May 2023

Capter la lumière diffusée



2

- un soucis dans tous les interféromètres
- R&D en cours sur le design des baffles dans les tubes à vide



Quel matériaux ? comment les construire ? les installer ?

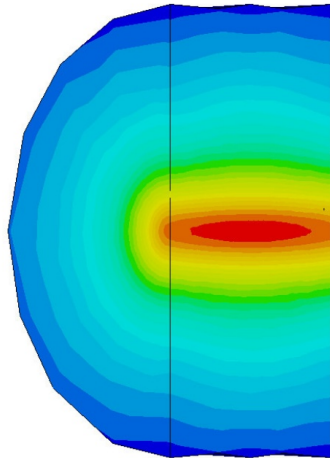
Optique adaptative



2

- Plusieurs MW de lumière sur les miroirs → distorsions du front d'onde de la lumière
- Problème déjà présent actuellement
- Pour ET/CE : nouveaux capteurs et correction axisymétrique

NODAL SOLUTION

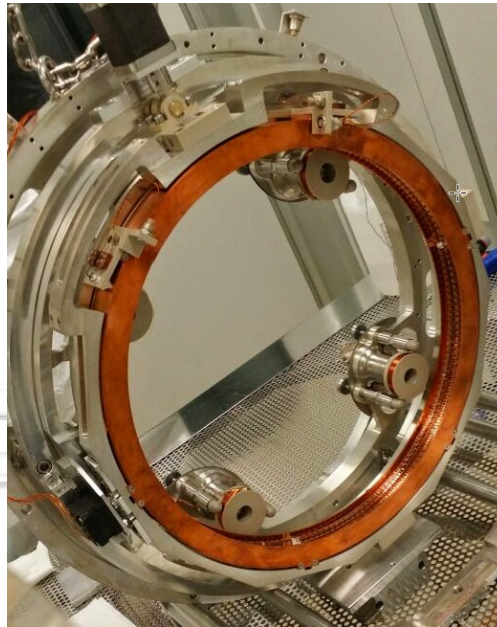


ANSYS
PLOT NO. 1

305.71 305.734 305.758 305.782 305.806 305.83 305.854 305.878 305.91

Gingin Test 1

*Profil de température
d'un miroir*

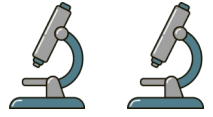


Anneau chauffant



Laser CO₂

Le futur : vers des longueurs d'onde plus grandes



2

- réduction de la lumière diffusée, absorption plus basse
- une partie de ET avec un laser à 1550 nm
- pour le futur 2 μm ?



Tout l'environnement est à développer
(laser, photodiode, caméra, optique,...)

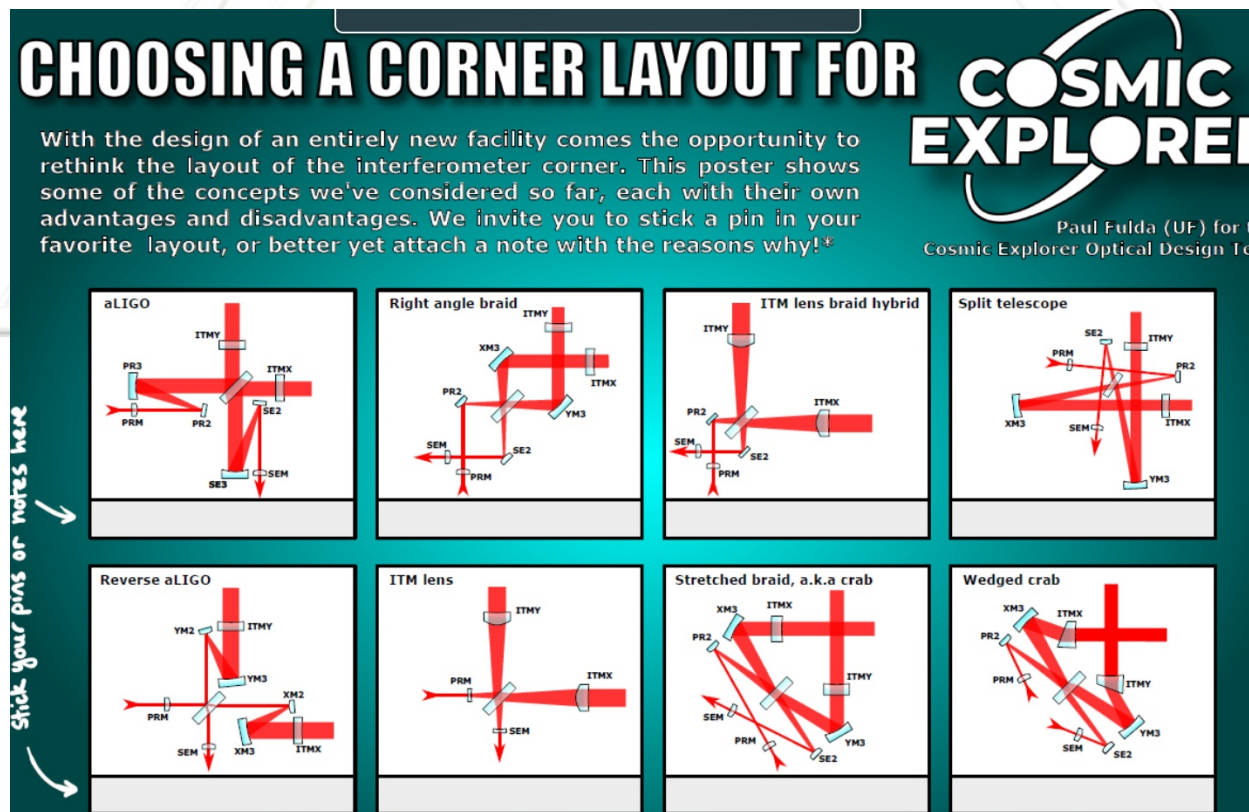
III

Interféromètre / contrôle

Le design optique



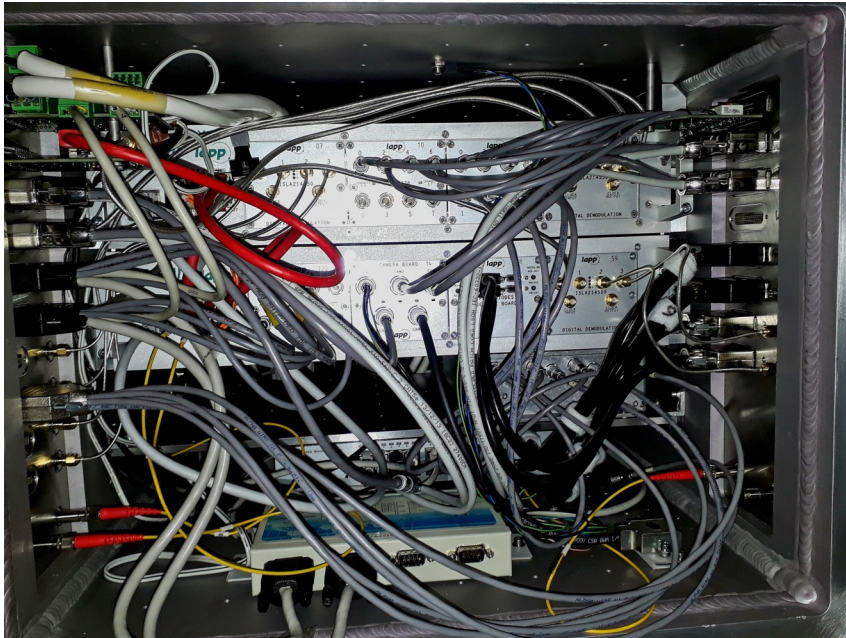
- développement de nouveaux outils de simulations (simulations de ray-tracing 3D, ajout des effets de biréfringence, simulation dans le domaine temporel)
- stratégie de contrôle de l'interféromètre (recherche de signaux d'erreur robustes)



DAQ, timing, système temps réel



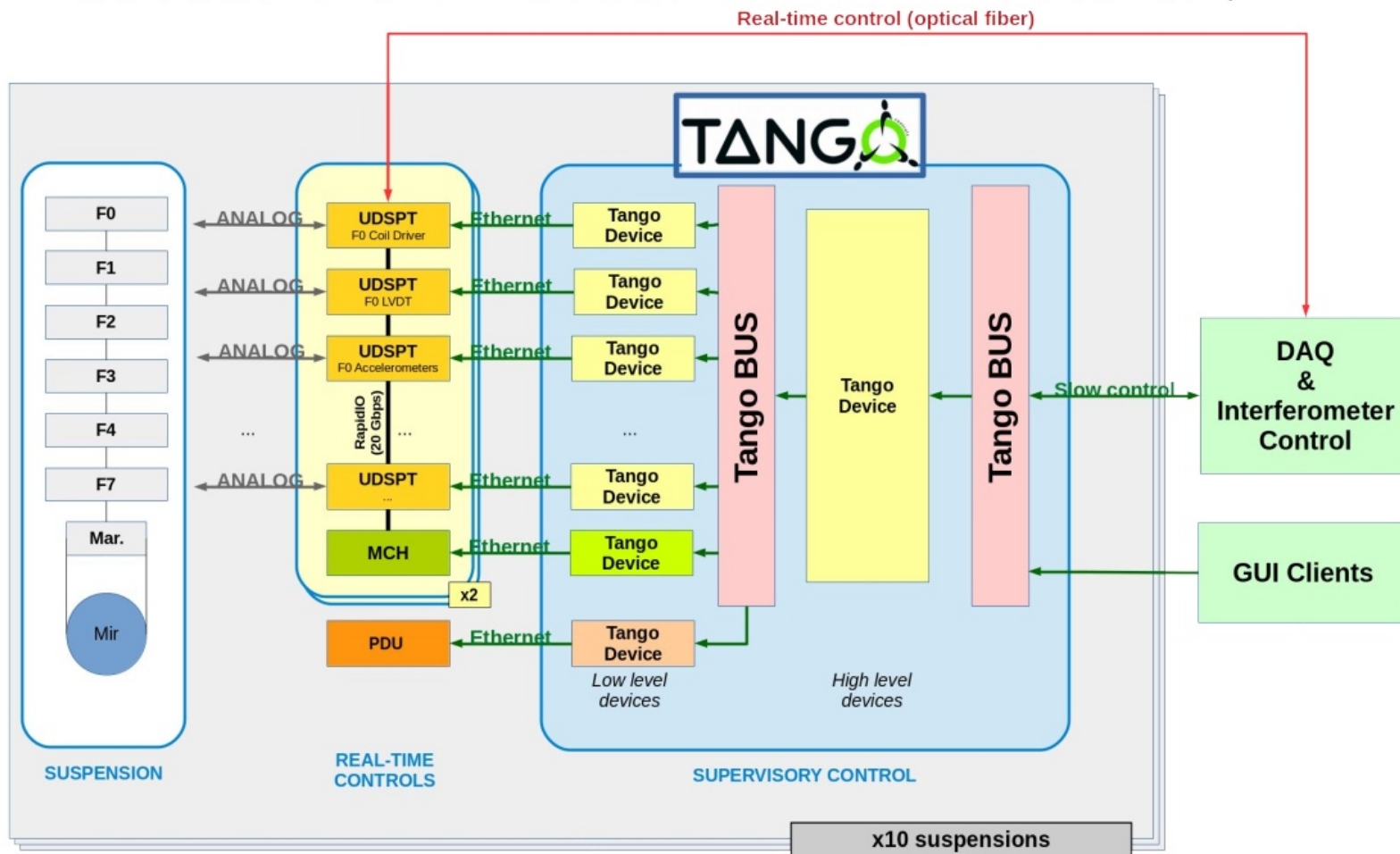
- pas vraiment d'activité pour ET/CE
- discussion: système commercial ou fait maison (comme à Virgo) ?
- pour le timing, on parle de White Rabbit (Nikhef)
- participation aux prototypes



