

# La convergence des perspectives...



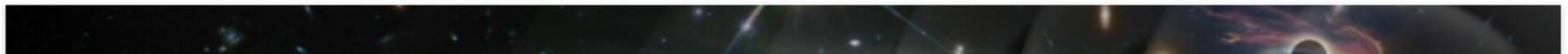
## **CERN plans to collaborate with projects for future gravitational-wave observatories**

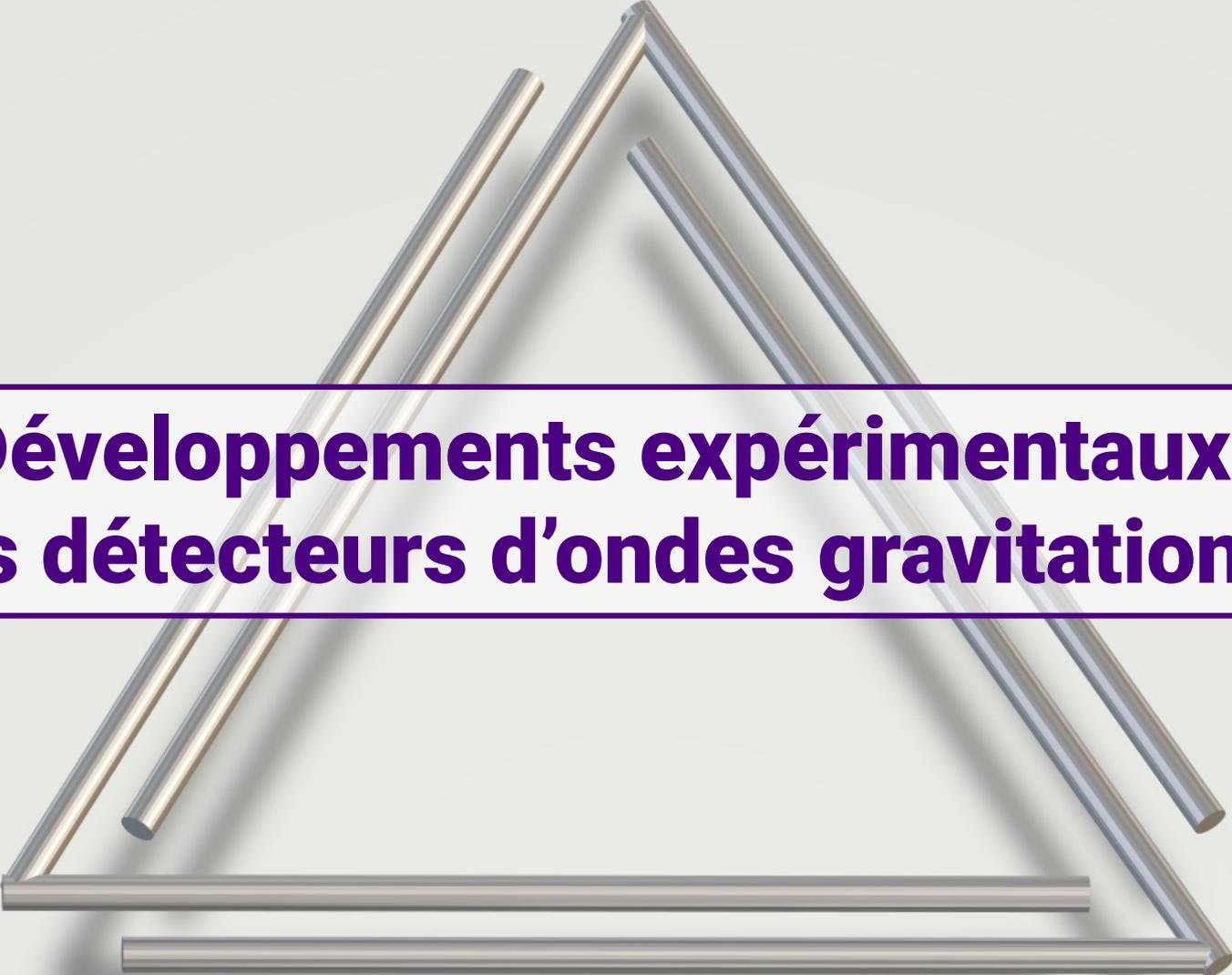
June 19 2023, by Kristiane Bernhard-Novotny

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

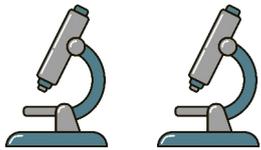
# Code



Intensité de la recherche\* :



Veille, activité faible



Intérêt général, quelques groupes



Très compétitif

**2**

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

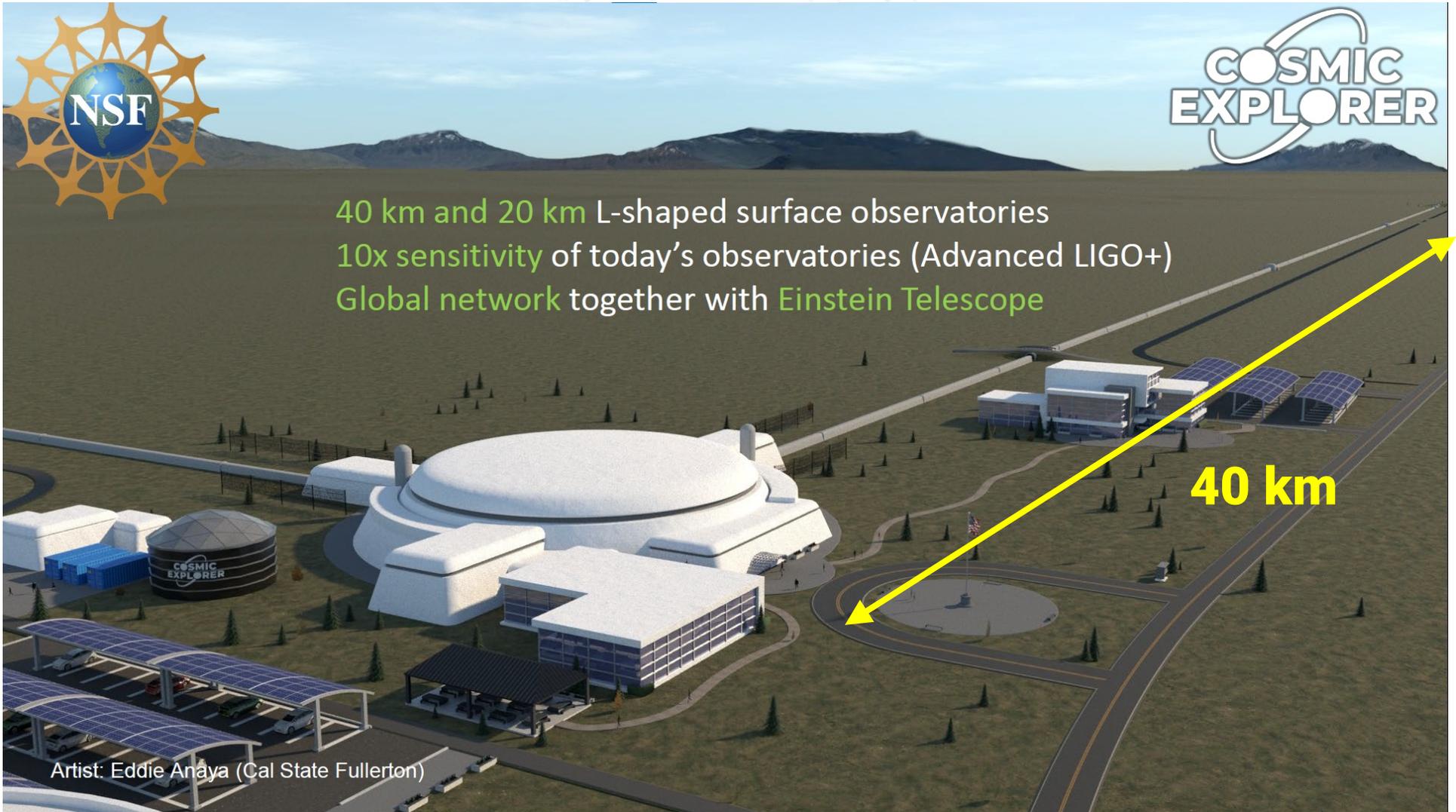
\* au temps t, ne dit rien sur l'importance du sujet

# I Construire un détecteur

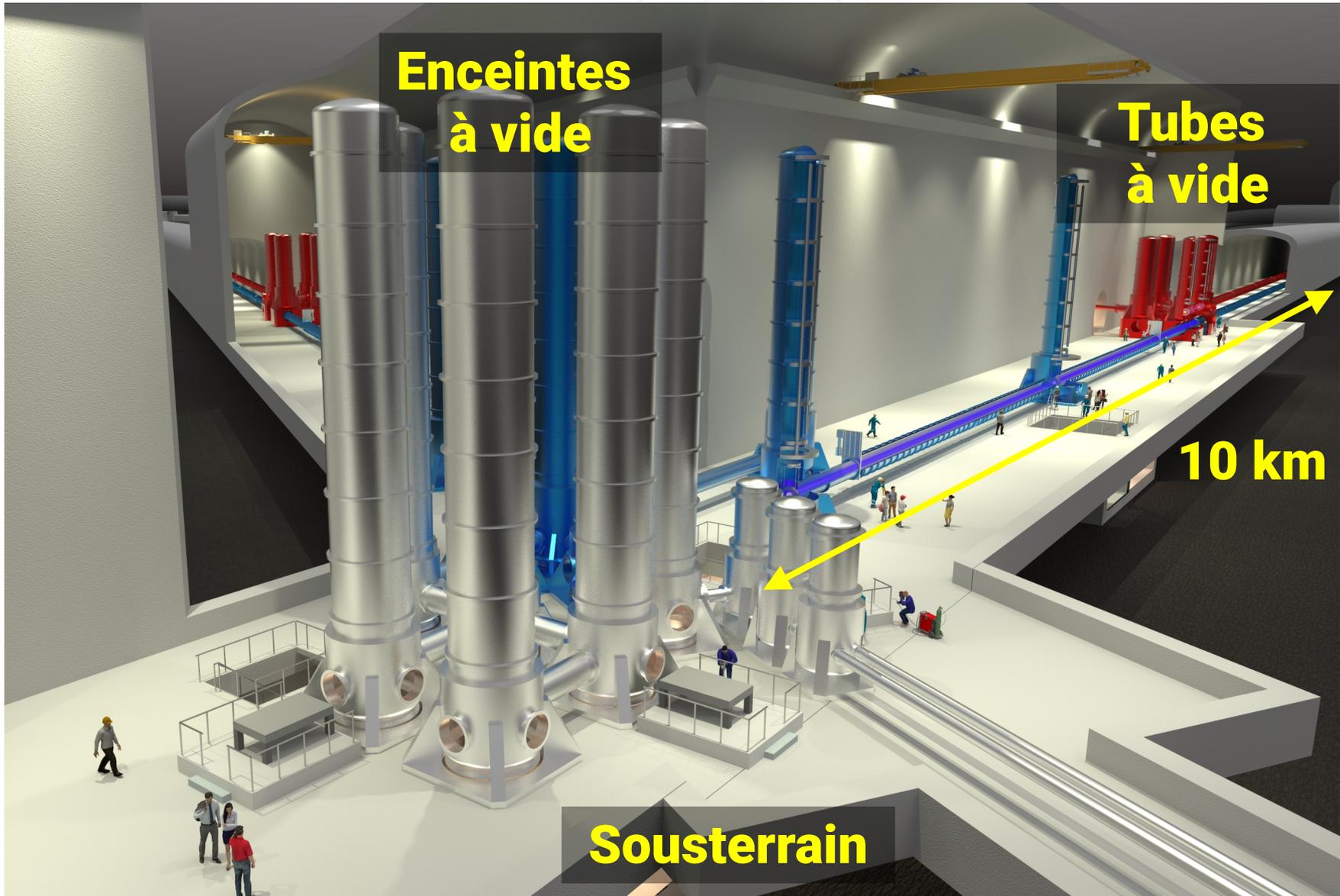
# Cela peut ressembler à :