Boite DAQ pour Virgo

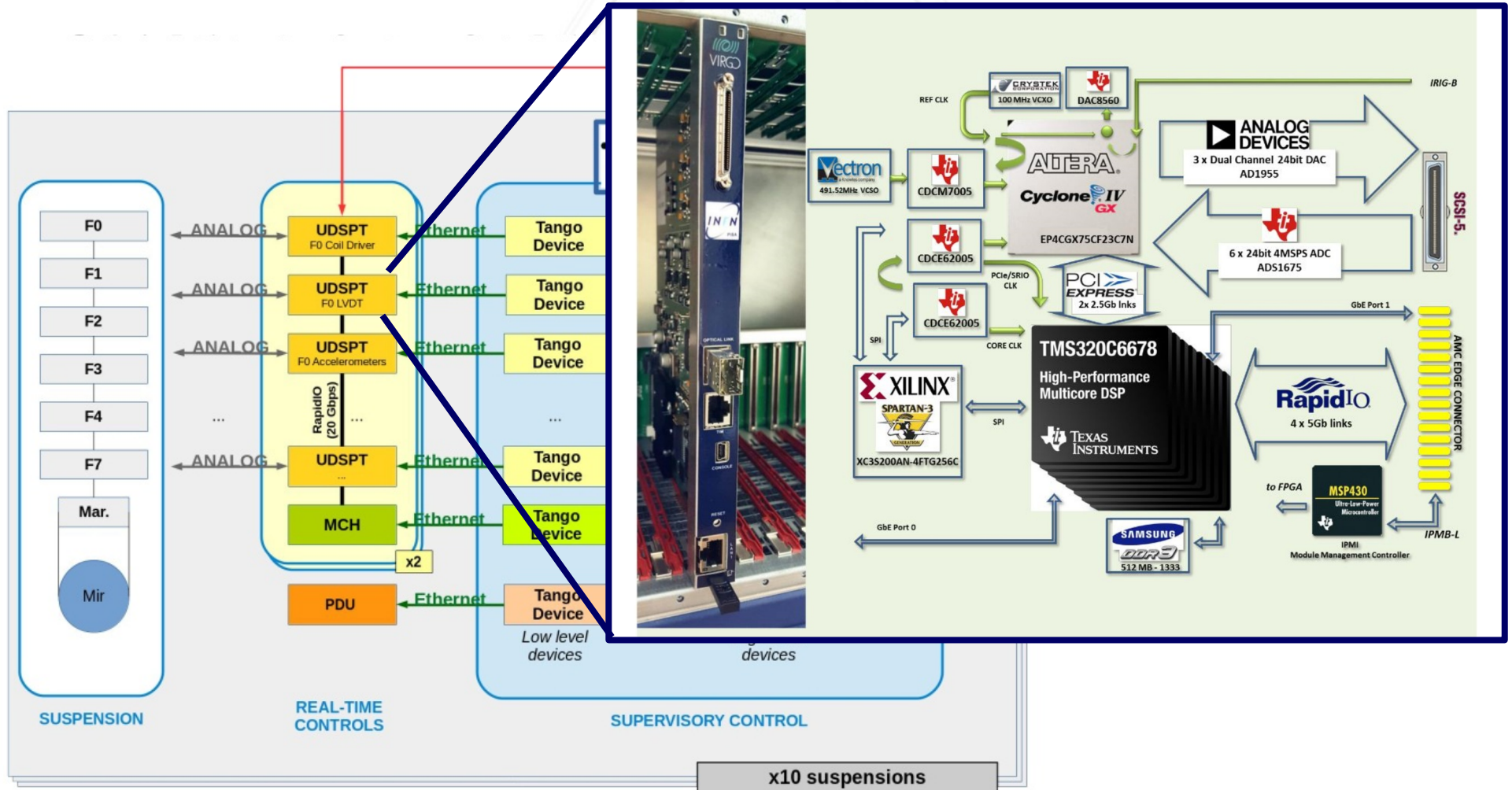
DAQ, timing, système temps réel

Exemple pour Virgo d'un contrôle d'une suspension :



DAQ, timing, système temps réel

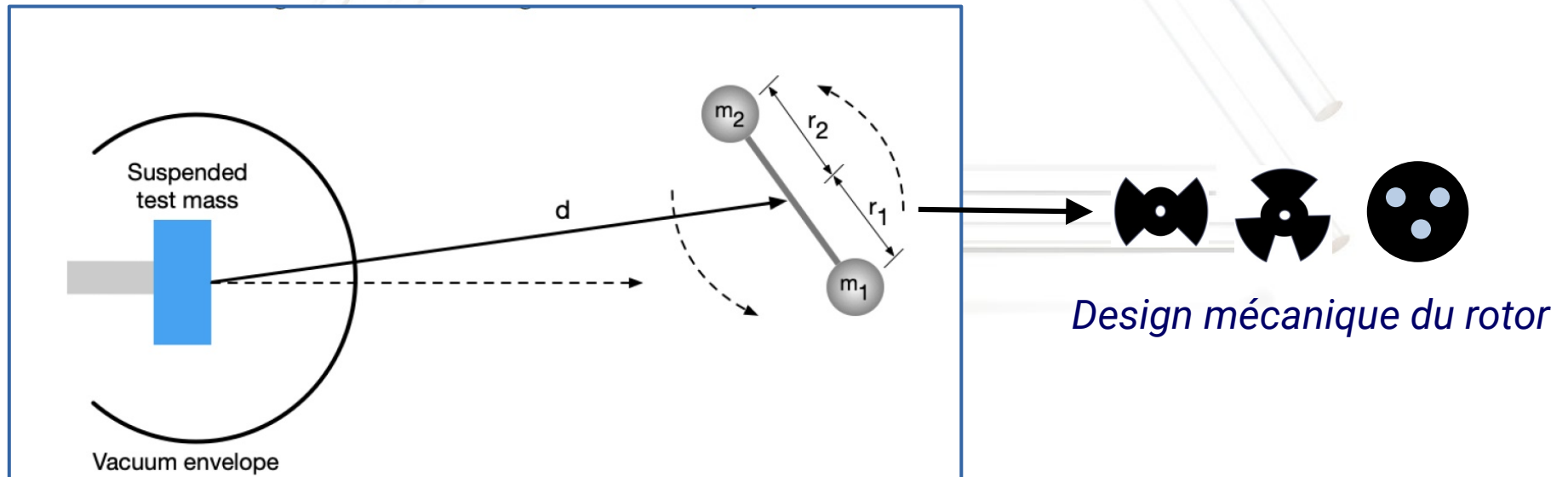
Exemple pour Virgo d'un contrôle d'une suspension :



Calibration



- la précision requise pour la calibration est donnée par les buts scientifiques
- 3 fois plus précis en amplitude et phase que ce que nous avons maintenant
- activité faible mais des nouveaux designs d'actuateurs pour injecter du signal en cours de test à LIGO / Virgo



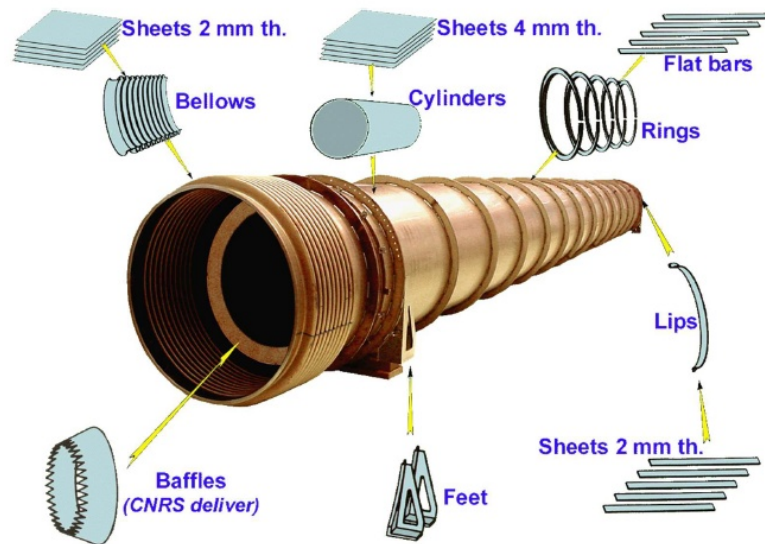
IV

Vide / cryogénie

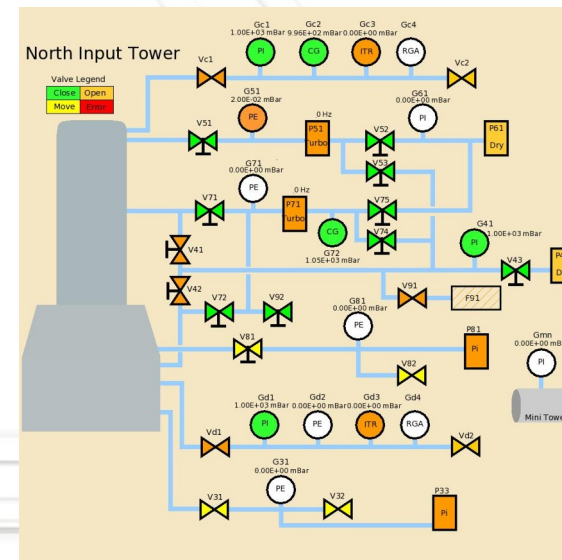
Vide



- 120 km de tube UHV, pression de 10^{-10} mbar
- des dizaines de tours à vide
- R&D et conception sur :



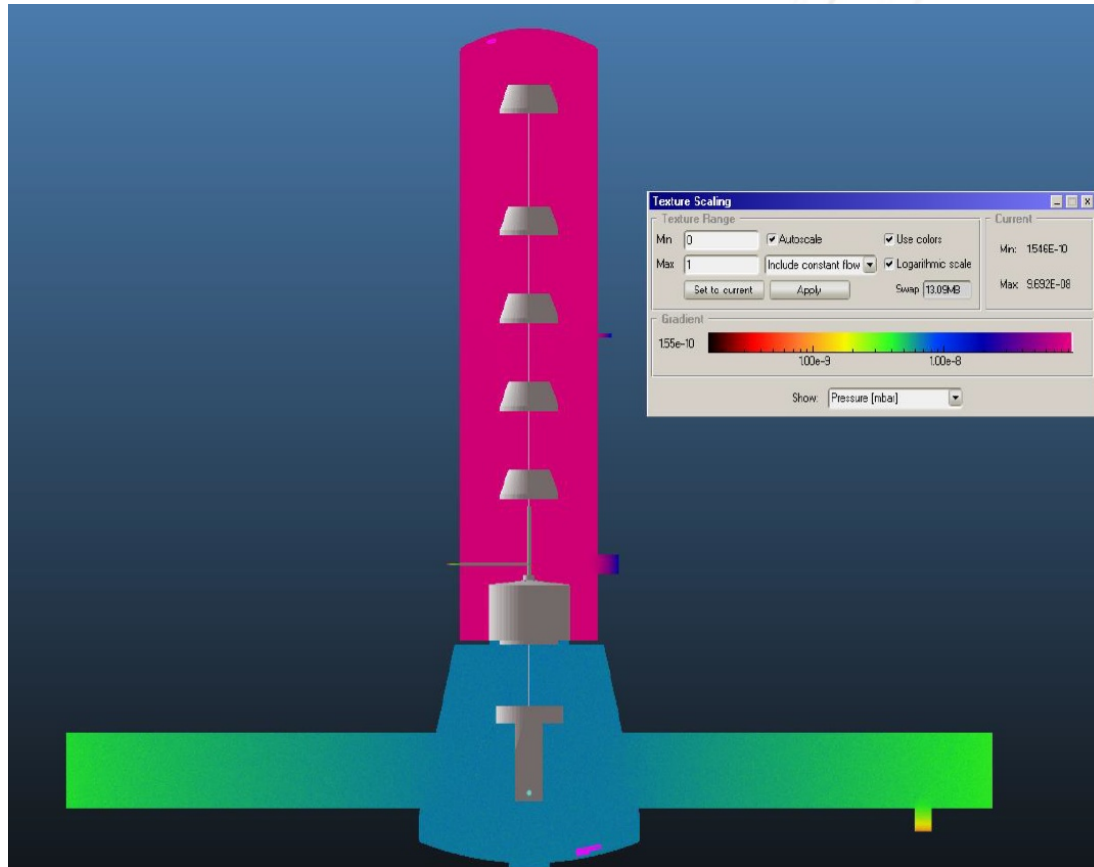
Design du tube à vide



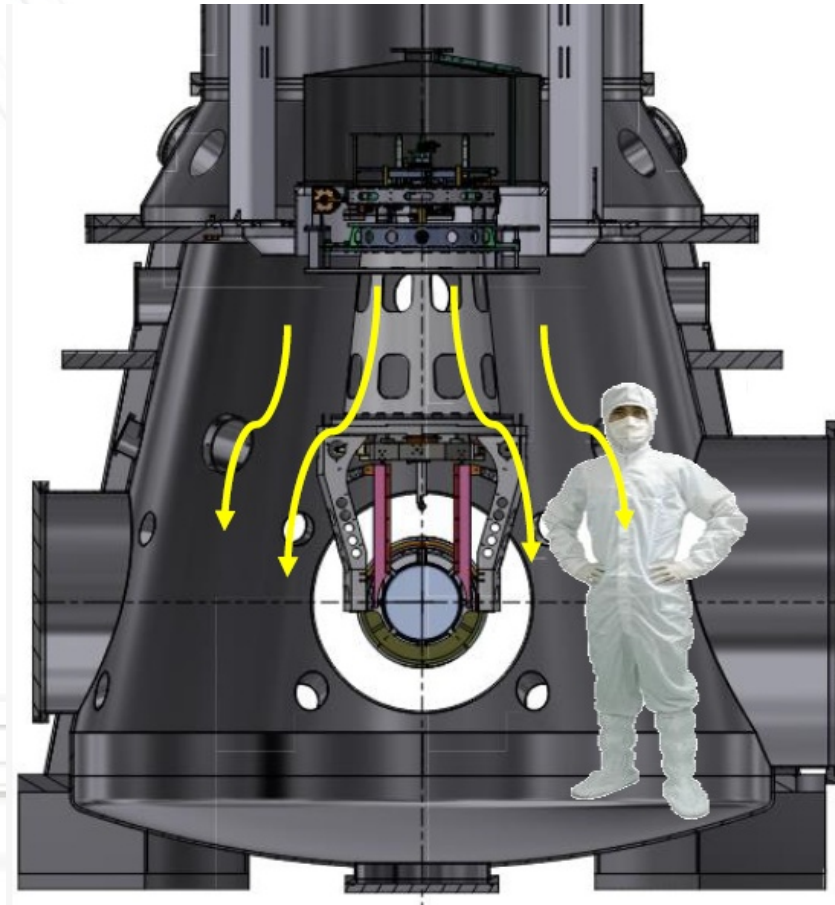
*Stratégie de pompage
+ contrôle*

Avec la participation du LAPP et IJCLab et le CERN sur le tube à vide.

Exemple : étude des tours à vide



Simulation du gradient de pression

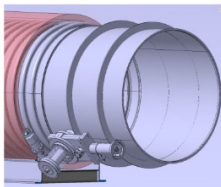
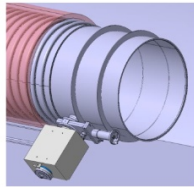


Flux d'air pour garder la tour propre lors d'intervention

Exemple : tube à vide



Main achievements of WP1: pumping modules

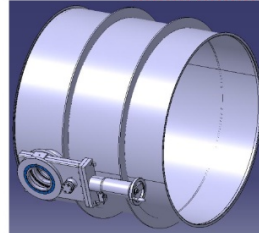
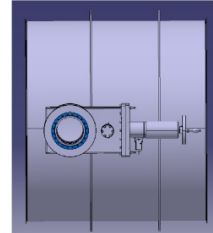
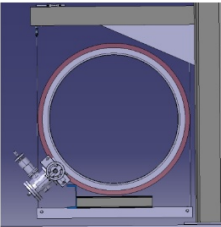
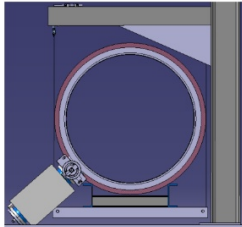


Straight tubes, initial assumptions:

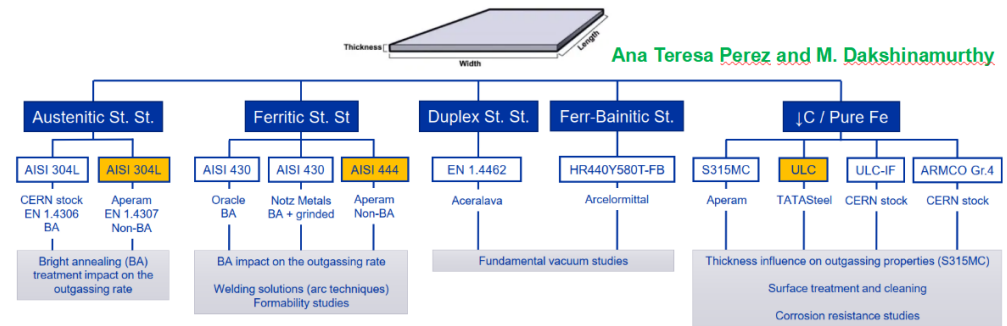
- 3-4 mm thick, 1-m long
- Stiffeners
- Gate valves DN160 and DN100

Integration issue with large ion pumps (500 l/s).

Cedric Garion



Main achievements of WP2: material selection



Material selection will impact manufacturing strategy, cleaning, installation procedure and inspection plans, but also future actions like service maintenance, and cost.

AISI 304L is 1.5 and 4 times more expensive than AISI 430 and S315MC, respectively

However, material cost per kg is not always the most important economic consideration.

Main achievements of WP3: pre-prototype cleaning

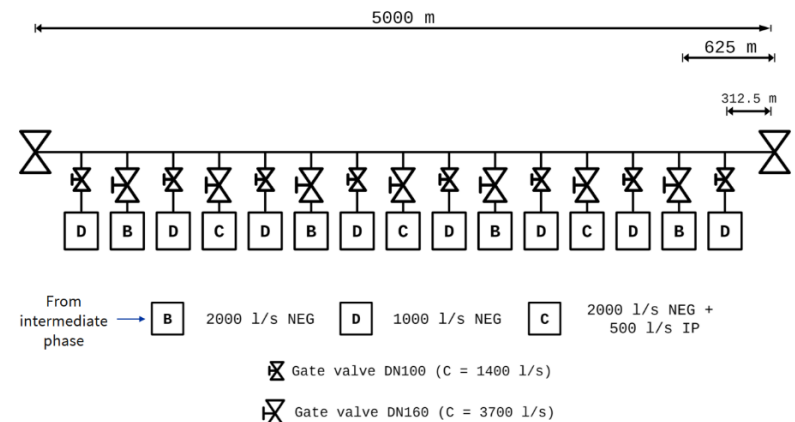
Detergent cleaning



Solvent cleaning



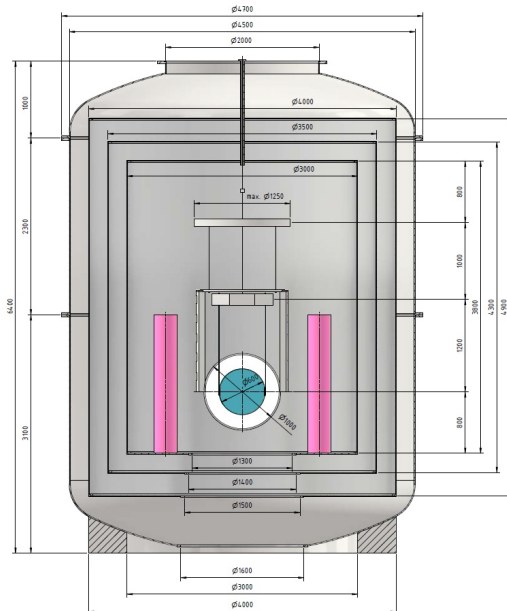
Main achievements of WP6: pumping scheme



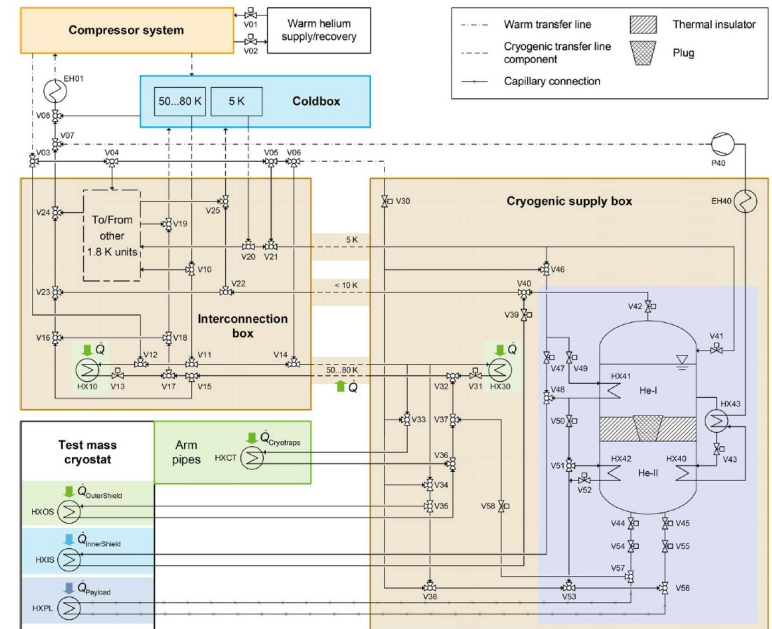
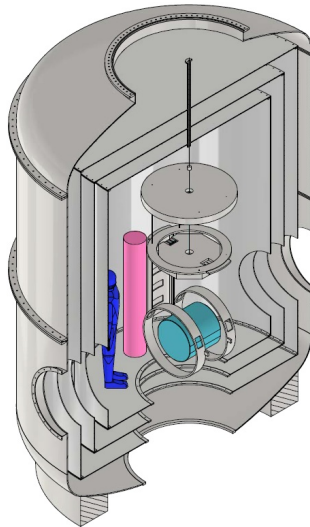
Cryogénie