Une très grande infrastructure de recherche

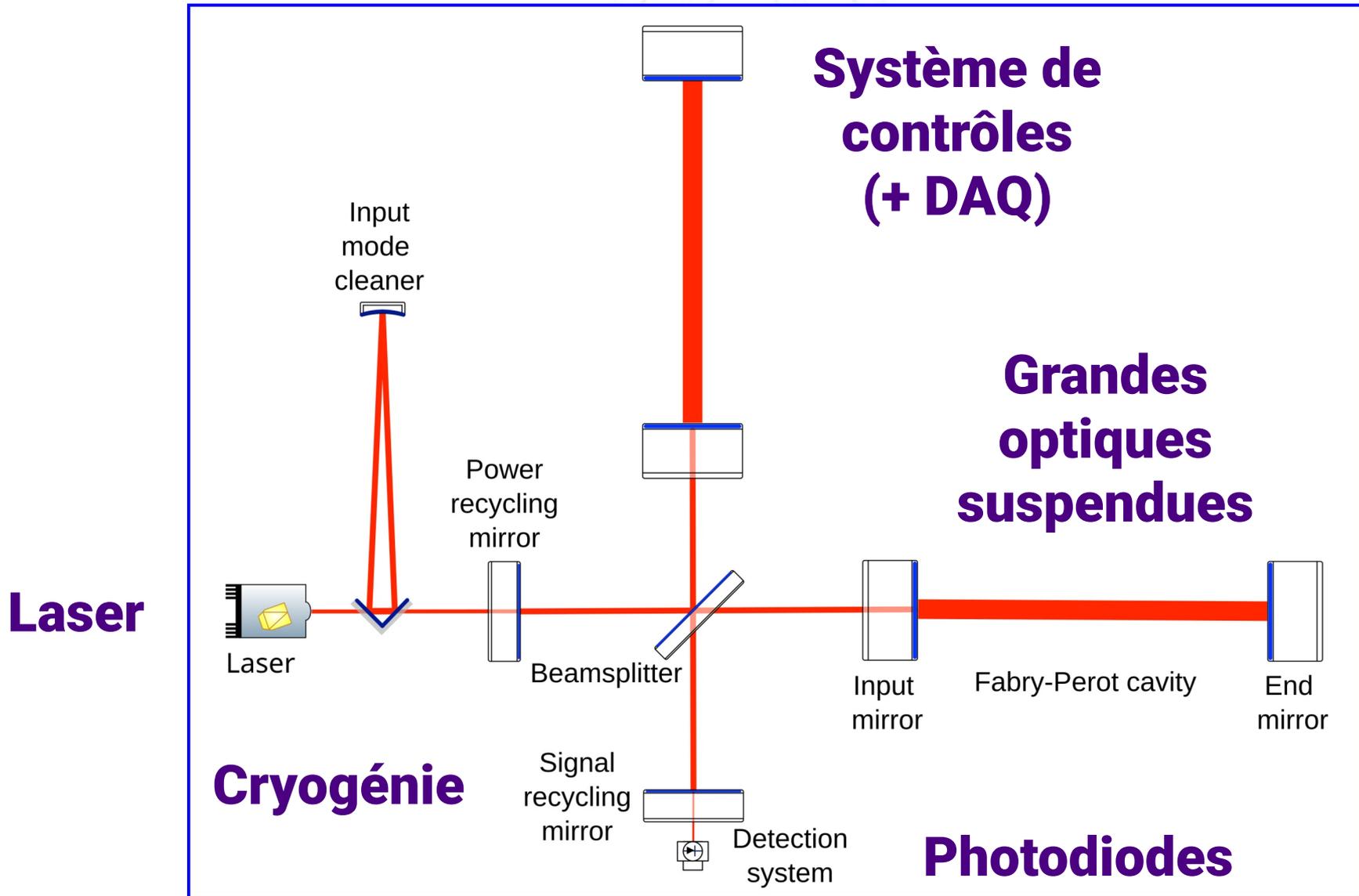


# Ou cela :

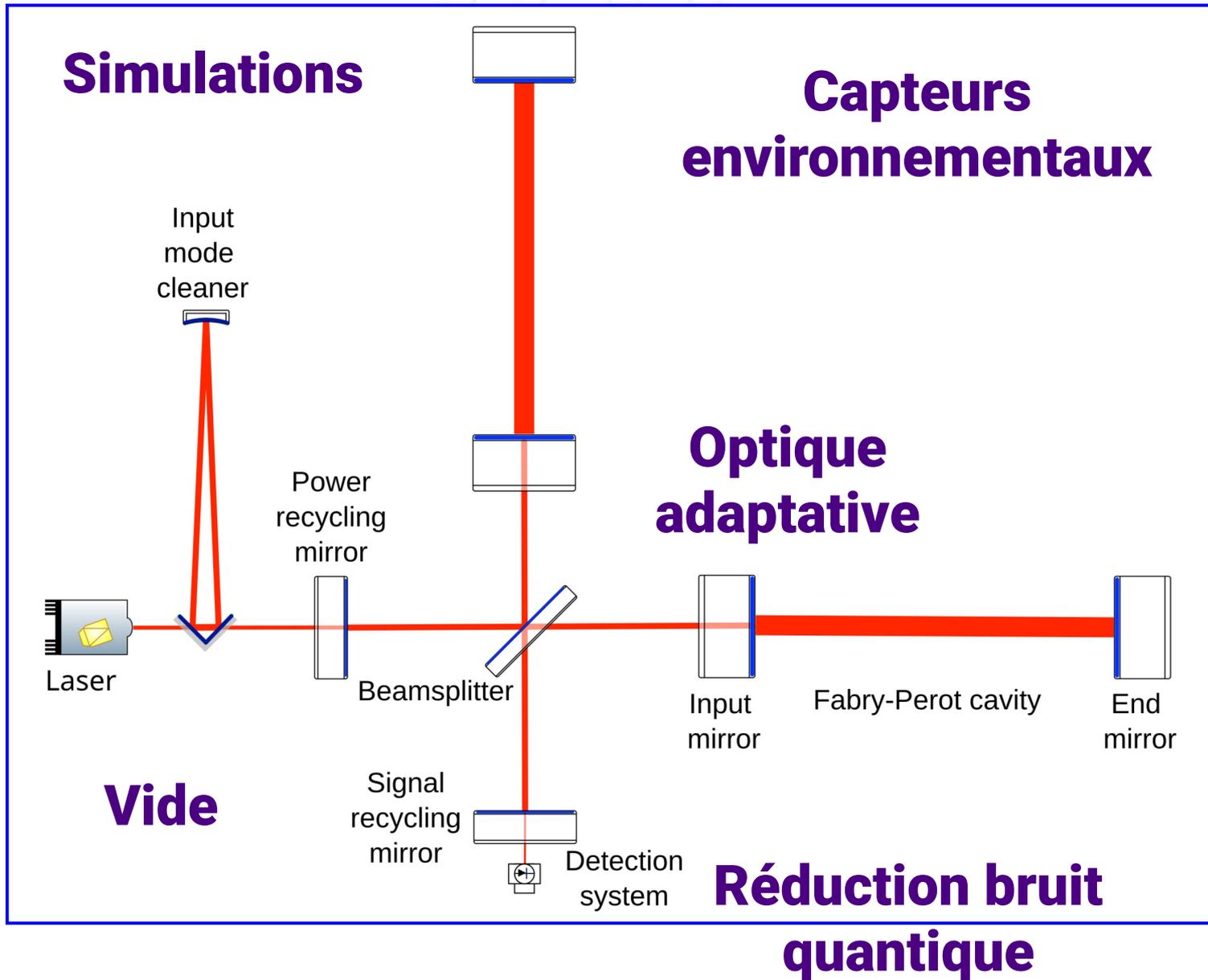


Einstein Telescope

# Schéma simplifié



# Schéma simplifié



## **II.**

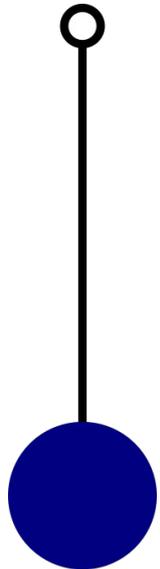
# **Les suspensions**

# But : isoler le miroir du bruit sismique



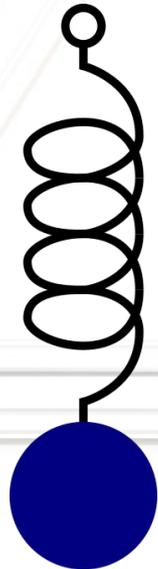
2

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

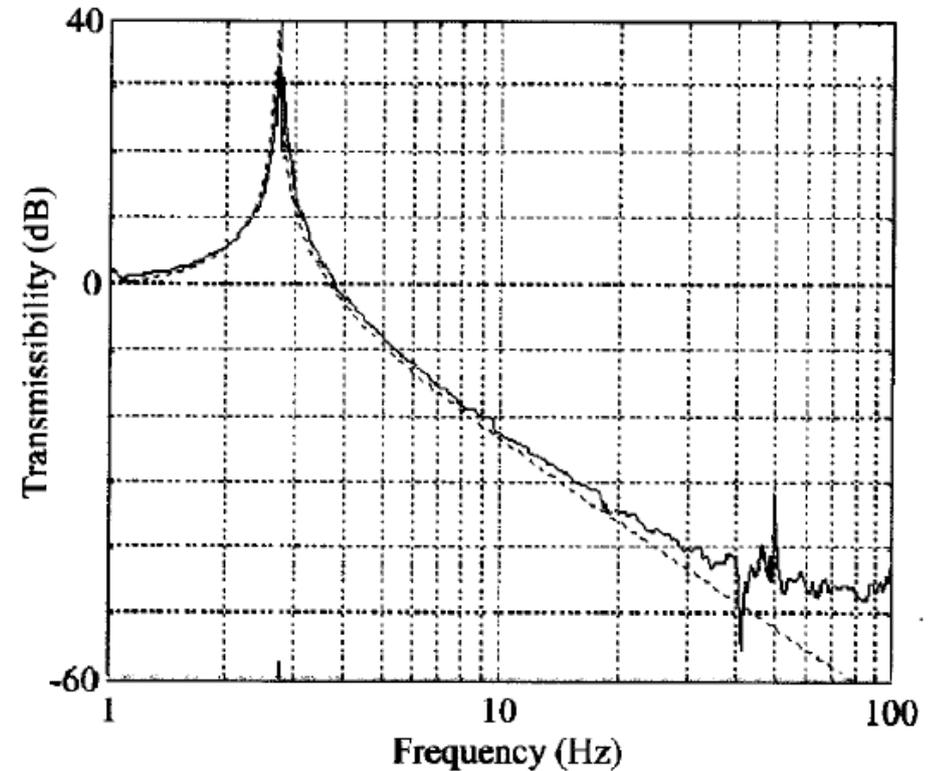


*Isolation  
horizontal*

miroir



*Isolation  
vertical*



*fonction de transfert*

# Grande expérience dans Virgo

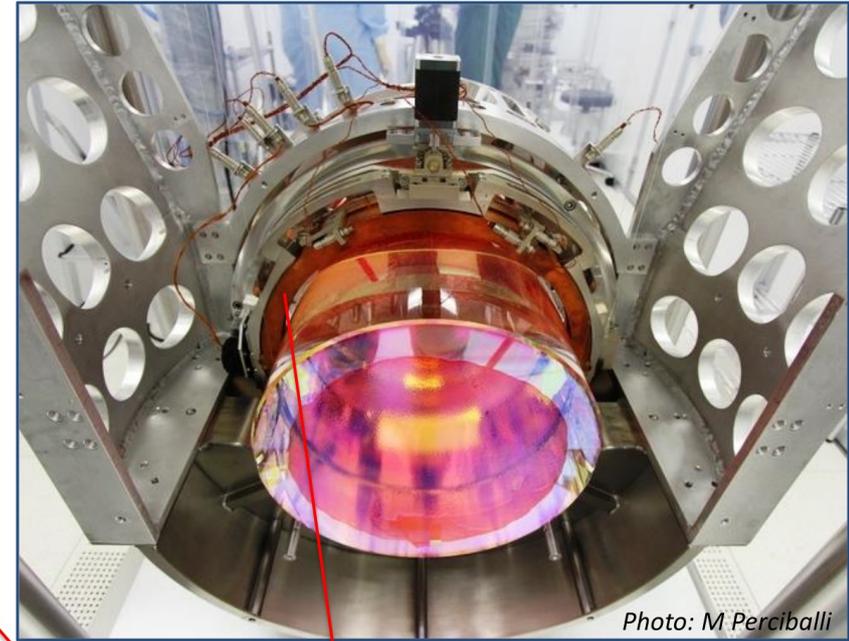
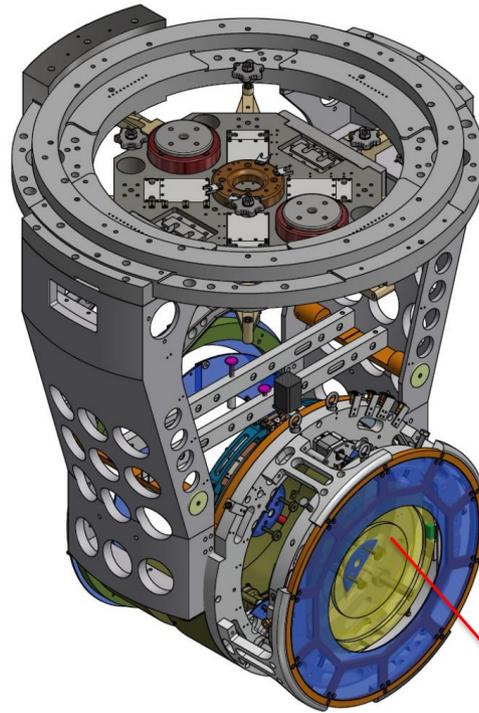
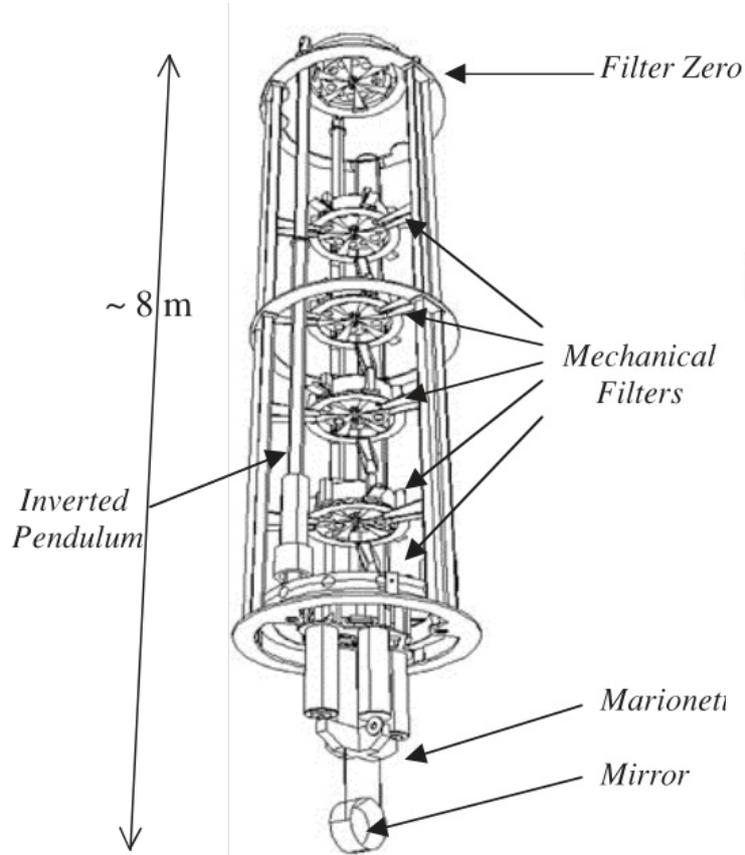


Photo: M Perciballi

TCS: thermal compensation  
(Compensation Plate and Ring Heater)

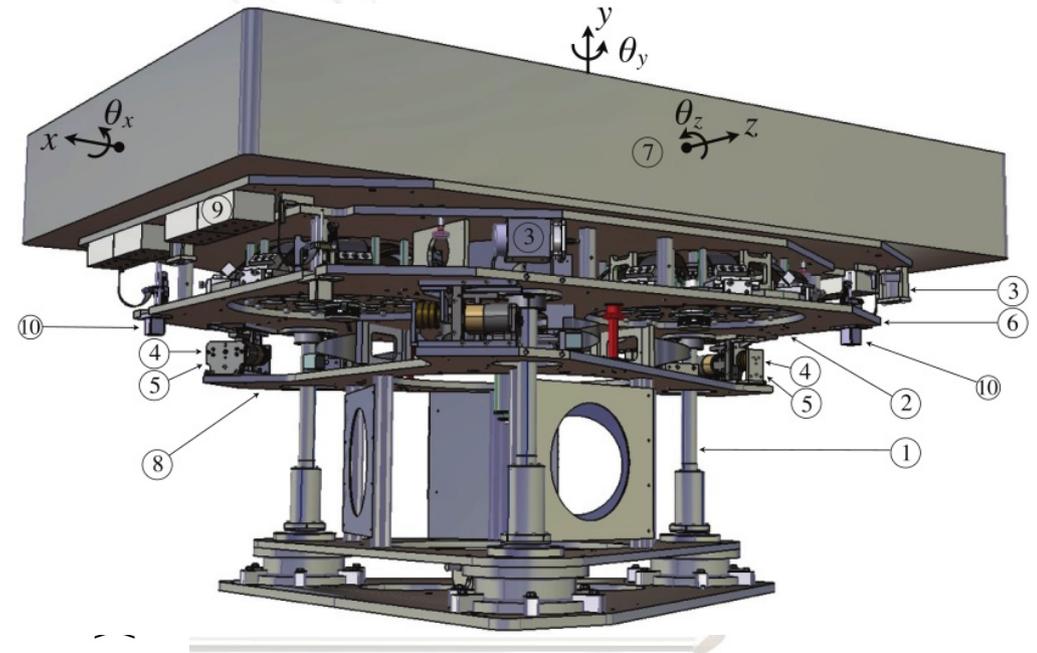
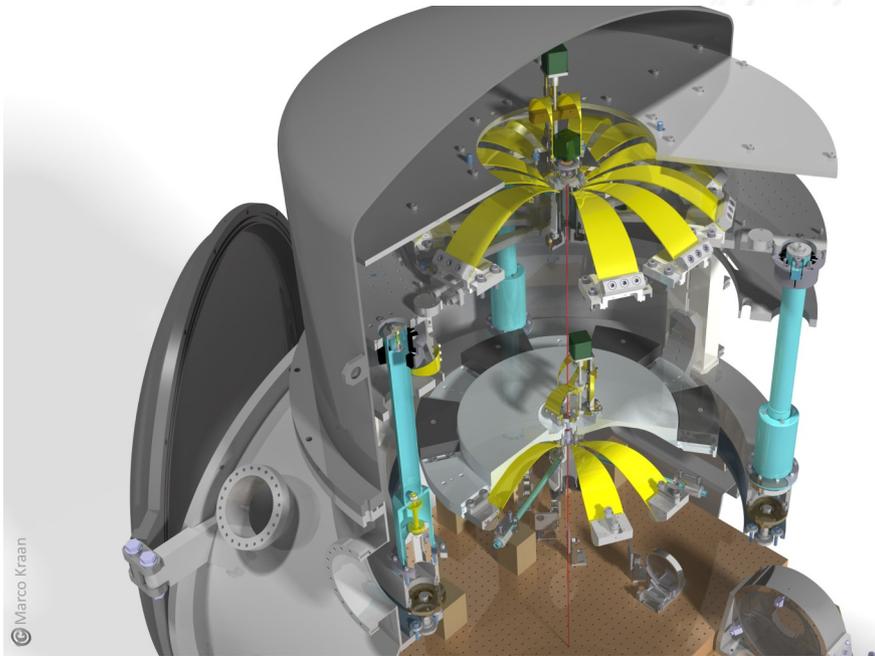
*Le super-atténuateur de Virgo*

*Le système pour attacher le miroir*

# Bancs suspendus



Pour toutes les optiques critiques.