- comment refroidir le miroir (~ 10 K) sans ajouter de bruit ?
- collaboration avec KAGRA qui opère déjà à 20 K
- design aussi de l'infrastructure

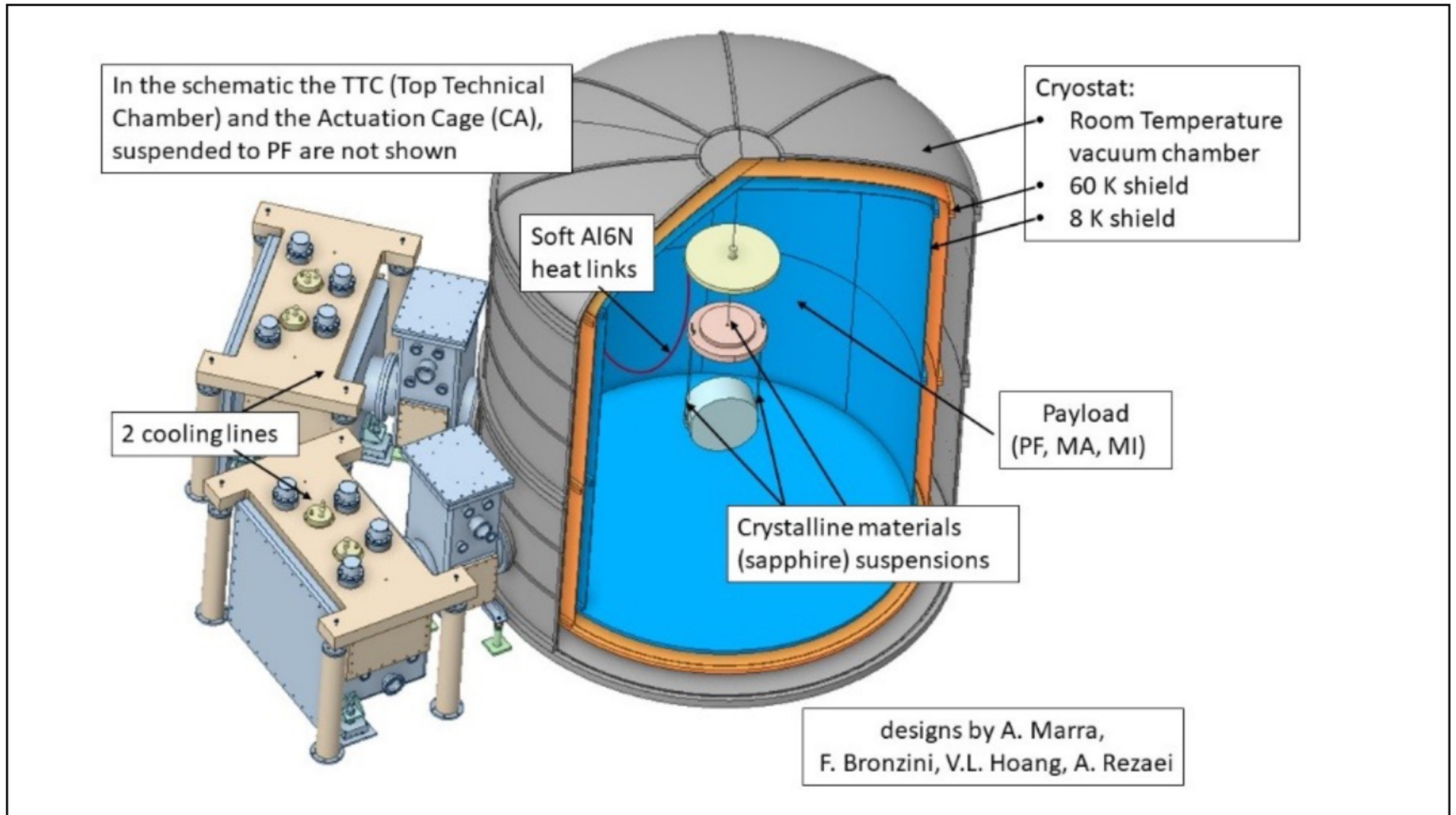


Idée de cryostat



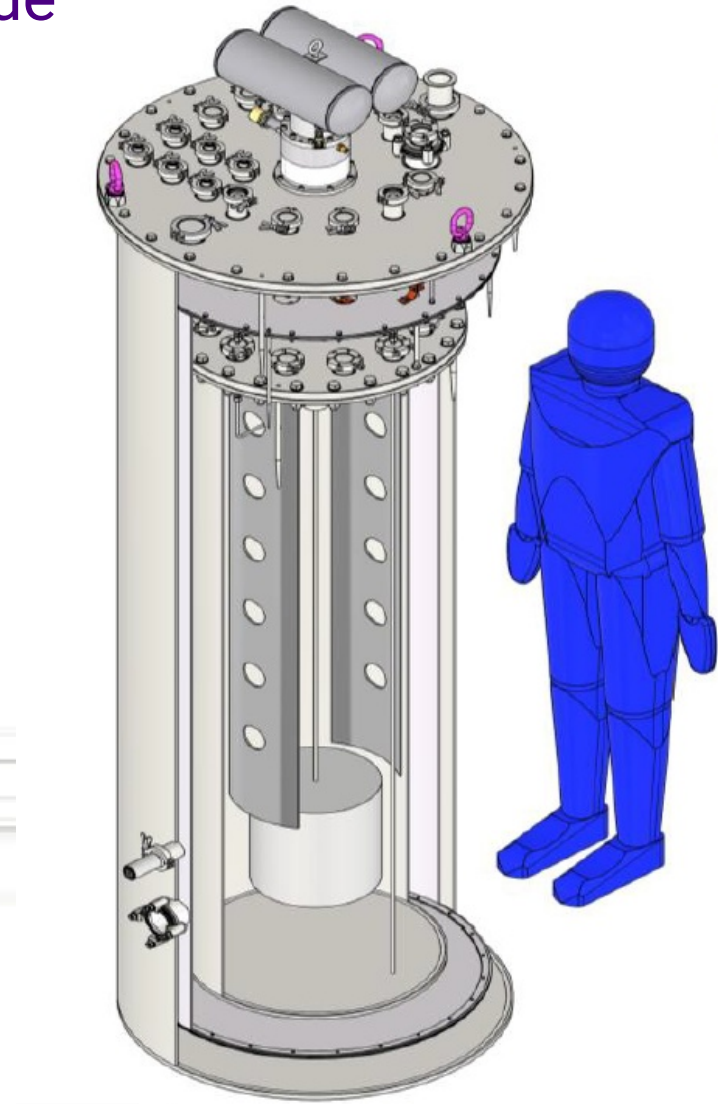
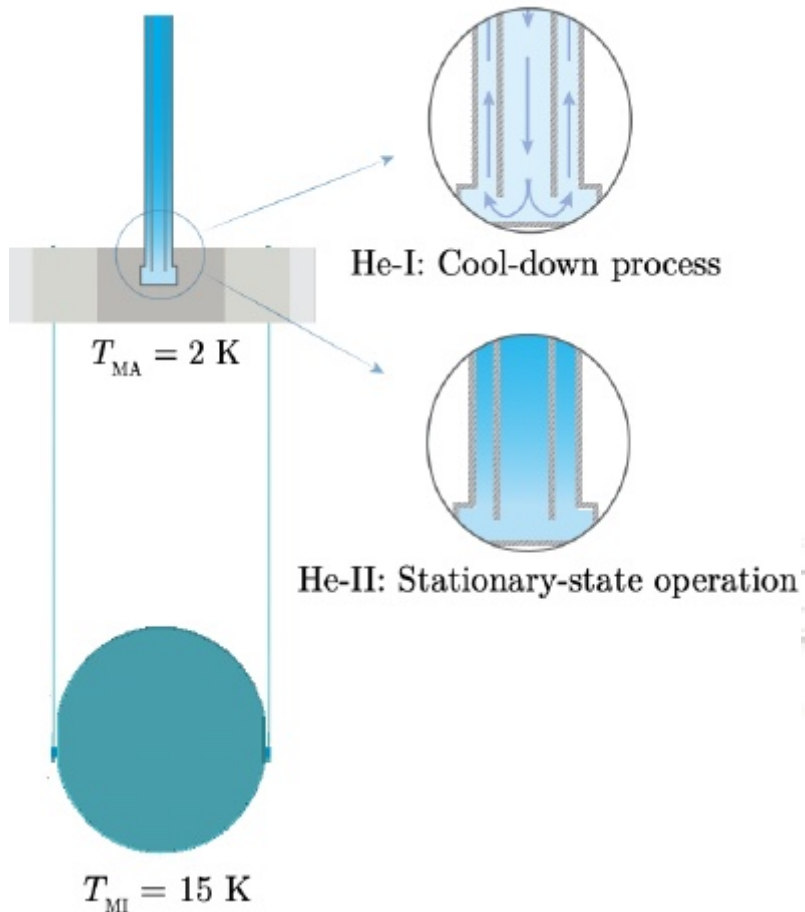
Opération de l'hélium liquide

Exemple de prototype



Exemple de prototype

avec utilisation de He-II super-fluide



KIT – pour une version future de ET ?

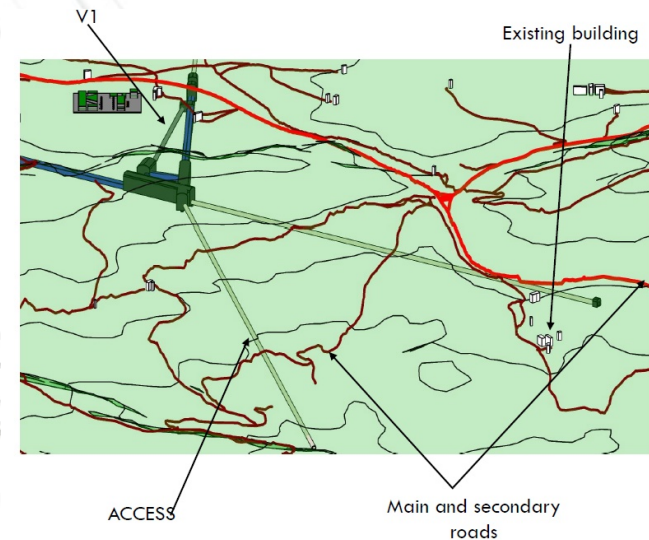
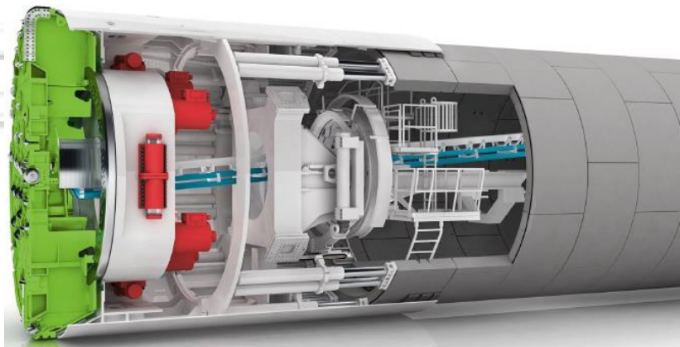
V

Infrastructure, caractérisation du site

Infrastructure



- stratégie pour la construction des tunnels et cavernes
- gestion de l'infrastructure souterraine
- intégration dans l'environnement local



Taille, forme des cavernes ?