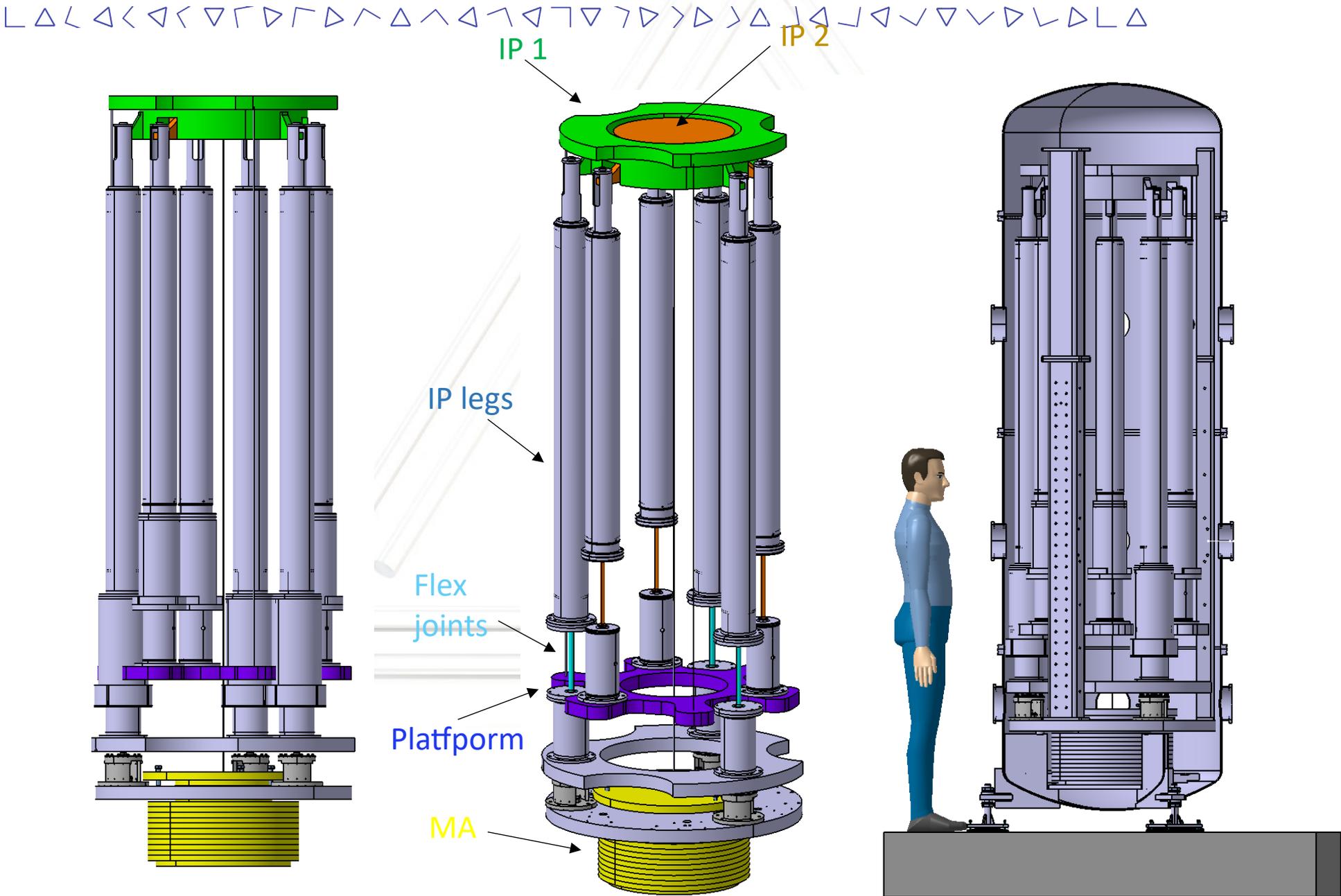


*Mini-tour avec banc sous vide*

*Table optique suspendue*



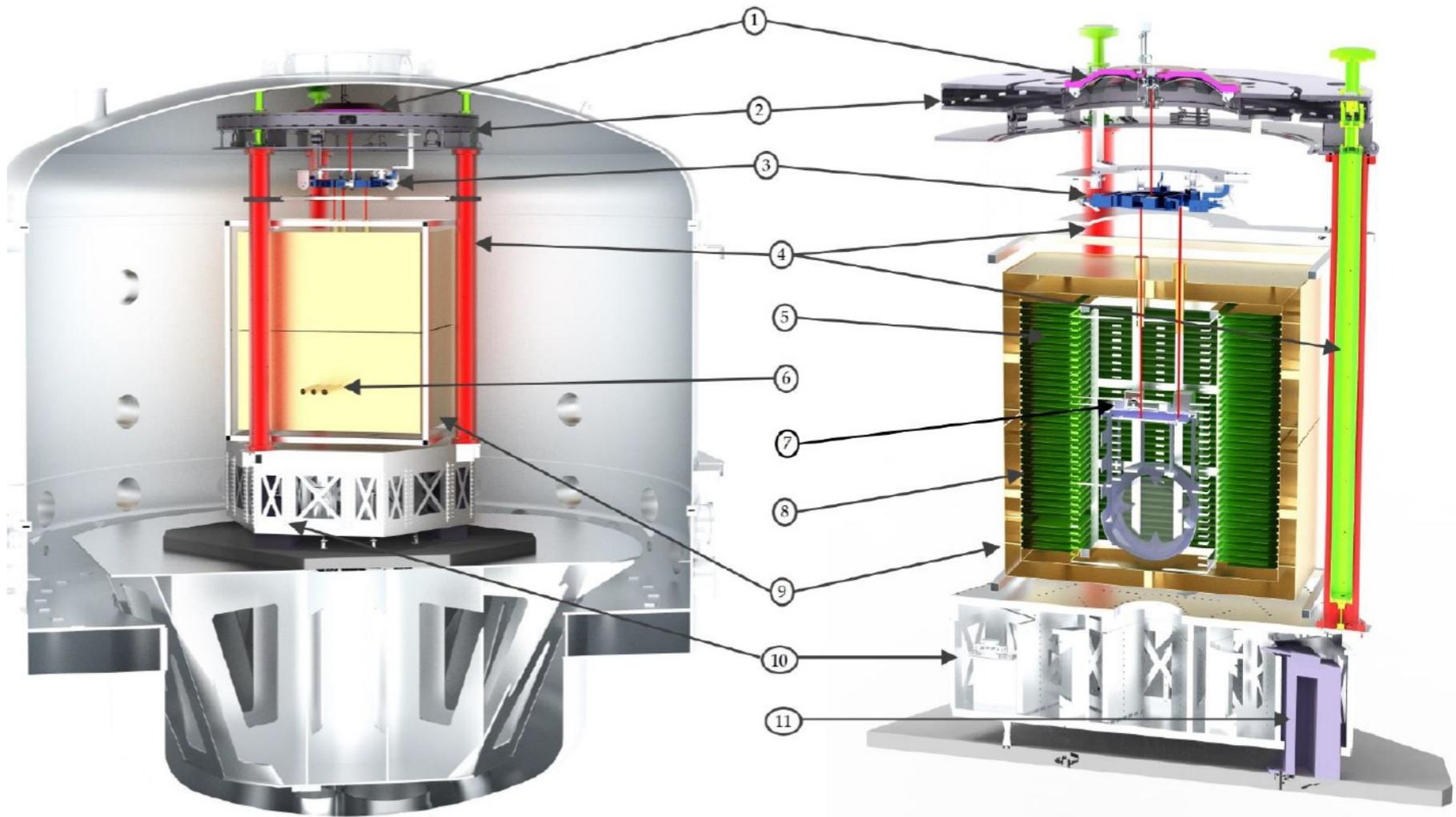
# Exemple de développement



*new generation seismic isolation system (Italie)*



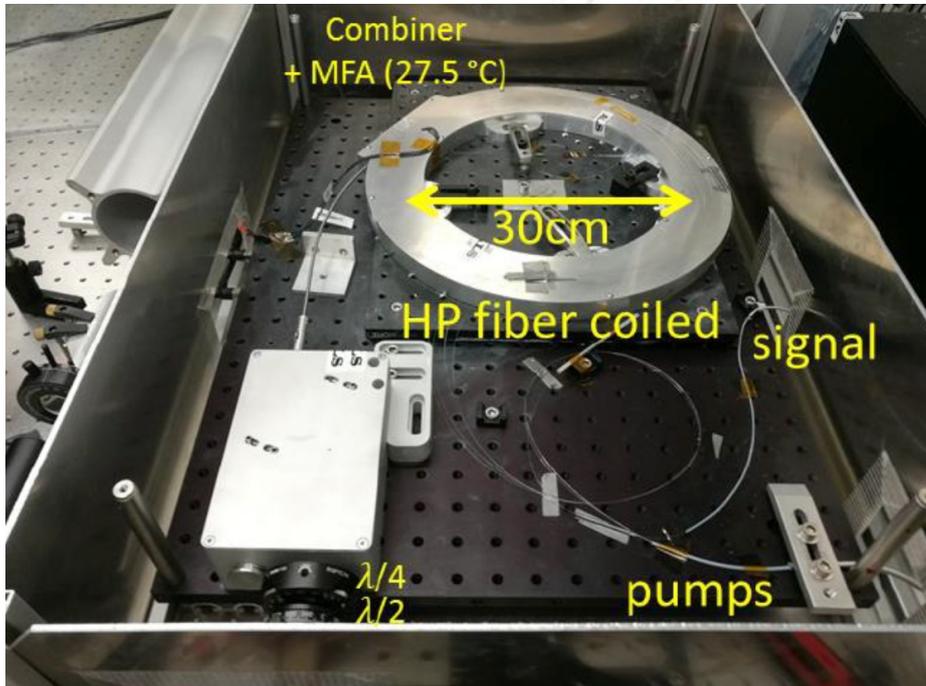
# Exemple de développement



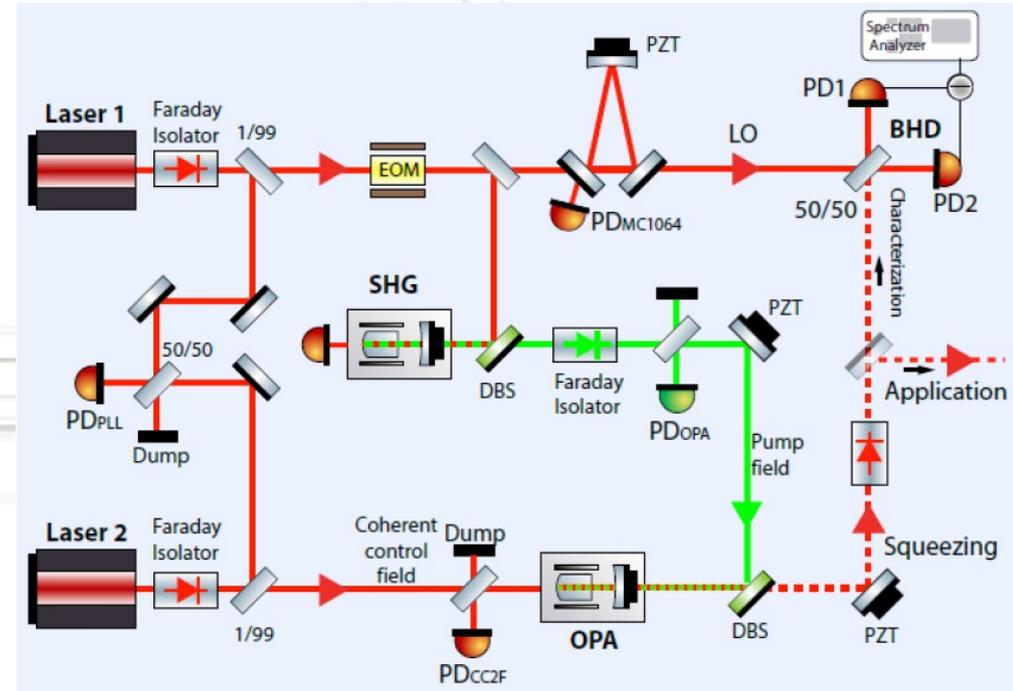
## **II. Optiques**

# 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)

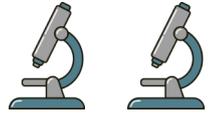


Laser fibré



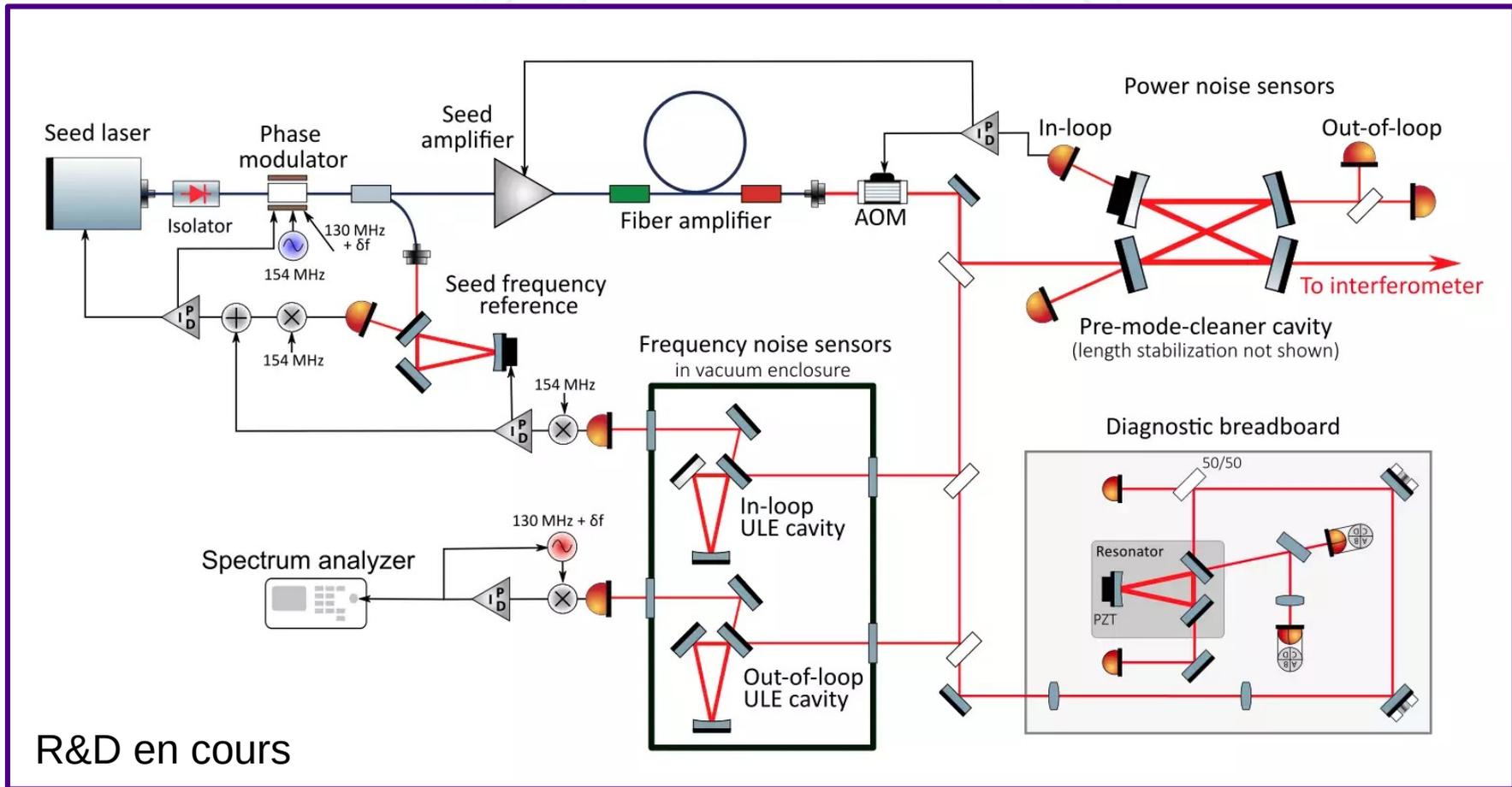
Génération de lumière comprimée

# Le laser



2

- laser de puissance (1064 nm)  $\sim 700\text{W}$
- stabilisé en amplitude, fréquence, pointage
- plusieurs cavités amplificatrices, fibrées ou non