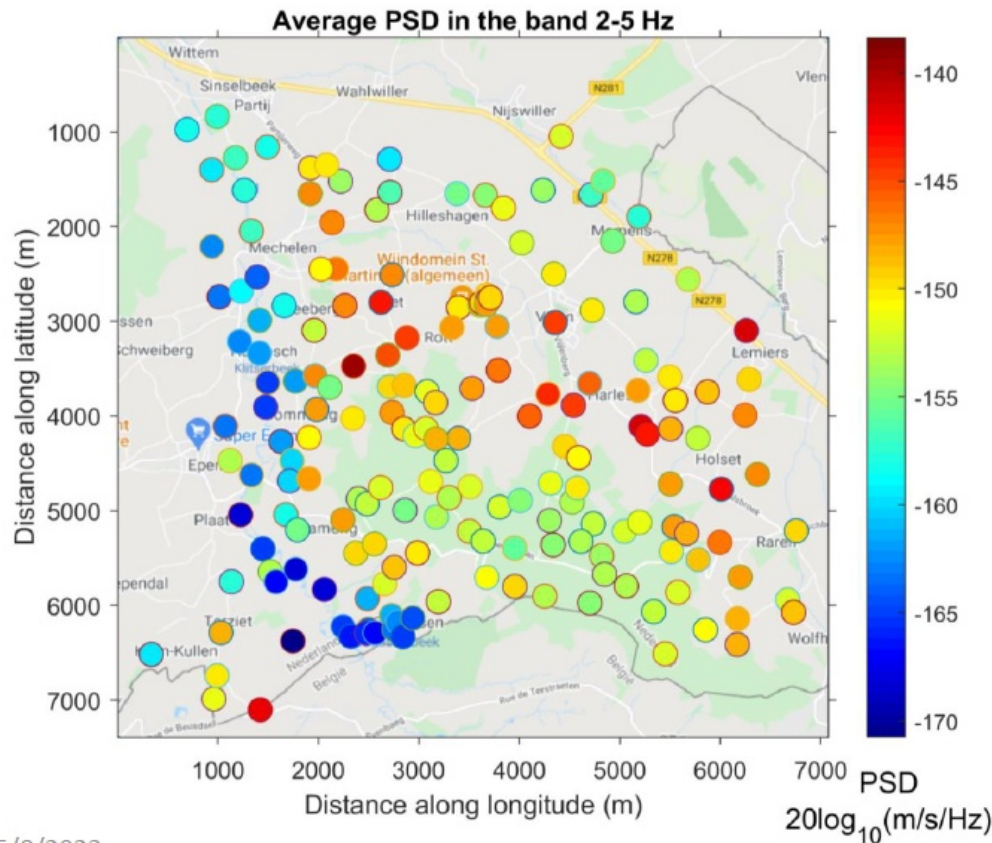
Méthode d'excavation ?

Installations existantes ?

Caractérisation environnementale



- principalement recherche locale en Sardaigne et Pays-Bas
- mesure du bruit sismique / acoustique / magnétique sur et sous-terre + modèle de propagation



Réseau de 183 géophones



Exploration géologique

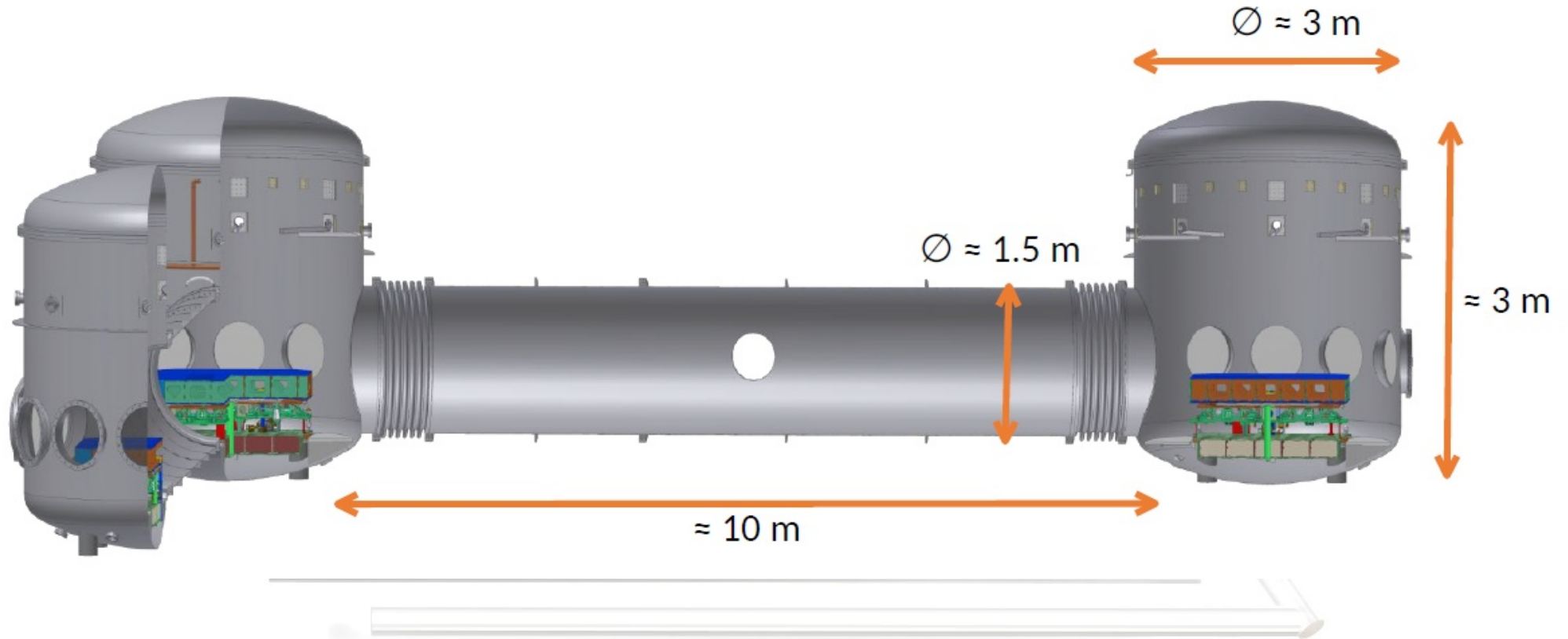
III.

Le temps des grands prototypes (avec des possibilités de collaboration)

Le 10 mètre de Hanovre



Pour attendre la limite quantique standard



Débuté en ~ 2010

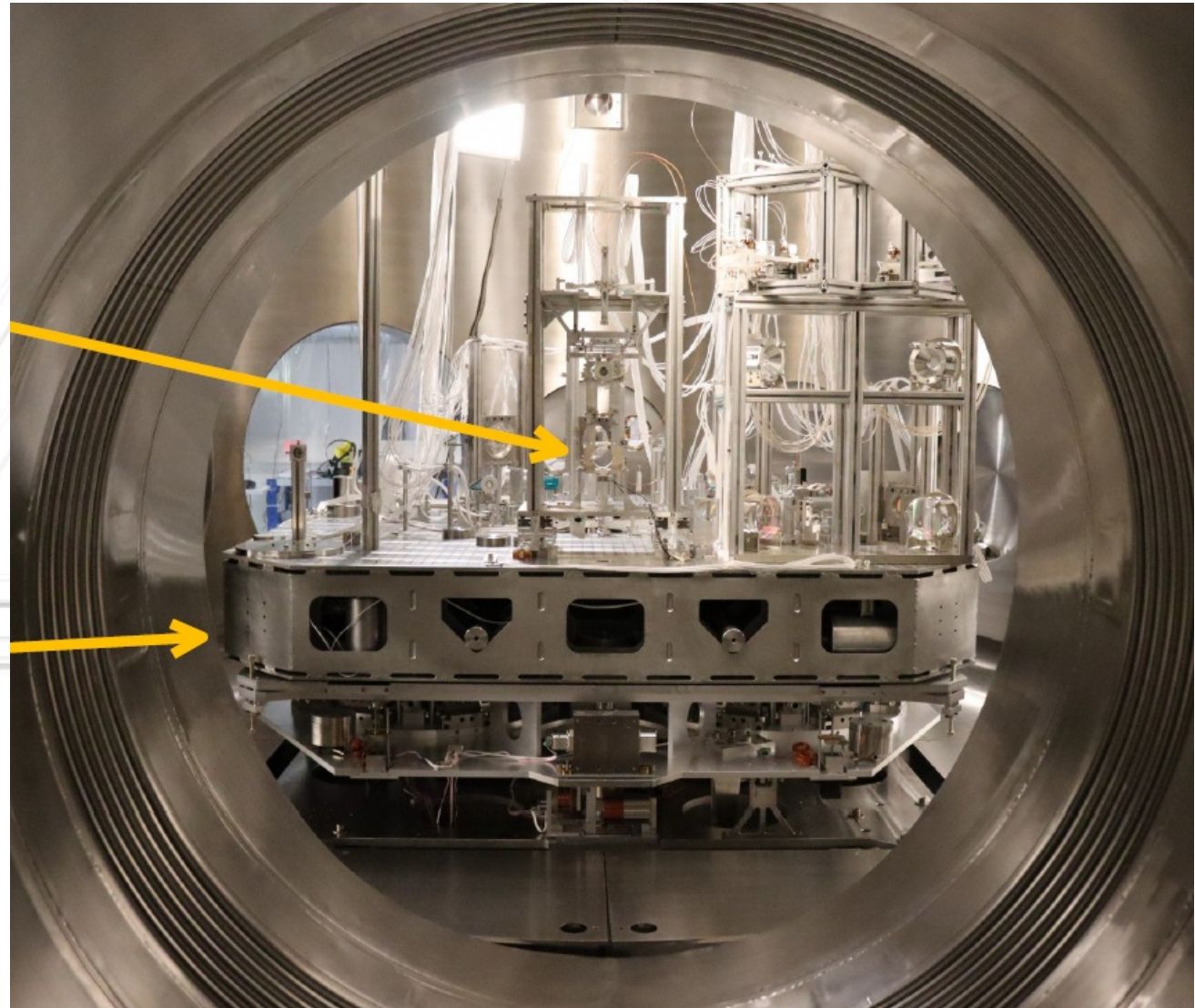
Le 10 mètre de Hanovre

L Δ L Δ < ▽ ∇ Γ ▴ △ ^ Δ ^ Δ 7 ◁ ▿ ▷ > Δ > Δ J Δ J ◁ ✓ ▽ ✓ ▽ L Δ L Δ

Pour attendre la limite quantique standard

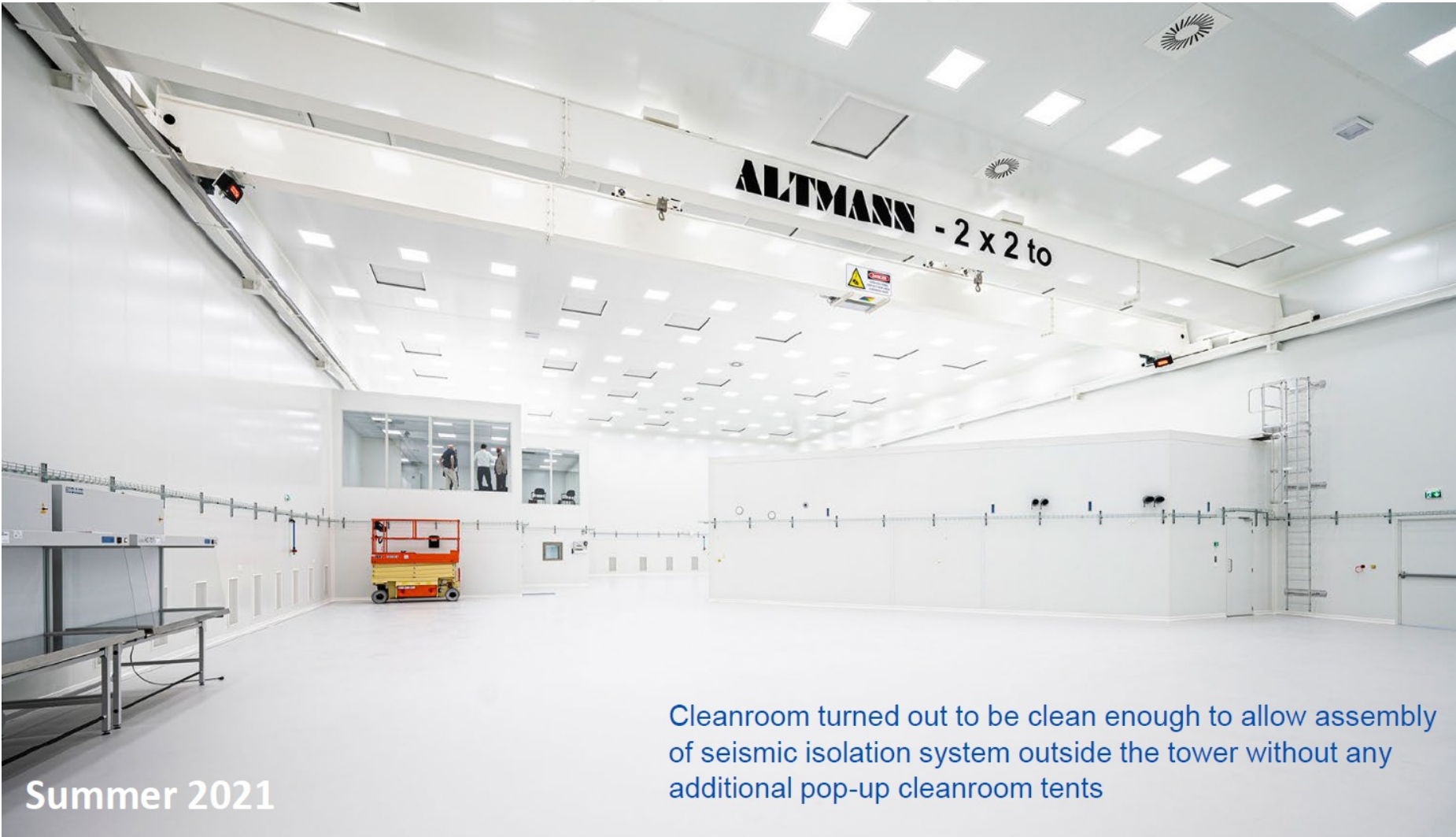
Optique suspendue

Isolation sismique



L Δ < Δ < ▽ ◁ ▷ ◃ △ ^ Δ ^ Δ ∟ ▽ ▽ ▹ ▸ ▻ Δ ▾ Δ] Δ] Δ ✓ ▽ ✓ ▹ ▹ ▹ ▹ ▹

A large, modern, two-story building with a concrete and stone facade, featuring large windows with yellow frames and a spiral staircase on the left. The interior is a large hall with rows of wooden desks and chairs, suggesting a classroom or lecture hall. The date "January 2020" is visible in the bottom left corner.

[illegible]

ALTMANN - 2 x 2 to

Summer 2021

Cleanroom turned out to be clean enough to allow assembly of seismic isolation system outside the tower without any additional pop-up cleanroom tents

L Δ < Δ < ∇ ∇ ∇ ∇ Δ ^ Δ ^ Δ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ Δ] Δ] Δ √ ∇ √ ∇ √ ∇ √ Δ L Δ

ALTMANN - 2 x 2 to

Summer 2022

[illegible]

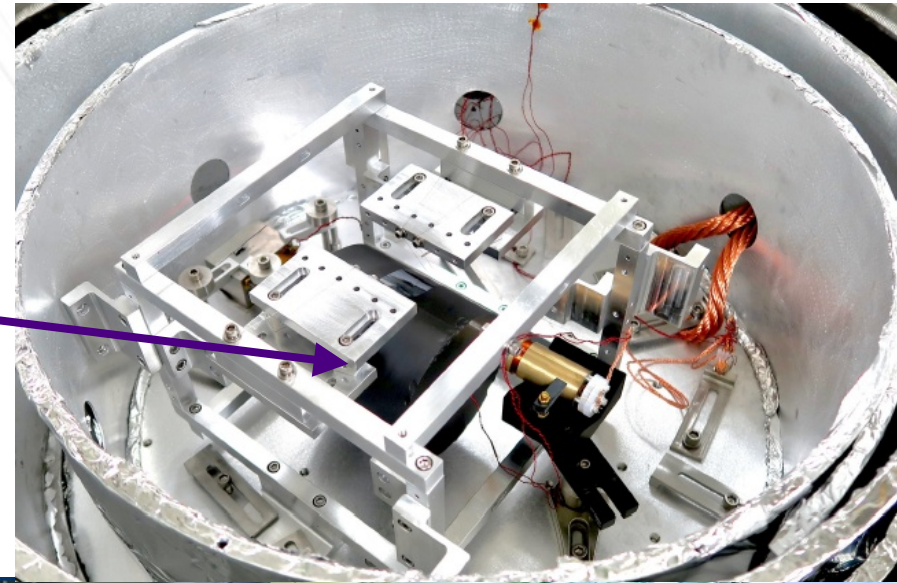
A large industrial facility, likely a water treatment plant, featuring a tall cylindrical tank, extensive piping, and a worker in a blue uniform and yellow helmet. A control panel with multiple switches and meters is visible in the foreground.

Le prototype de 40 mètre à Caltech



Mise à jour du prototype de LIGO pour tester :

- laser à 2050 nm
- miroir en silicium à 120 K
- refroidir par radiation



Conclusion et la suite



- une première introduction sur les nombreux sujets technologiques
- possibilité d'inviter des extérieurs sur des thématiques spécifiques
- réunions dédiées en plus petit groupe ensuite
- projet EU infra-tech (M2-Tech) en préparation pour 2024.

Un sujet qui vous motive ?
la parole est à vous....

Diapos bonus

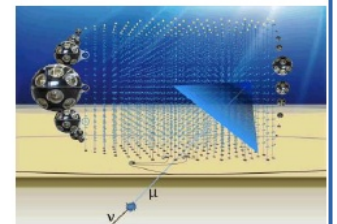
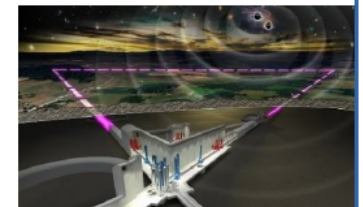
M2 Tech

What is M2TECH about?

M2Tech : Technologies for Multi-Messenger Astrophysics

Aim: develop innovative technologies for the current and the next generation of detectors operating for multi-messenger astrophysics with the generic aim to improve the **sensitivity, efficiency, duty cycle, and sustainability** of those detectors

- Answer the EU INFRATECH call (see next slide)
- Involved research infrastructures:
 - **CTAO and MAGIC** for gamma-ray astronomy,
 - **ET and Virgo** for gravitational wave interferometry
 - **KM3NeT** for neutrino astronomy
- Diversity of the *messengers* \Rightarrow heterogeneity of the technologies used in the observatories
- **M2Tech's specific aims:**
 - develop prototypes of detectors, software tools and methods and test them for validation,
 - directly engage with the industry to co-develop those technologies,
 - build upon existing knowledge of current infrastructures to expand the potential of future infrastructures,
 - create connections between multi-messenger research infrastructures (common software platforms, scientific exchange).