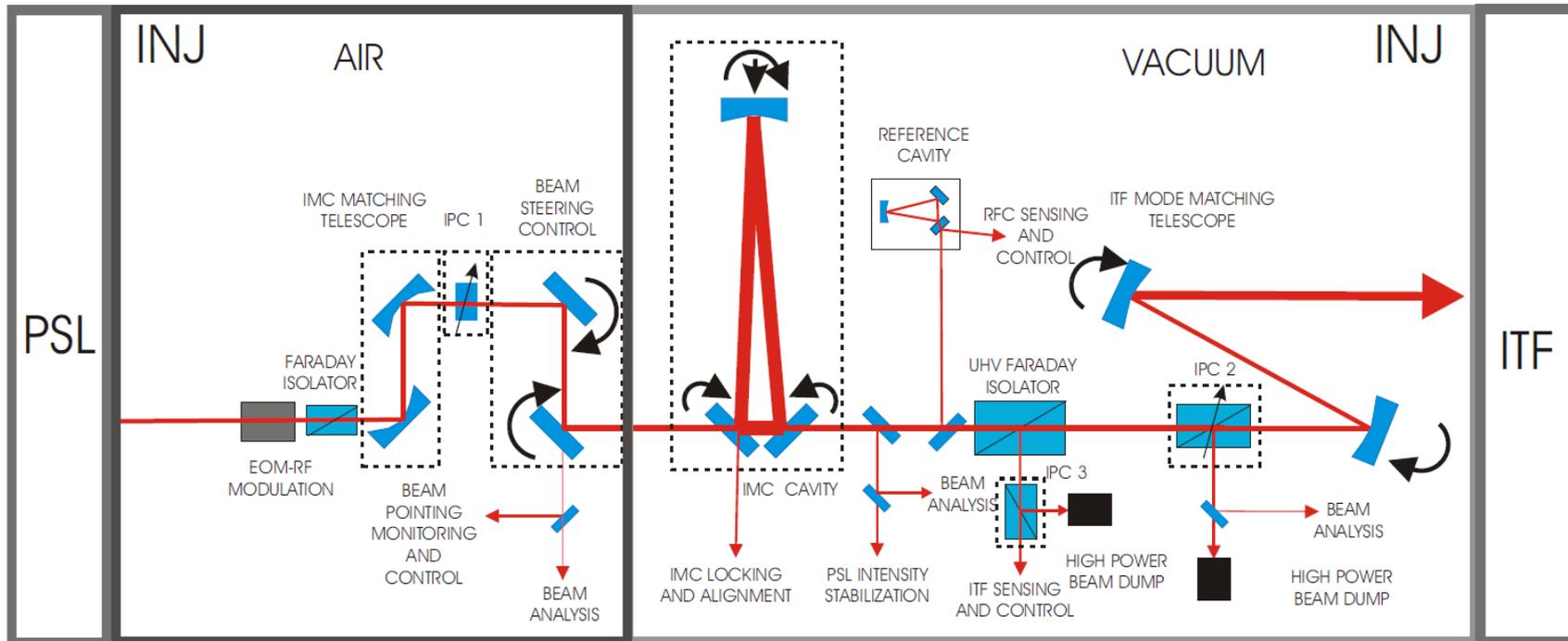


# L'injection



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*

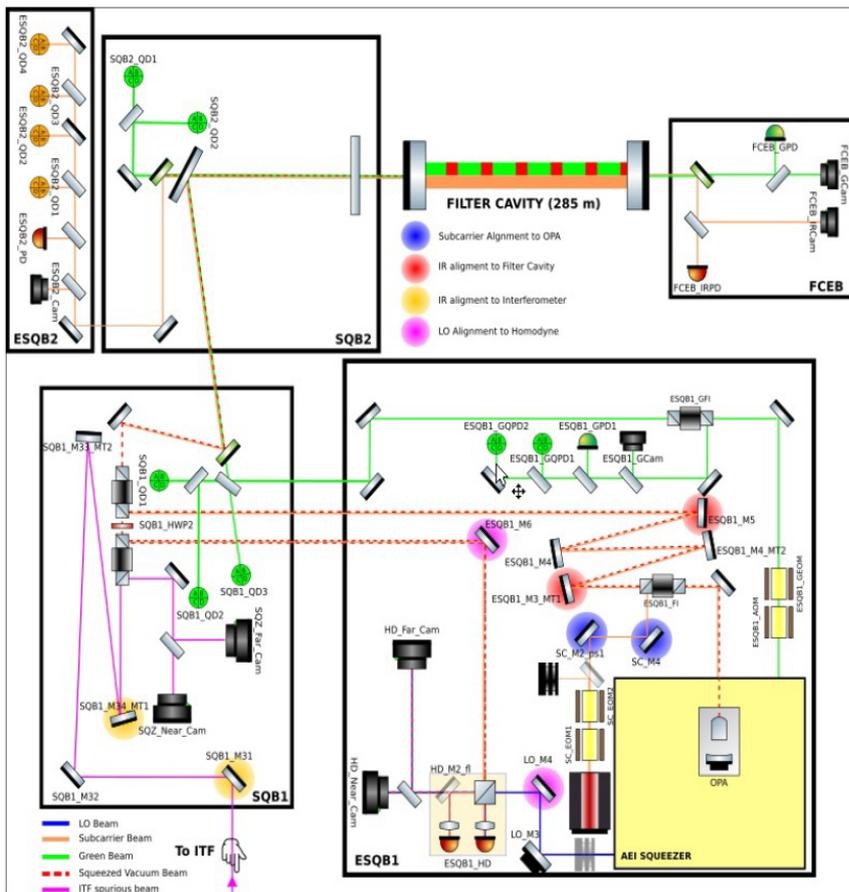
- pas toujours évident mais on sait faire !

# La lumière comprimée du vide



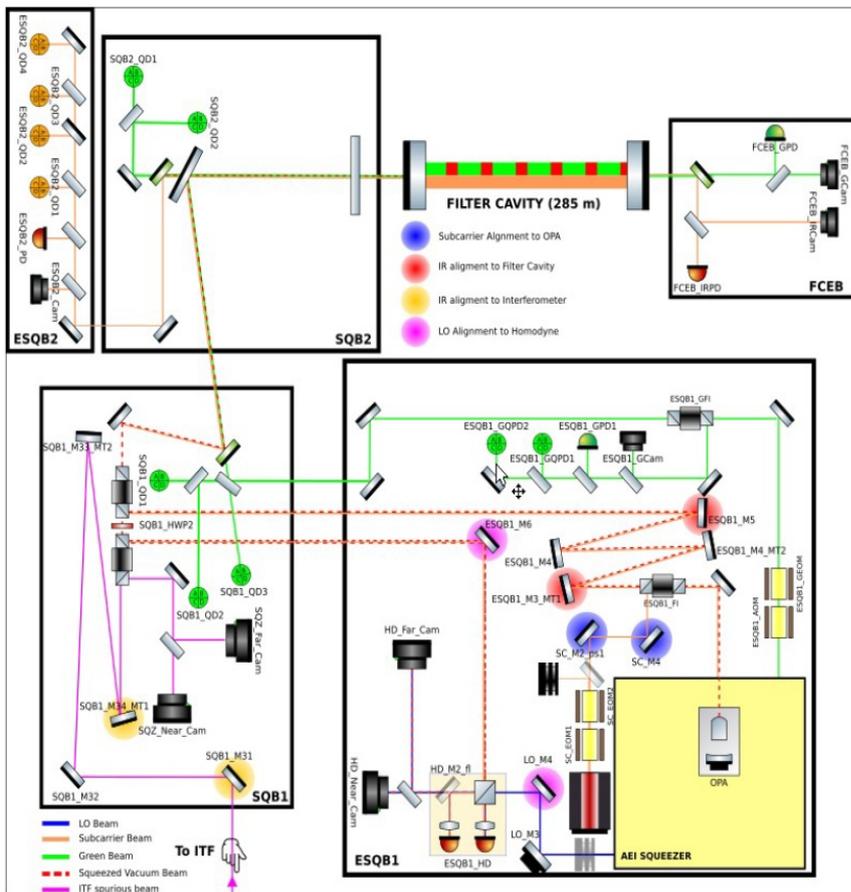
2

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



# 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



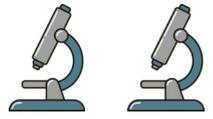
Unresolved aspects\* of simulating quantum squeezed noise

\* really just a cry for help

Mikhail Korobko

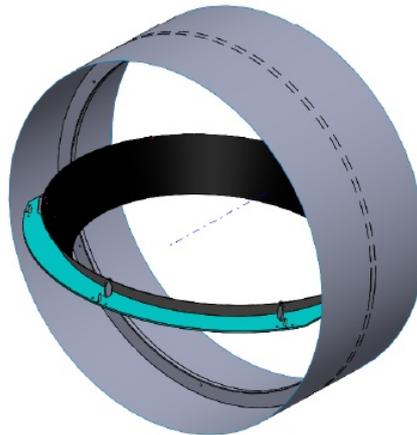
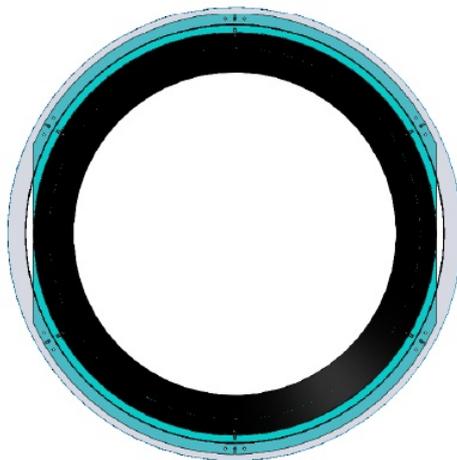
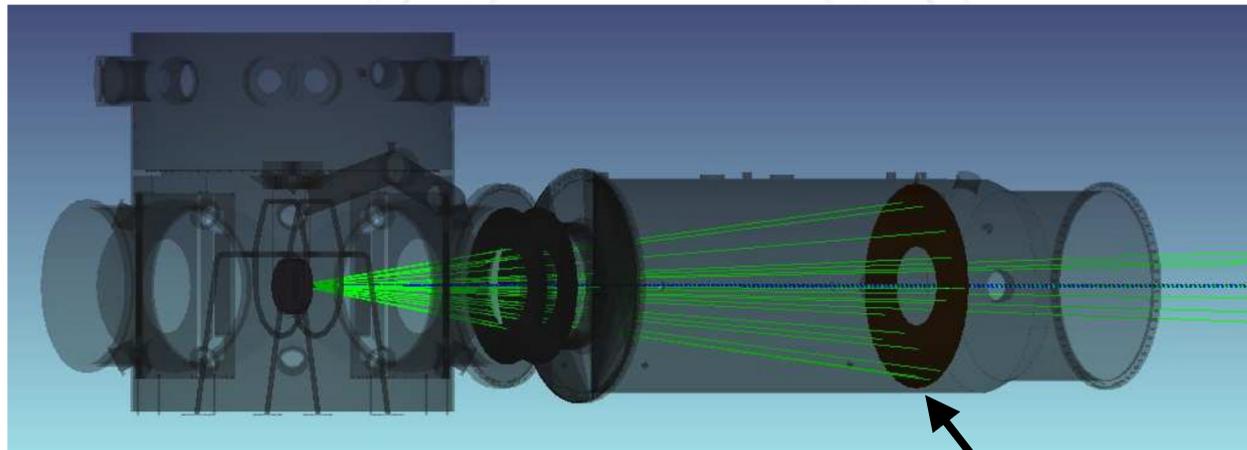
XIII ET Symposium May 2023

# Capturer 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 ?*

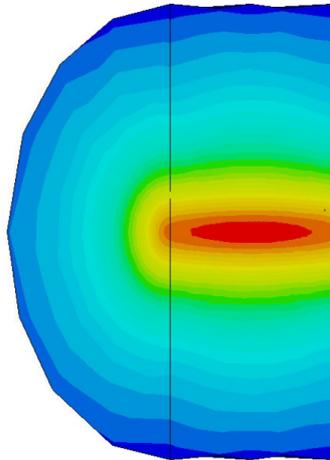
# Optique adaptative



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  
ELOT NO. 1

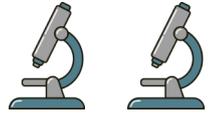


*Profil de température  
d'un miroir*

*Anneau chauffant*

*Laser CO<sub>2</sub>*

# 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  $\mu\text{m}$  ?



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)

## CHOOSING A CORNER LAYOUT FOR COSMIC EXPLORER

With the design of an entirely new facility comes the opportunity to rethink the layout of the interferometer corner. This poster shows some of the concepts we've considered so far, each with their own advantages and disadvantages. We invite you to stick a pin in your favorite layout, or better yet attach a note with the reasons why!\*