M2 Tech

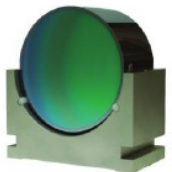
M2Tech technologies

From the astrophysical signal collection to multi-messenger alerts

Astrophysical signal



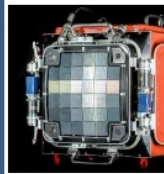
High quality mirrors
optical windows



WP2

Sensitivity
Sustainability

Advanced photosensors
analog electronics



WP3

Sensitivity
Sustainability

Precise
synchronisation and
timing distribution

WP5



Sensitivity

Efficient digitisation,
High rate data
processing and
transfer



WP4

Efficiency
Sustainability

Efficient and
sustainable data
processing

MM Alert system

WP6

Efficiency
Sustainability

MM detector
network

Efficient detector
monitoring

WP5

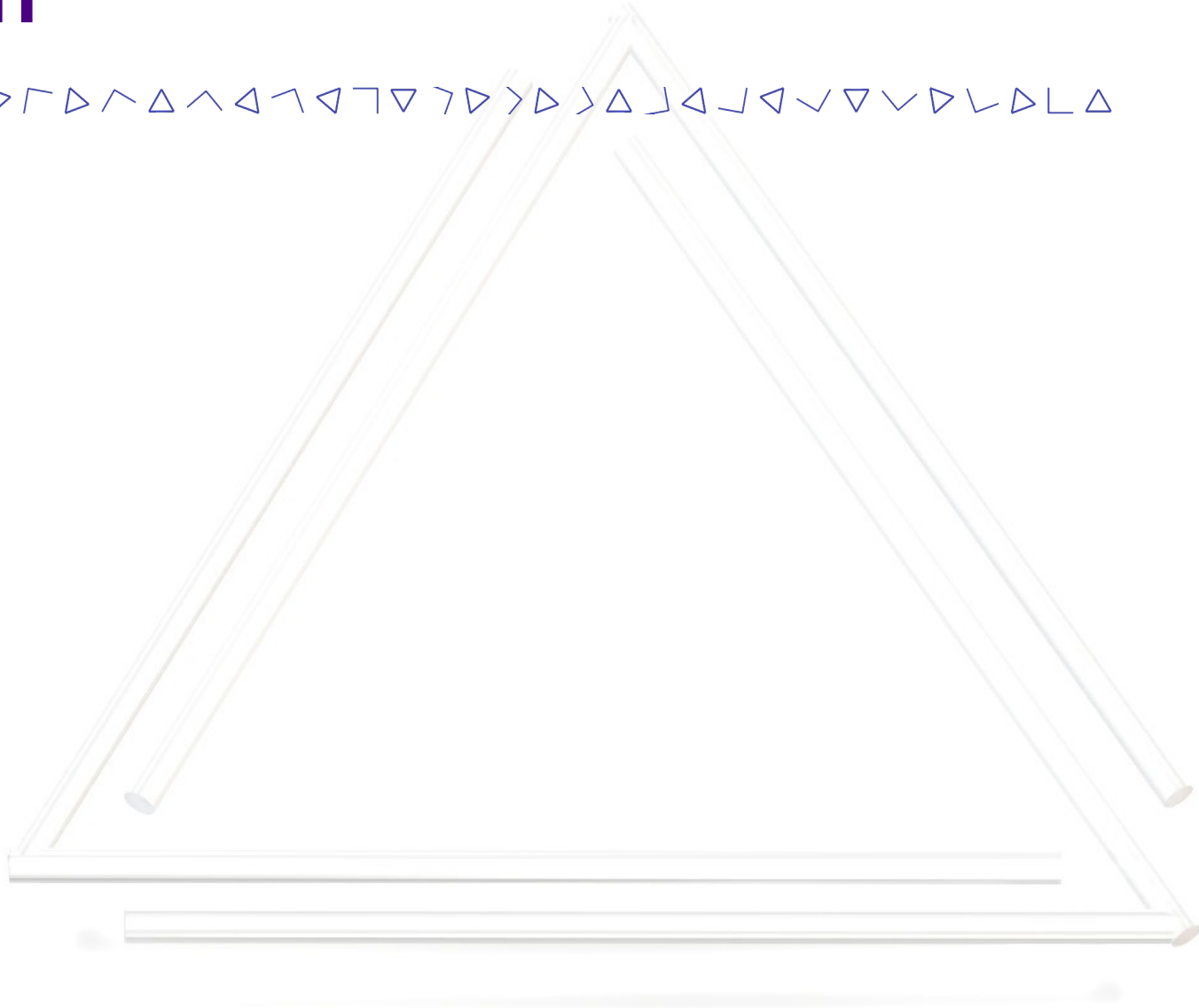
Efficiency
Duty cycle

1/06/2023

Edwige Tournefier

4

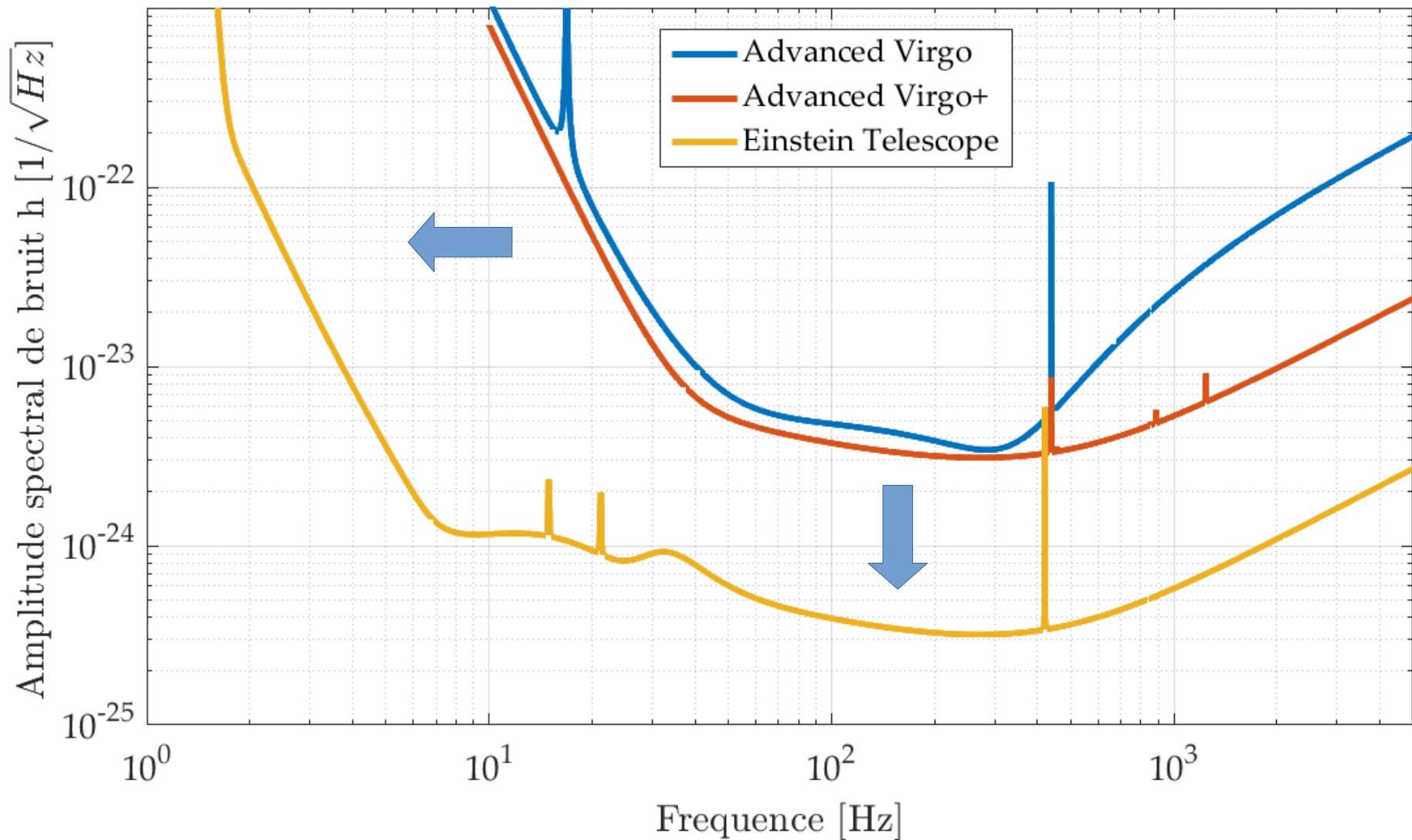
M2 Tech



But de ET: être 10 fois plus sensible

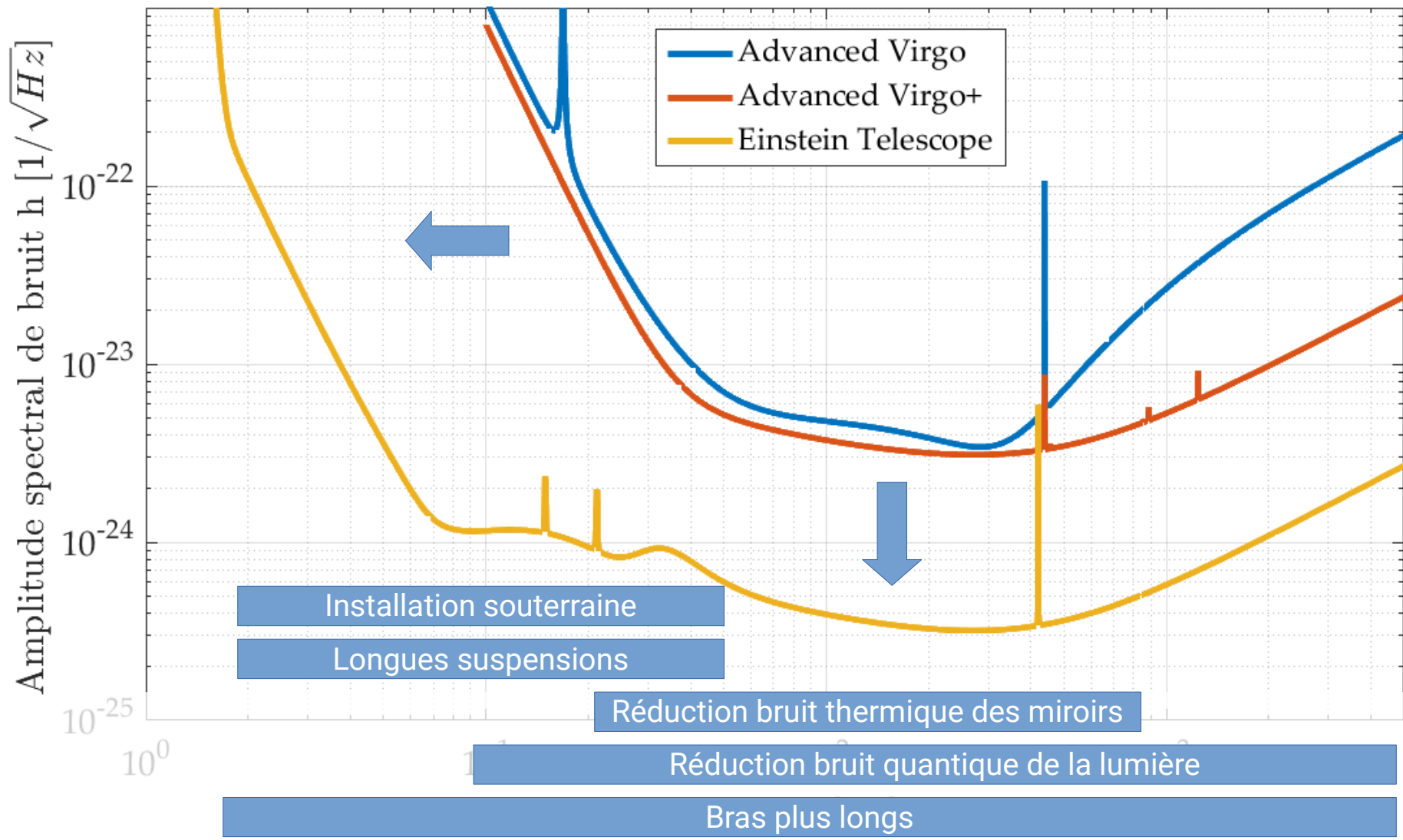


que la seconde génération de LIGO-Virgo (Advanced Virgo/LIGO)



But de ET: être 10 fois plus sensible

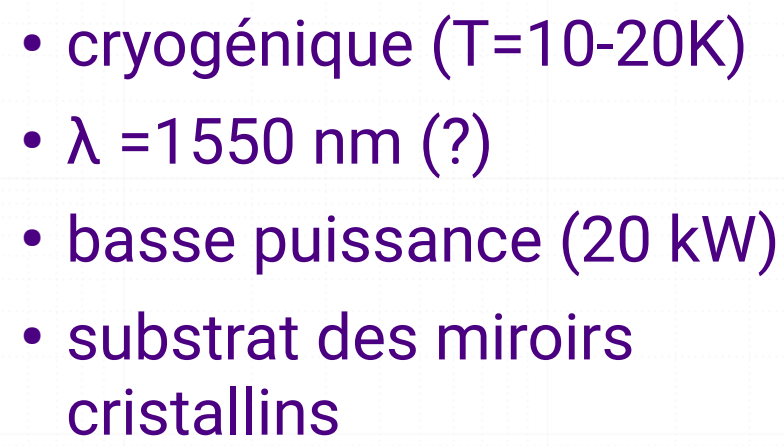
que la seconde génération de LIGO-Virgo (Advanced Virgo/LIGO)



$\triangleright \triangleright \triangleright \triangleright \triangleright \triangleleft$

$\triangleright \triangleright \triangleright \triangleleft \triangleright \triangleleft _$

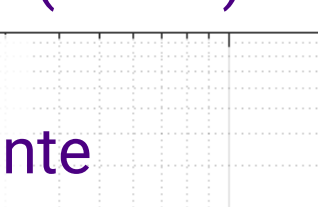
e (ET-LF)



$\triangleright \triangleright \triangleright \triangleright \triangleright \triangleleft$

$\triangleright \triangleright \triangleright \triangleleft \triangleright \triangleleft _$