Paul Fulda (UF) for the Cosmic Explorer Optical Design Team

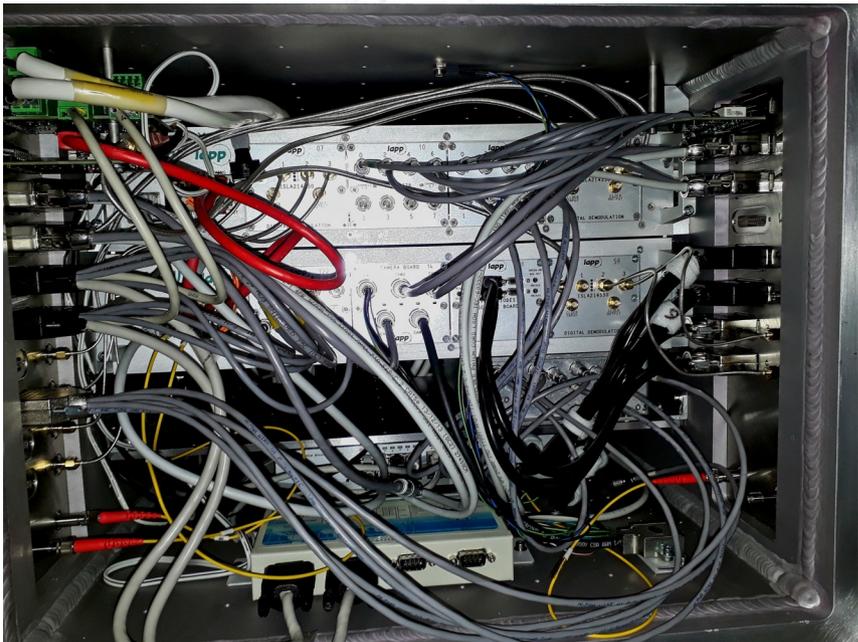
<b>aLIGO</b> 	<b>Right angle braid</b> 	<b>ITM lens braid hybrid</b> 	<b>Split telescope</b> 
<b>Reverse aLIGO</b> 	<b>ITM lens</b> 	<b>Stretched braid, a.k.a crab</b> 	<b>Wedged crab</b> 

Stick your pins or notes here

# DAQ, timing, système temps réel



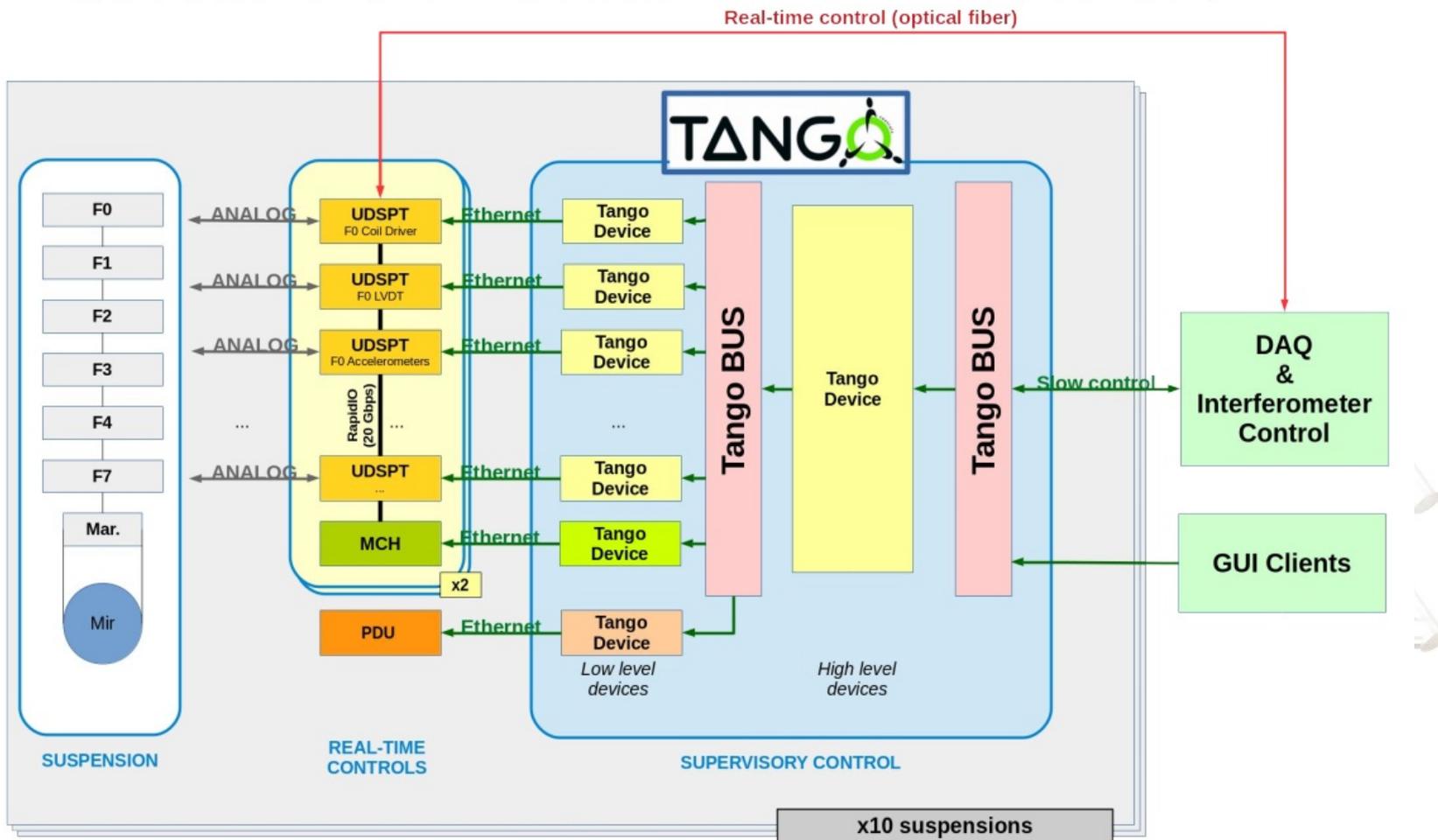
- pas vraiment d'activité pour ET/CE
- discussion: système commercial ou fait maison (comme à Virgo) ?
- pour le timing, on parle de White Rabbit (Nikhef)
- participation aux prototypes



*Boite DAQ pour Virgo*

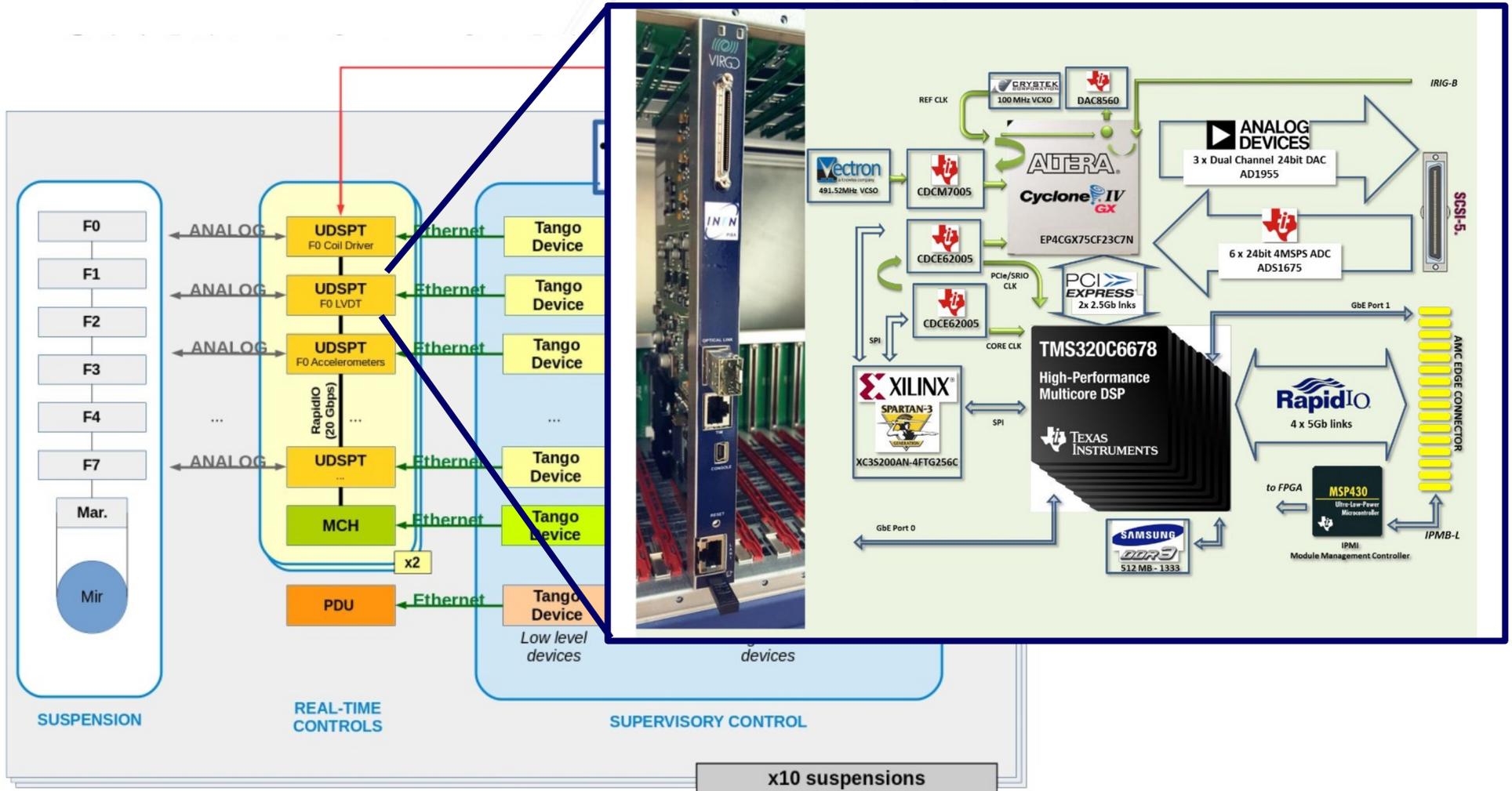
# DAQ, timing, système temps réel

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



# DAQ, timing, système temps réel

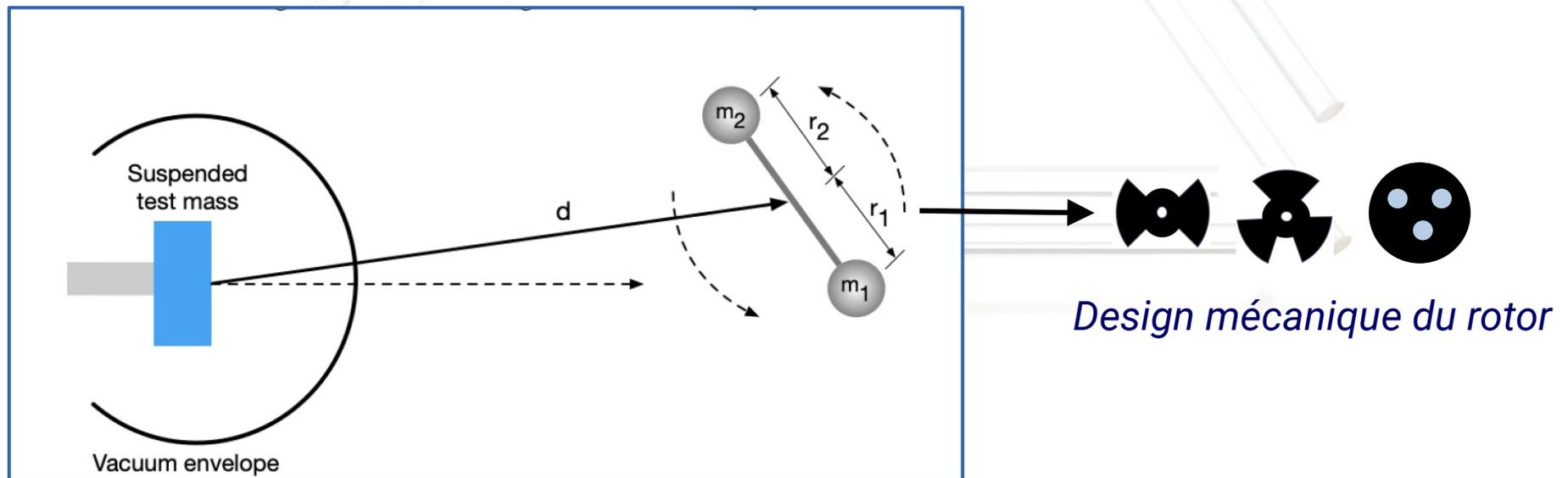
Exemple pour Virgo d'un contrôle d'une suspension :



# 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



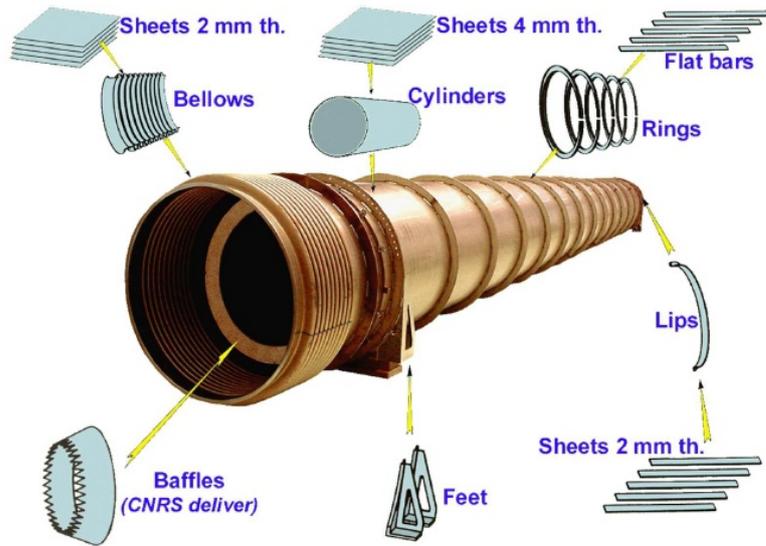
# **IV**

## **Vide / cryogénie**

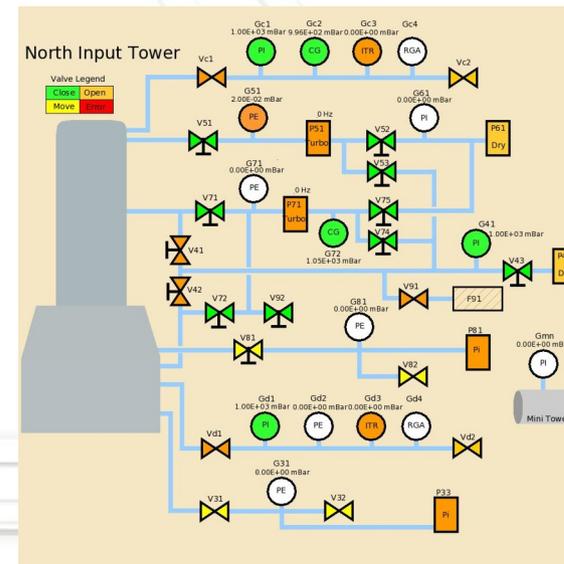
# Vide



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



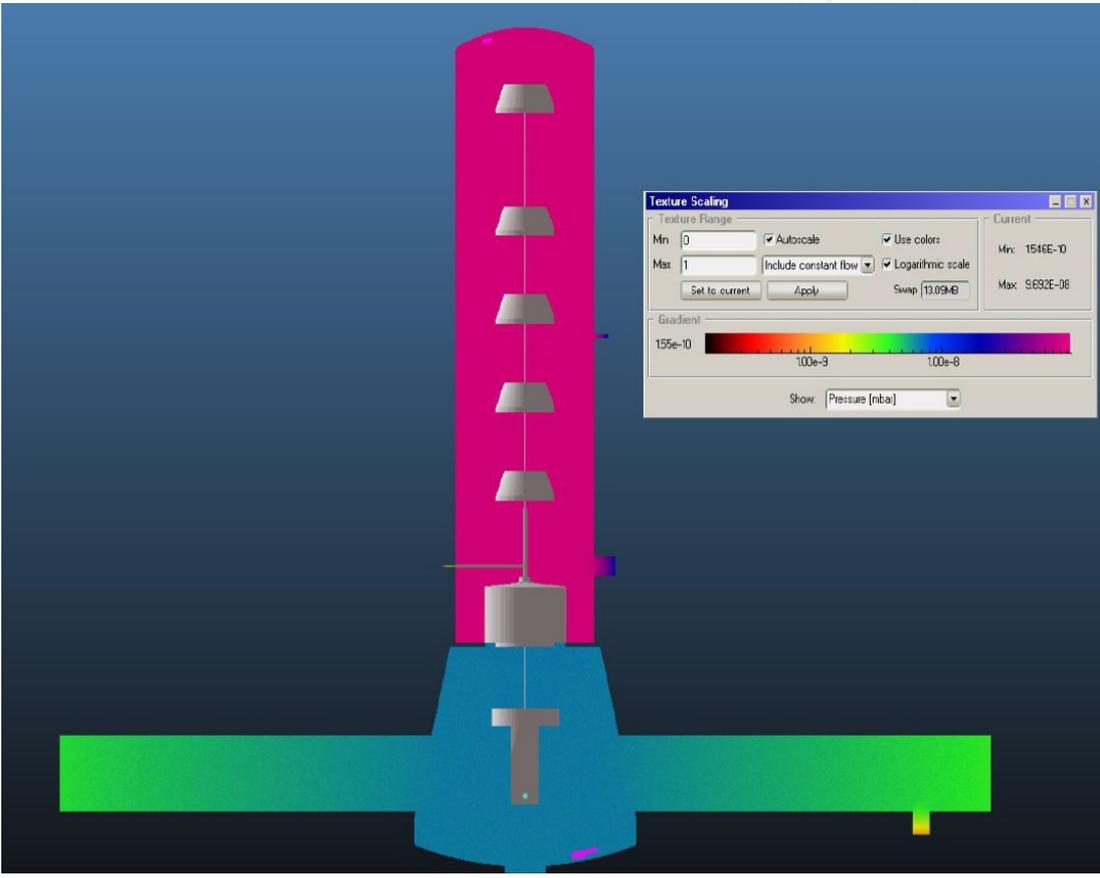
*Design du tube à vide*



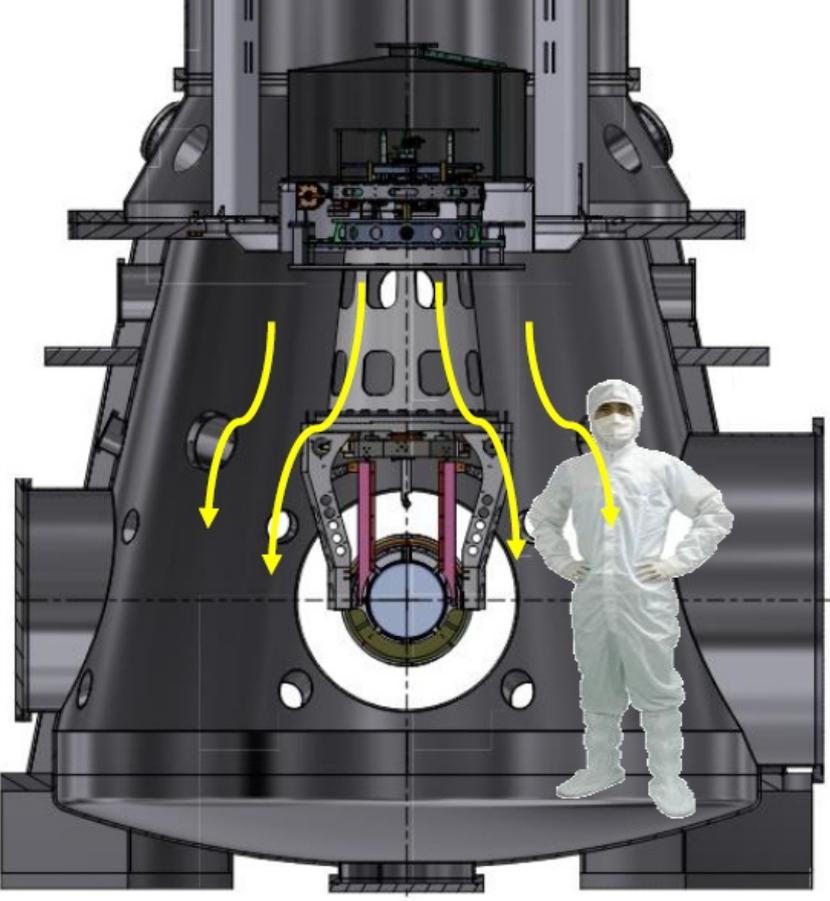
*Stratégie de pompage + contrôle*

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*

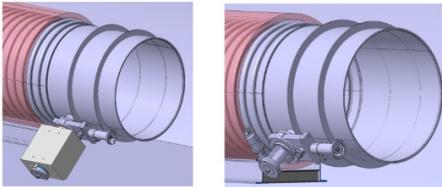


*Flux d'air pour garder la tour propre lors d'intervention*

# Exemple : tube à vide



## Main achievements of WP1: pumping modules

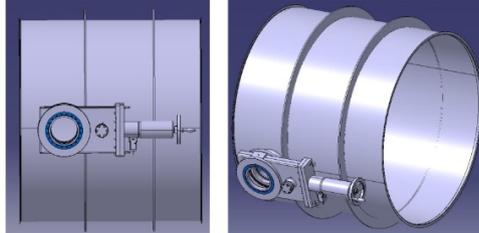
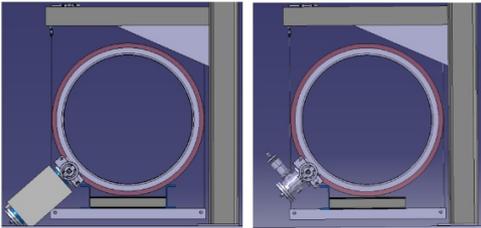


Straight tubes, initial assumptions:

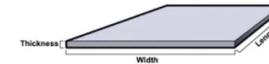
- 3-4 mm thick, 1-m long
- Stiffeners
- Gate valves DN160 and DN100

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

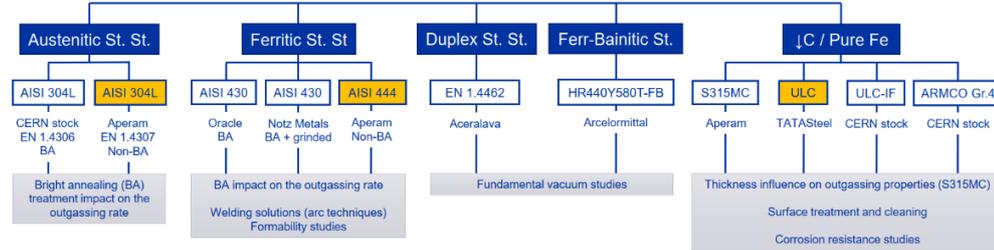
Cedric Garion



## Main achievements of WP2: material selection



Ana Teresa Perez and M. Dakshinamurthy



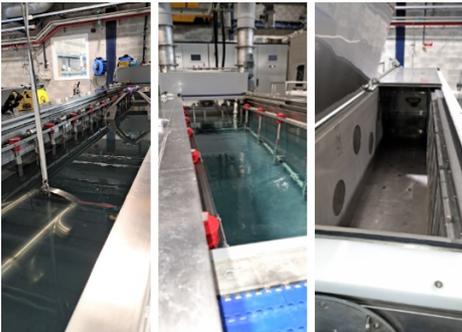
Material selection will impact manufacturing strategy, cleaning, installation procedure and inspection plans, but also future actions like service maintenance, and cost.

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

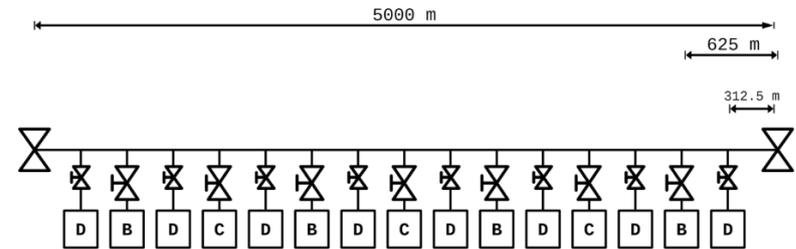
Detergent cleaning



Solvent cleaning



## Main achievements of WP6: pumping scheme



From intermediate phase → B 2000 l/s NEG D 1000 l/s NEG C 2000 l/s NEG + 500 l/s IP

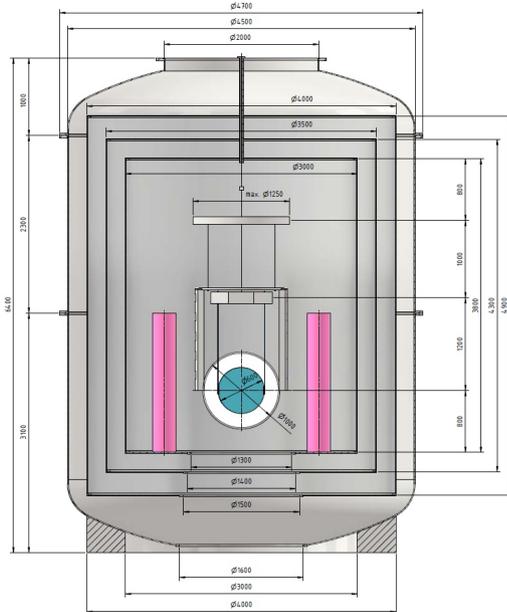
Gate valve DN100 (C = 1400 l/s)

Gate valve DN160 (C = 3700 l/s)

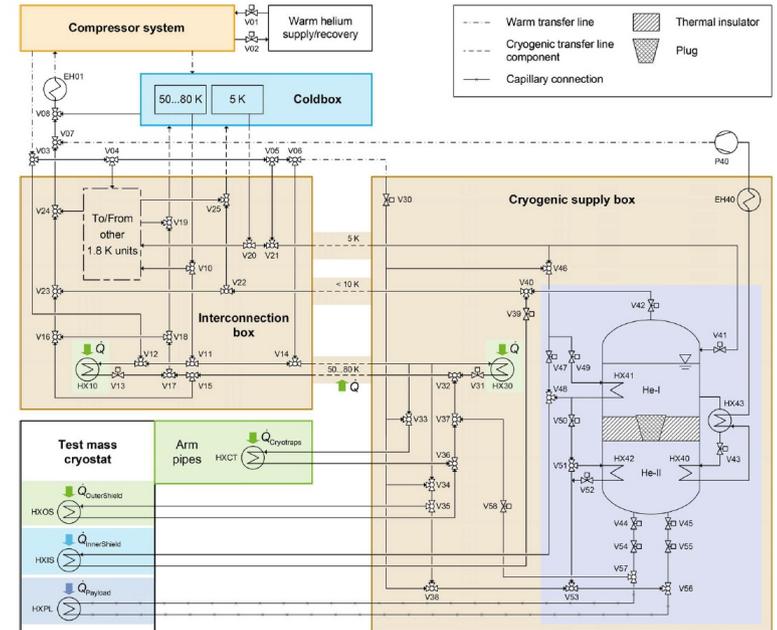
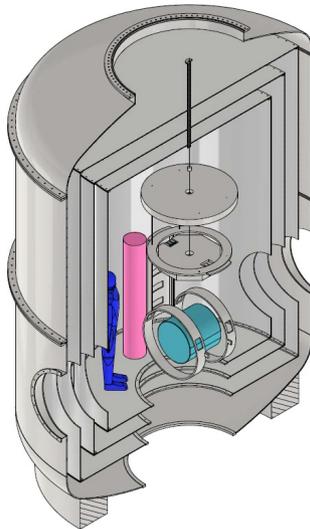
# Cryogénie