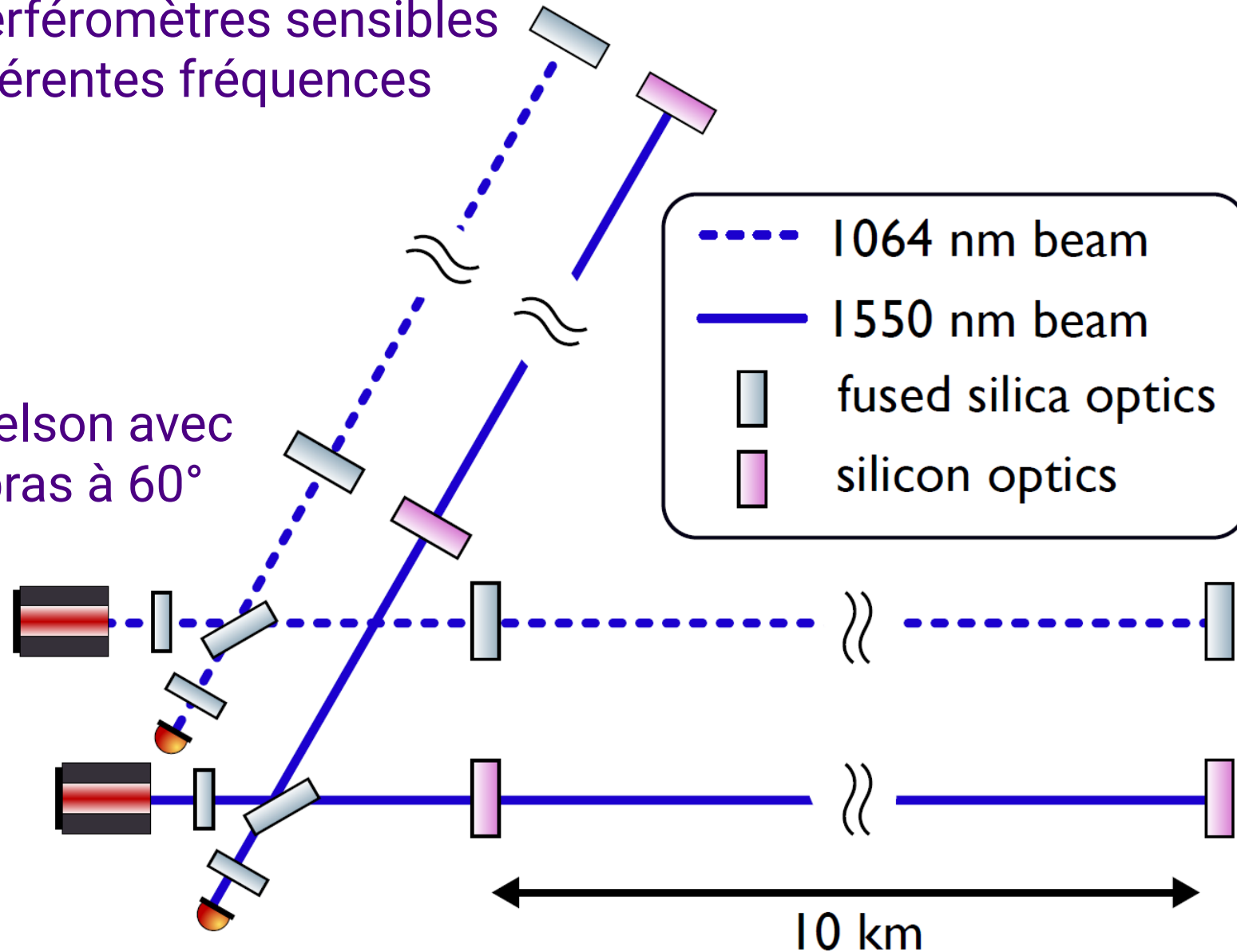
e (ET-HF)



1 détecteur = 2 interféromètres

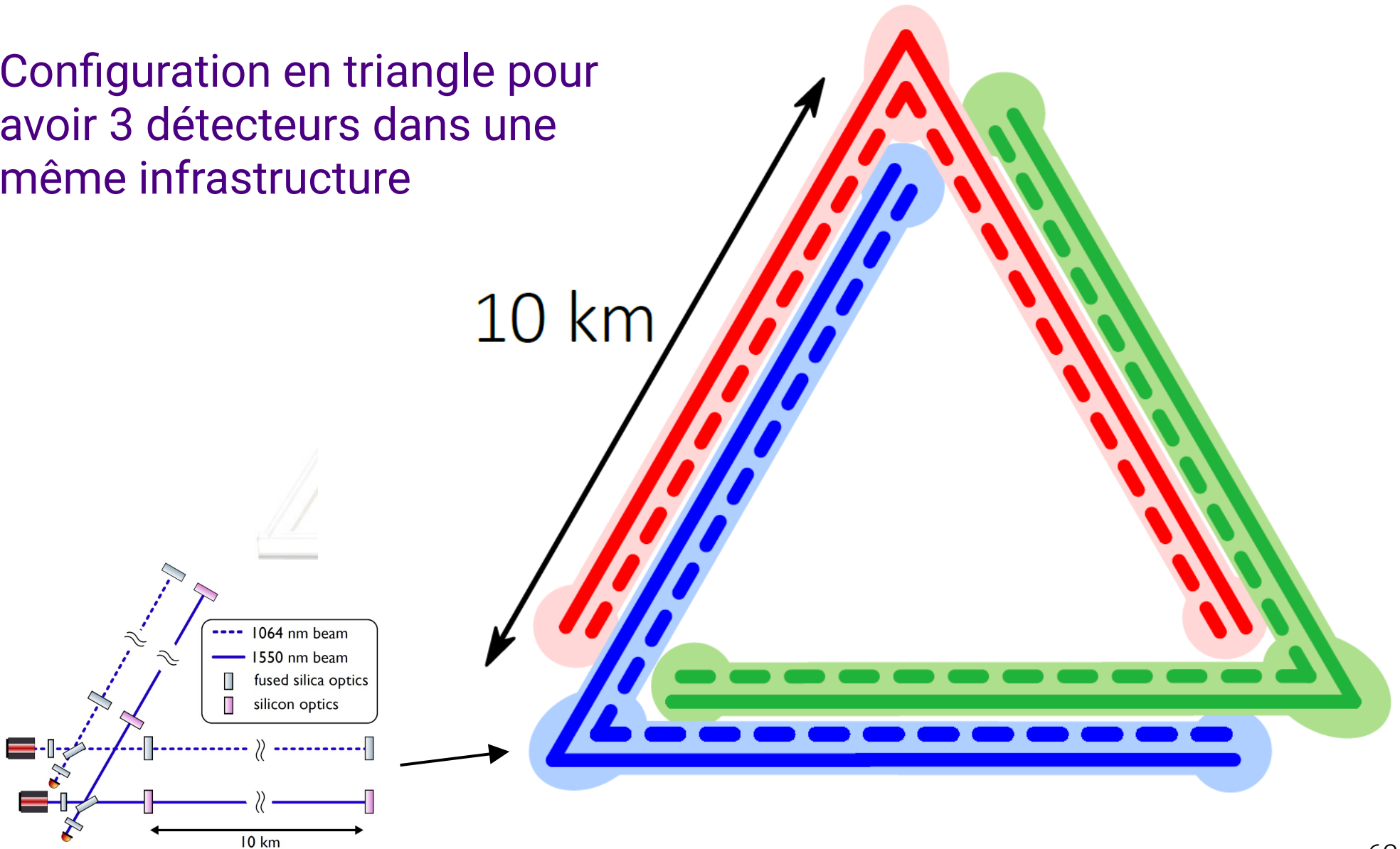
2 interféromètres sensibles
à différentes fréquences

Michelson avec
des bras à 60°

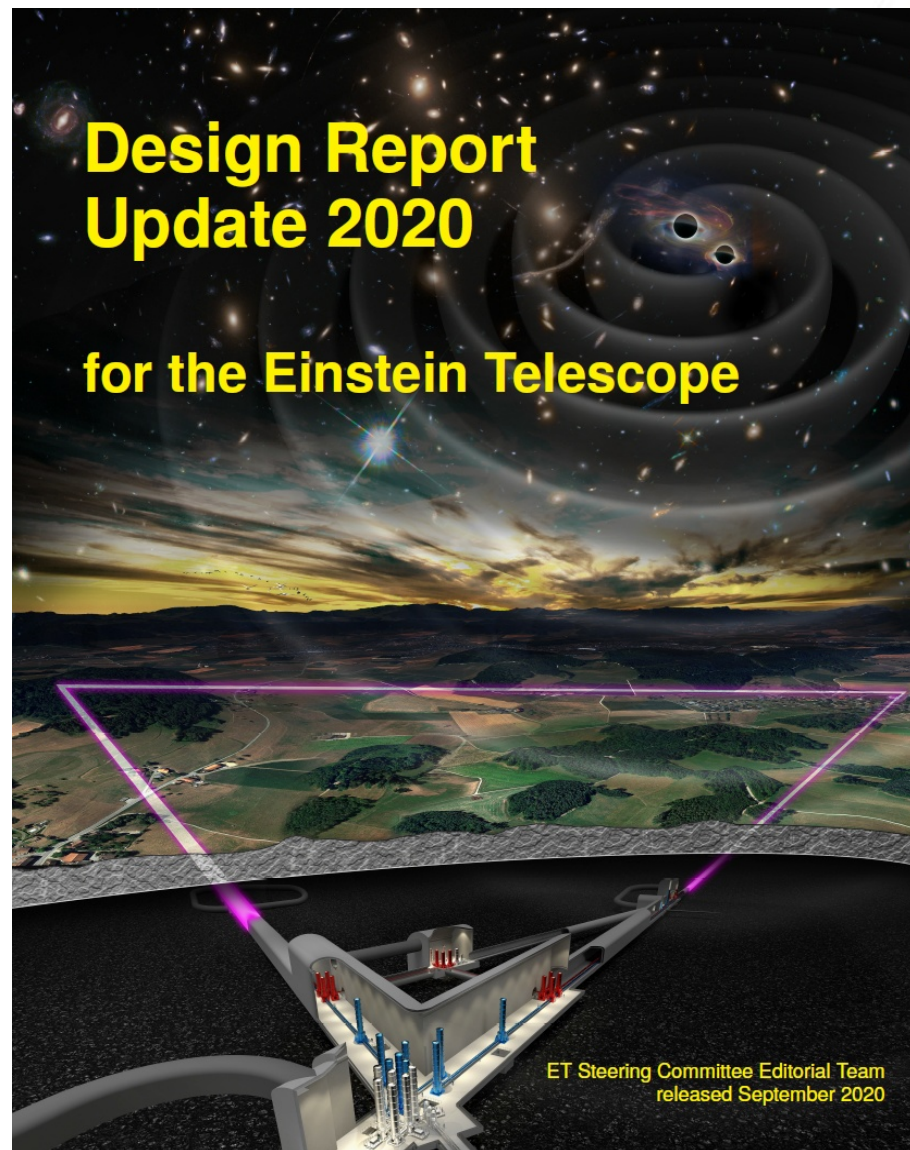


Pas 1, mais 3 détecteurs

Configuration en triangle pour avoir 3 détecteurs dans une même infrastructure



Pour en savoir plus...



Parameter	ET-HF	ET-LF
Arm length	10 km	10 km
Input power (after IMC)	500 W	3 W
Arm power	3 MW	18 kW
Temperature	290 K	10-20 K
Mirror material	fused silica	silicon
Mirror diameter / thickness	62 cm / 30 cm	45 cm/ 57 cm
Mirror masses	200 kg	211 kg
Laser wavelength	1064 nm	1550 nm
SR-phase (rad)	tuned (0.0)	detuned (0.6)
SR transmittance	10 %	20 %
Quantum noise suppression	freq. dep. squeez.	freq. dep. squeez.
Filter cavities	1×300 m	2×1.0 km
Squeezing level	10 dB (effective)	10 dB (effective)
Beam shape	TEM ₀₀	TEM ₀₀
Beam radius	12.0 cm	9 cm
Scatter loss per surface	37 ppm	37 ppm
Seismic isolation	SA, 8 m tall	mod SA, 17 m tall
Seismic (for $f > 1$ Hz)	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$
Gravity gradient subtraction	none	factor of a few

<https://apps.et-gw.eu/tds/ql/?c=15418>