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

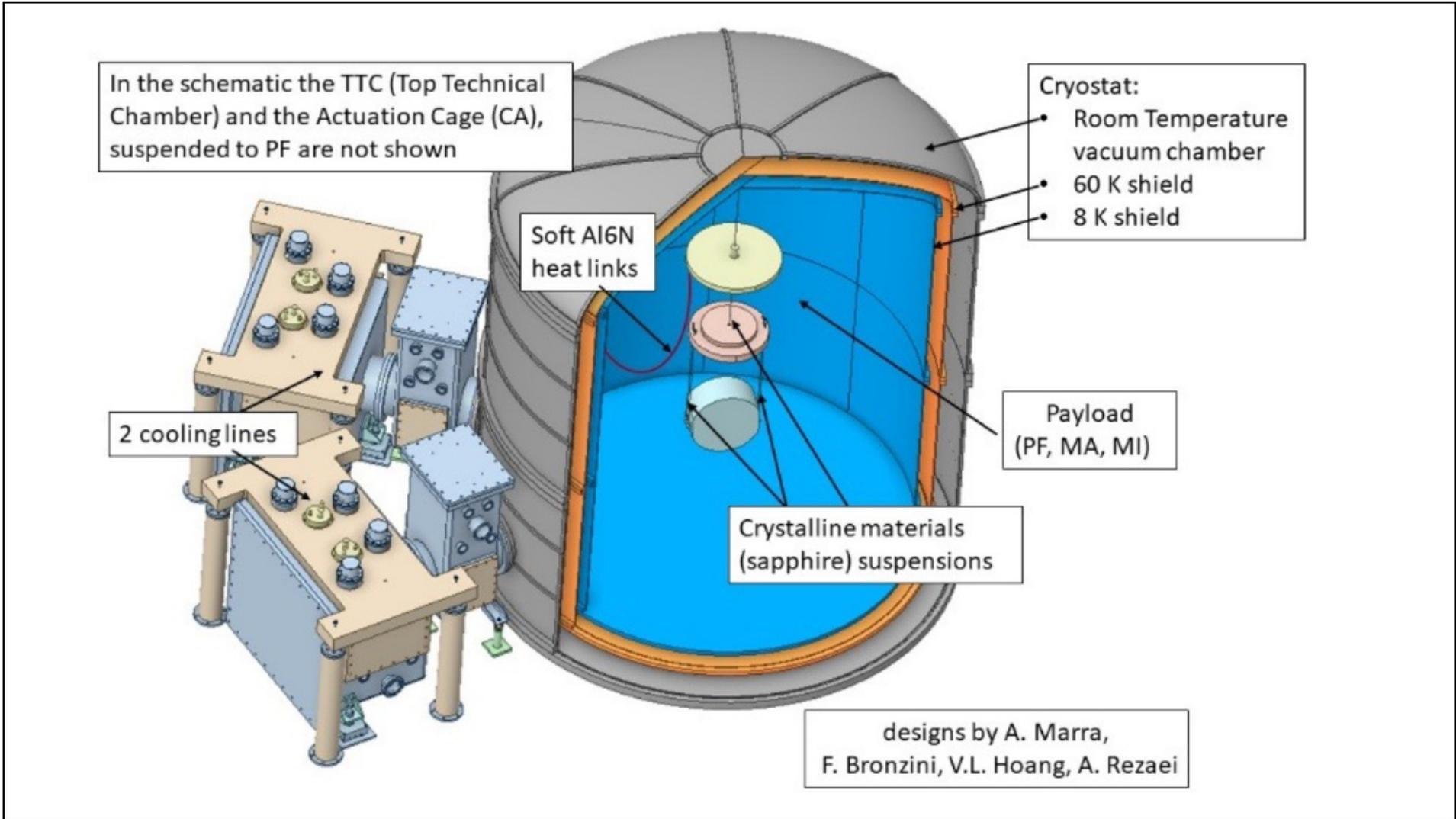


*Idée de cryostat*



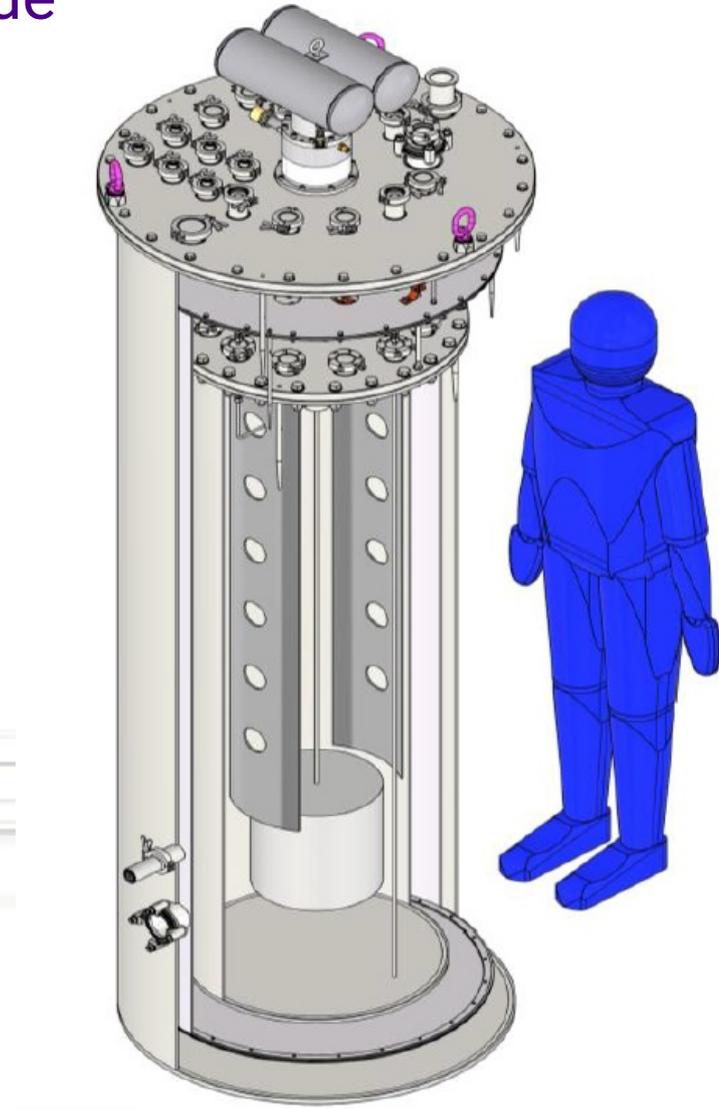
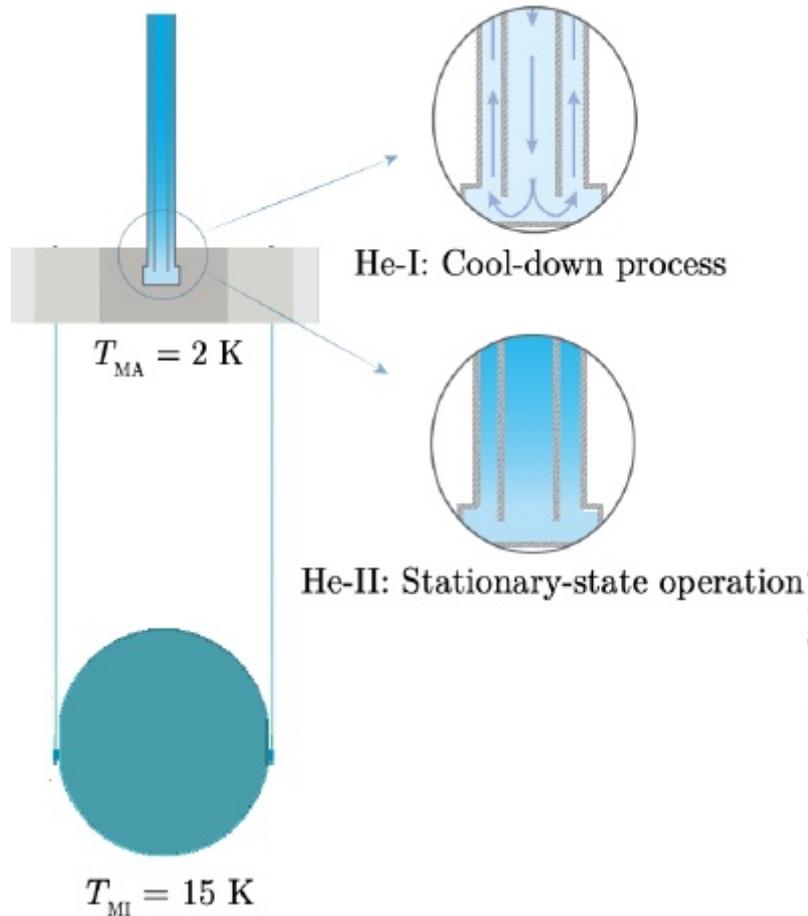
*Opération de l'hélium liquide*

# Exemple de prototype



# Exemple de prototype

avec utilisation de He-II super-fluide



*KIT – pour une version future de ET ?*

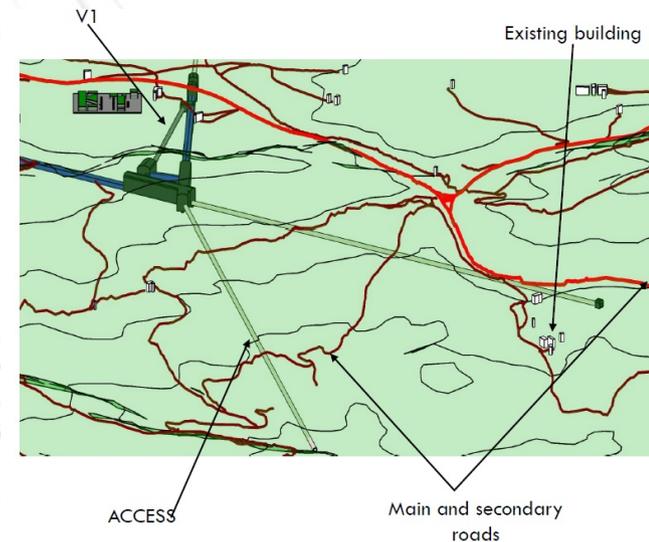
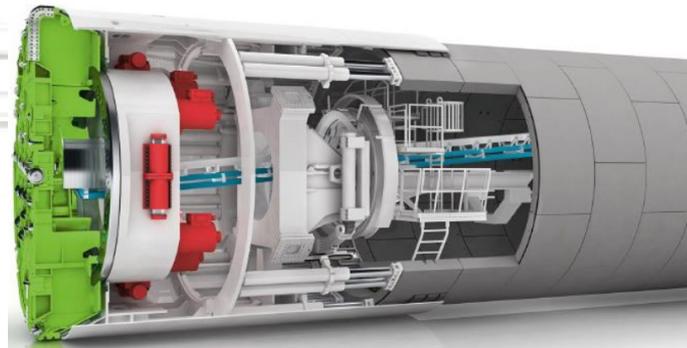
# **V**

## **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 ?*

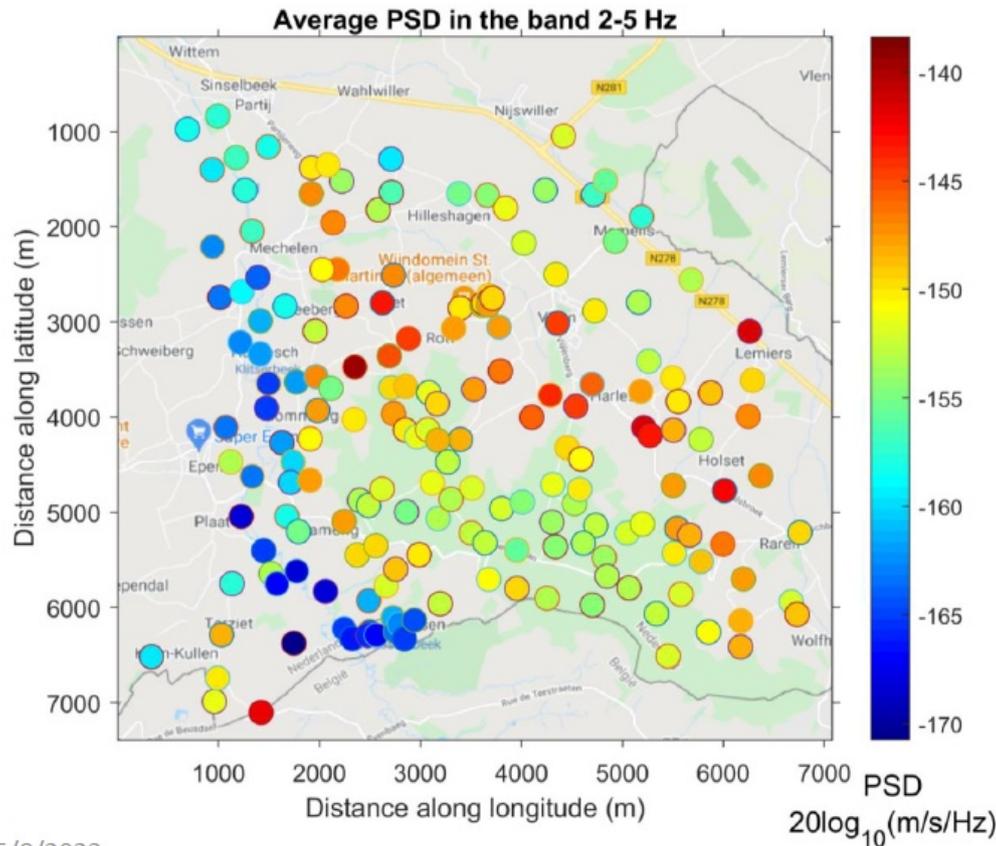
*Méthode d'excavation ?*

*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

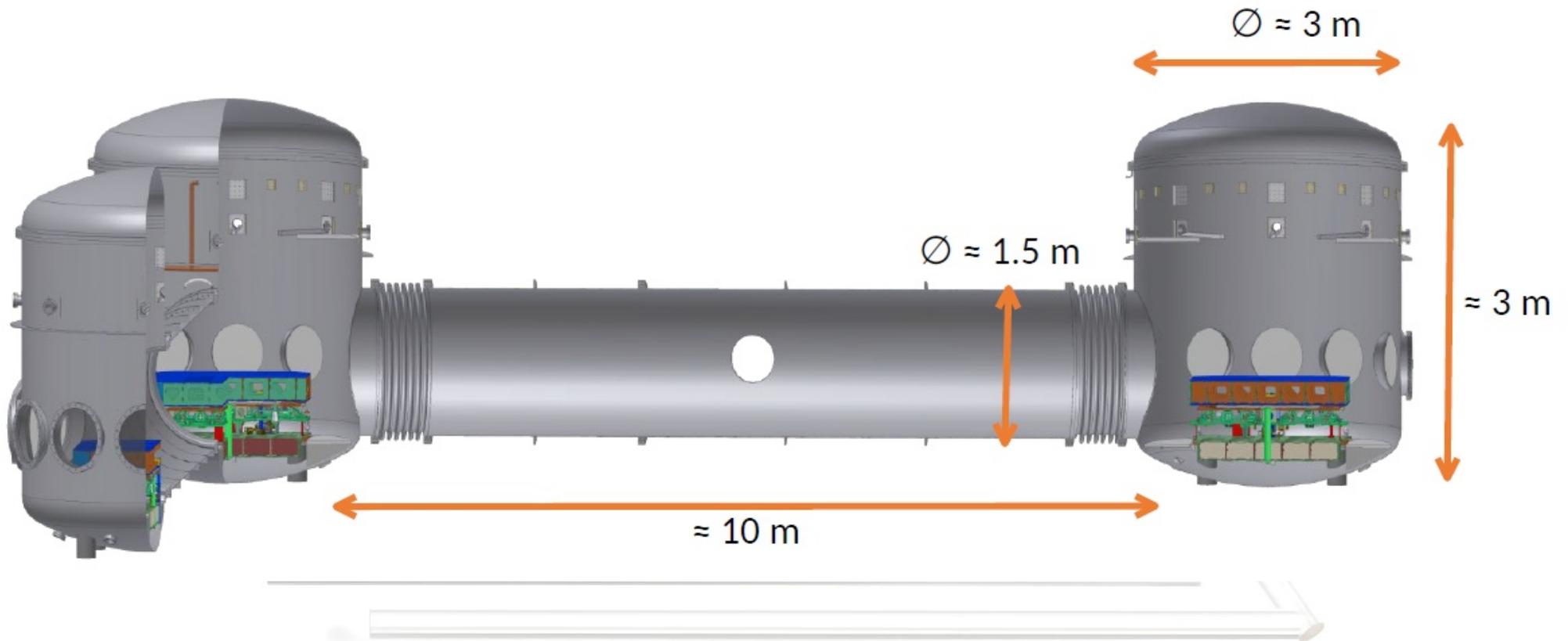
**III.**

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

# Le 10 mètre de Hanovre



Pour attendre la limite quantique standard



Débuté en ~ 2010

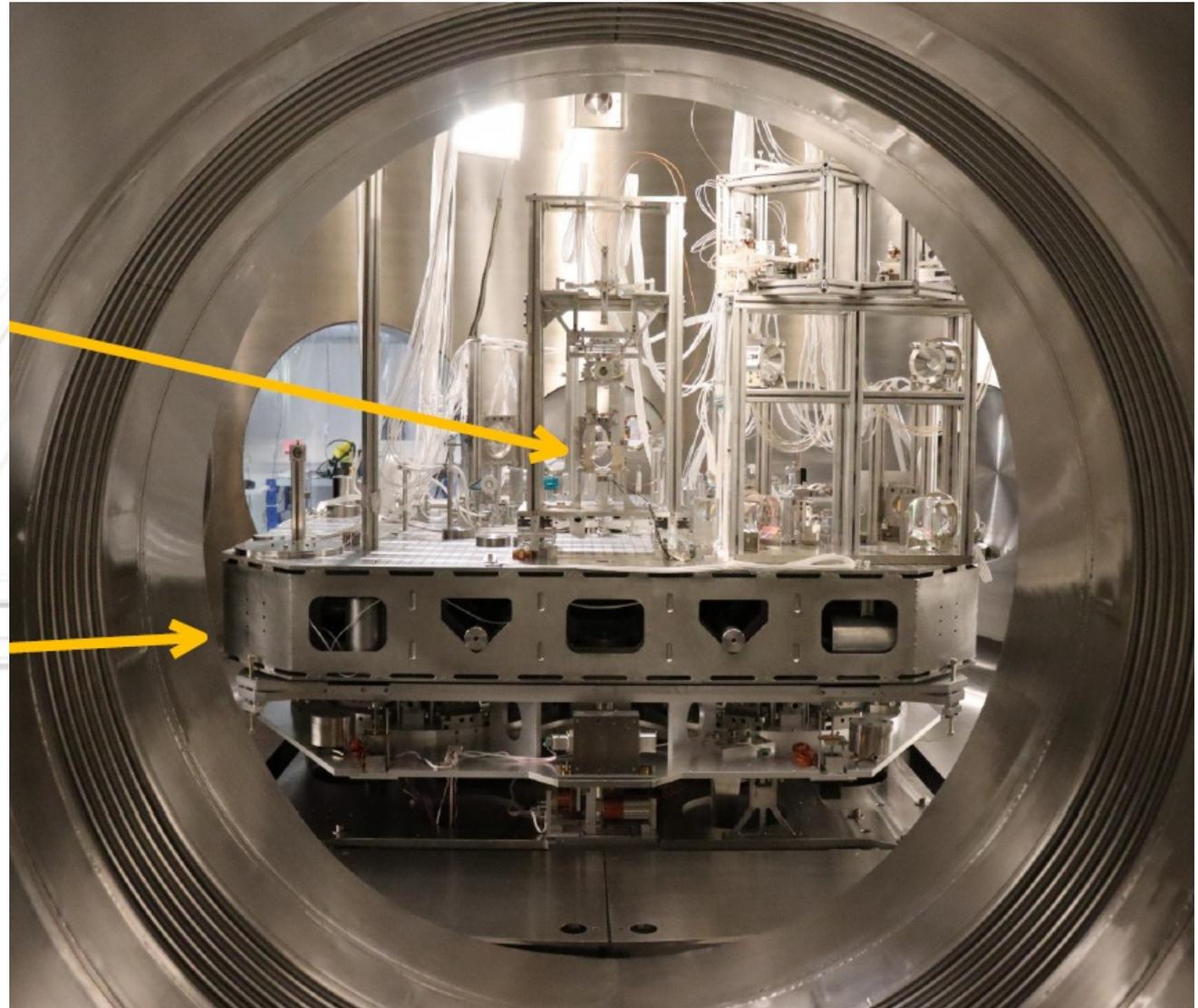
# Le 10 mètre de Hanovre



Pour attendre la limite quantique standard

Optique suspendue

Isolation sismique

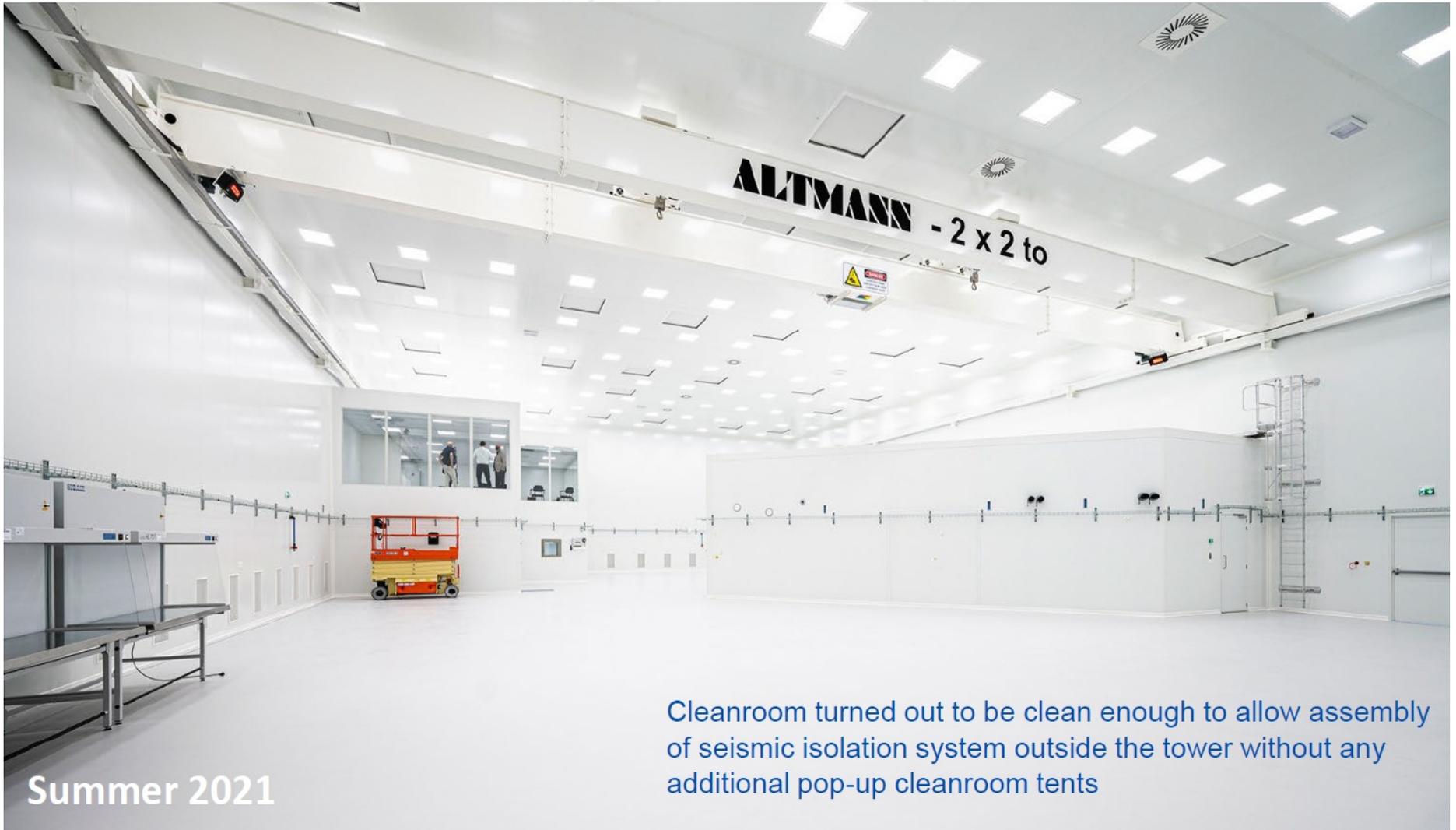




# Le prototype de 10 mètre à Maastricht



Tester les miroirs en silicium + cryogénie + laser à 1550nm et 2  $\mu$ m



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



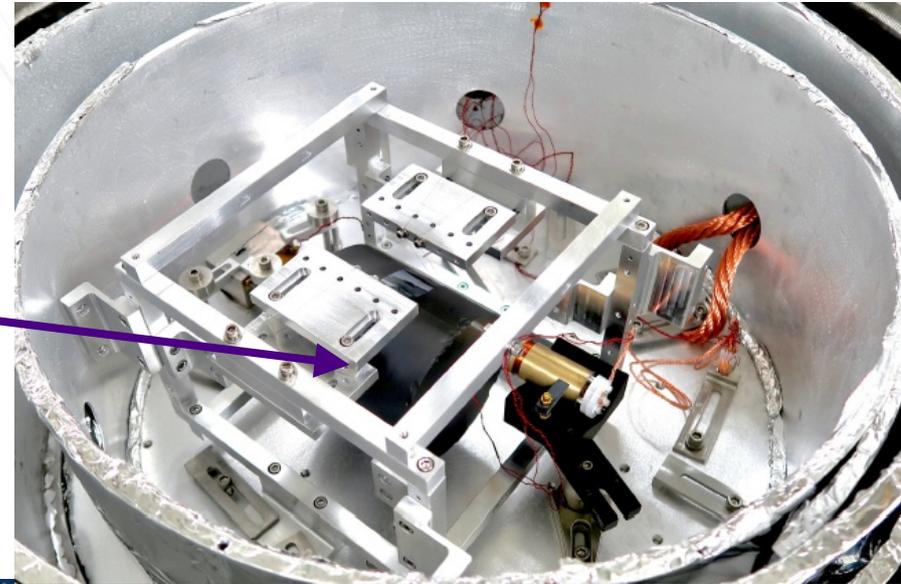


# Le prototype de 40 mètre à Caltech



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

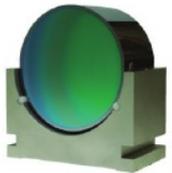
## M2Tech technologies

From the astrophysical signal collection to multi-messenger alerts

Astrophysical signal



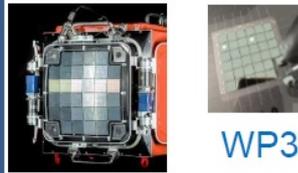
High quality mirrors  
optical windows



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

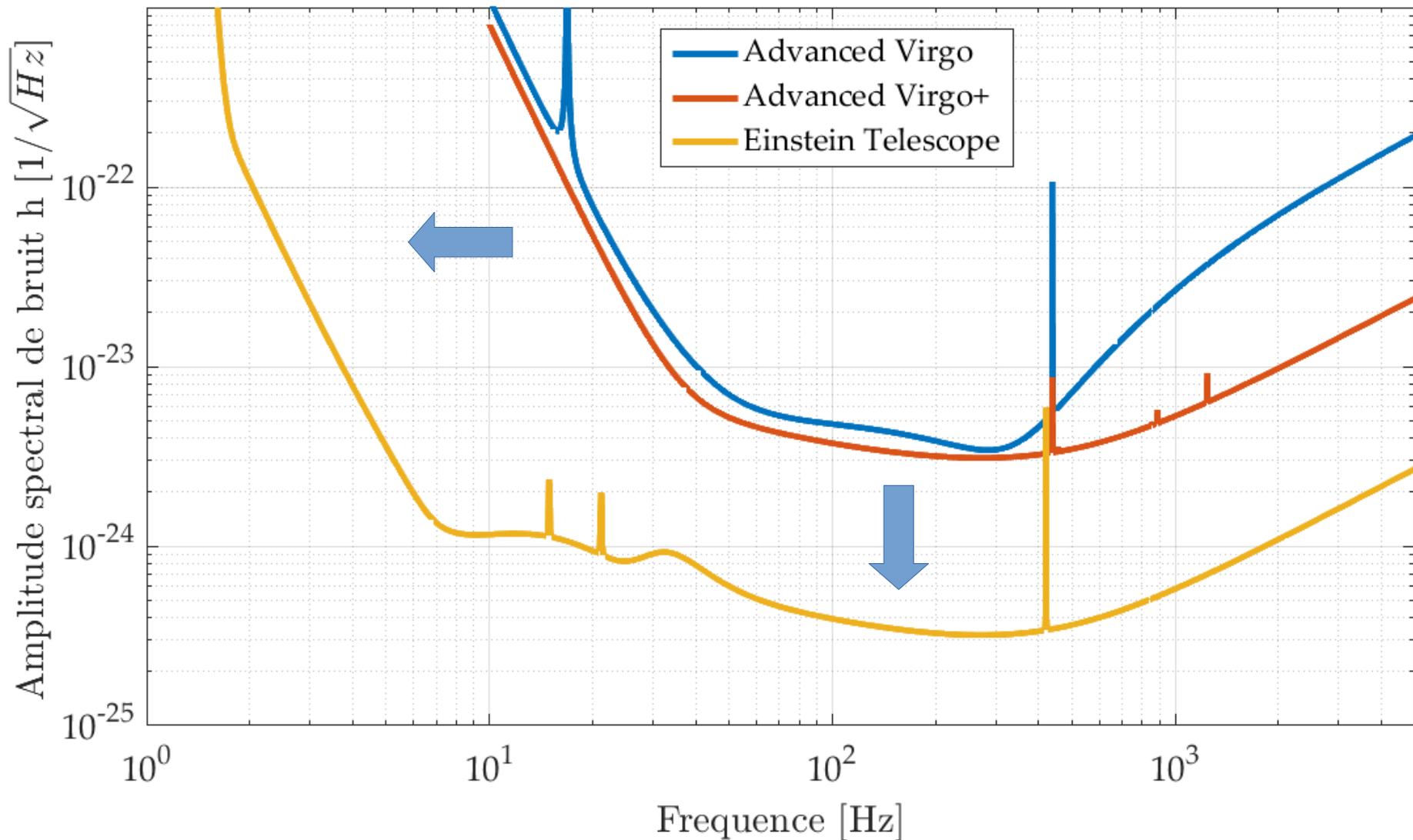




# But de ET: être 10 fois plus sensible



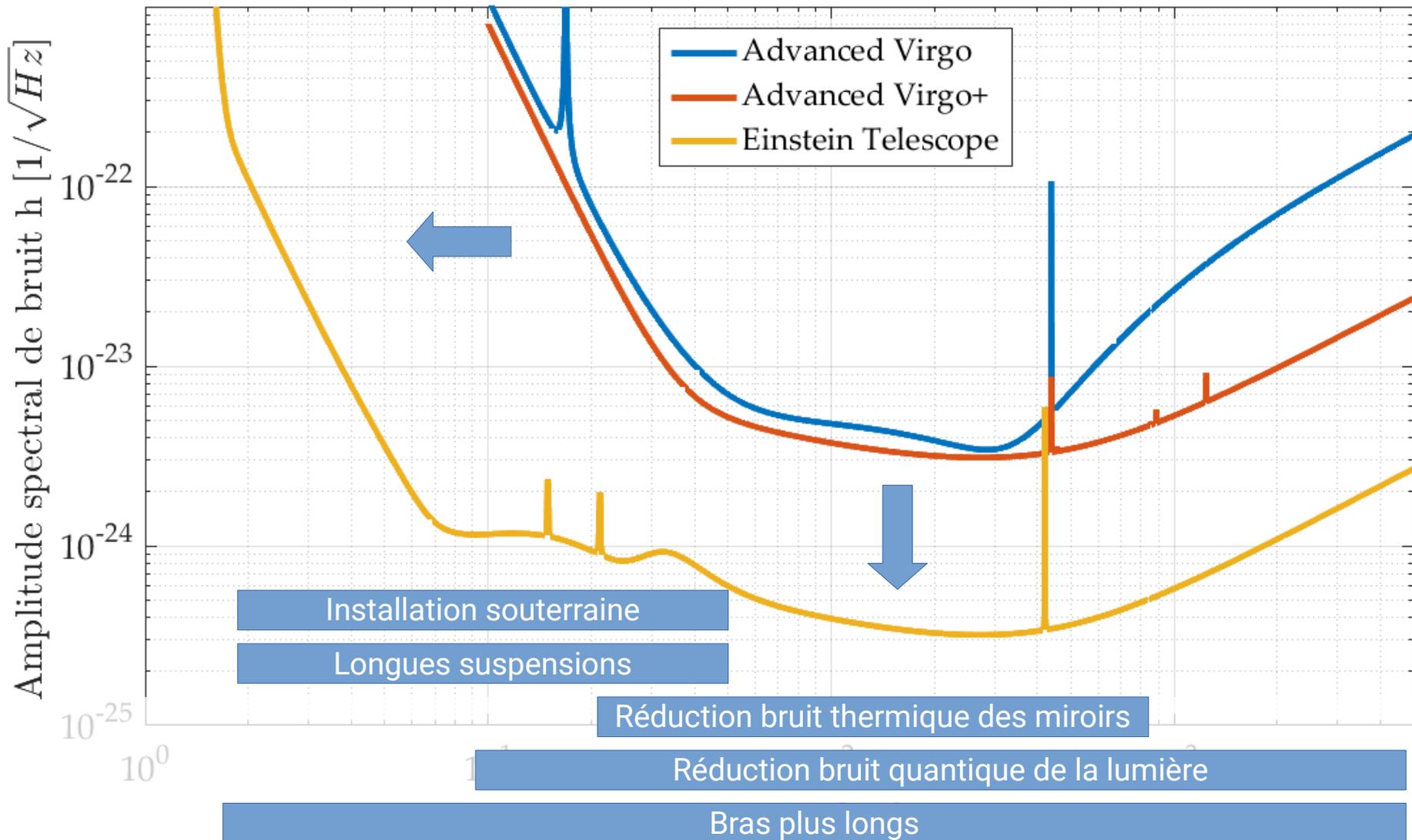
que la seconde génération de LIGO-Virgo (Advanced Virgo/LIGO)



# But de ET: être 10 fois plus sensible



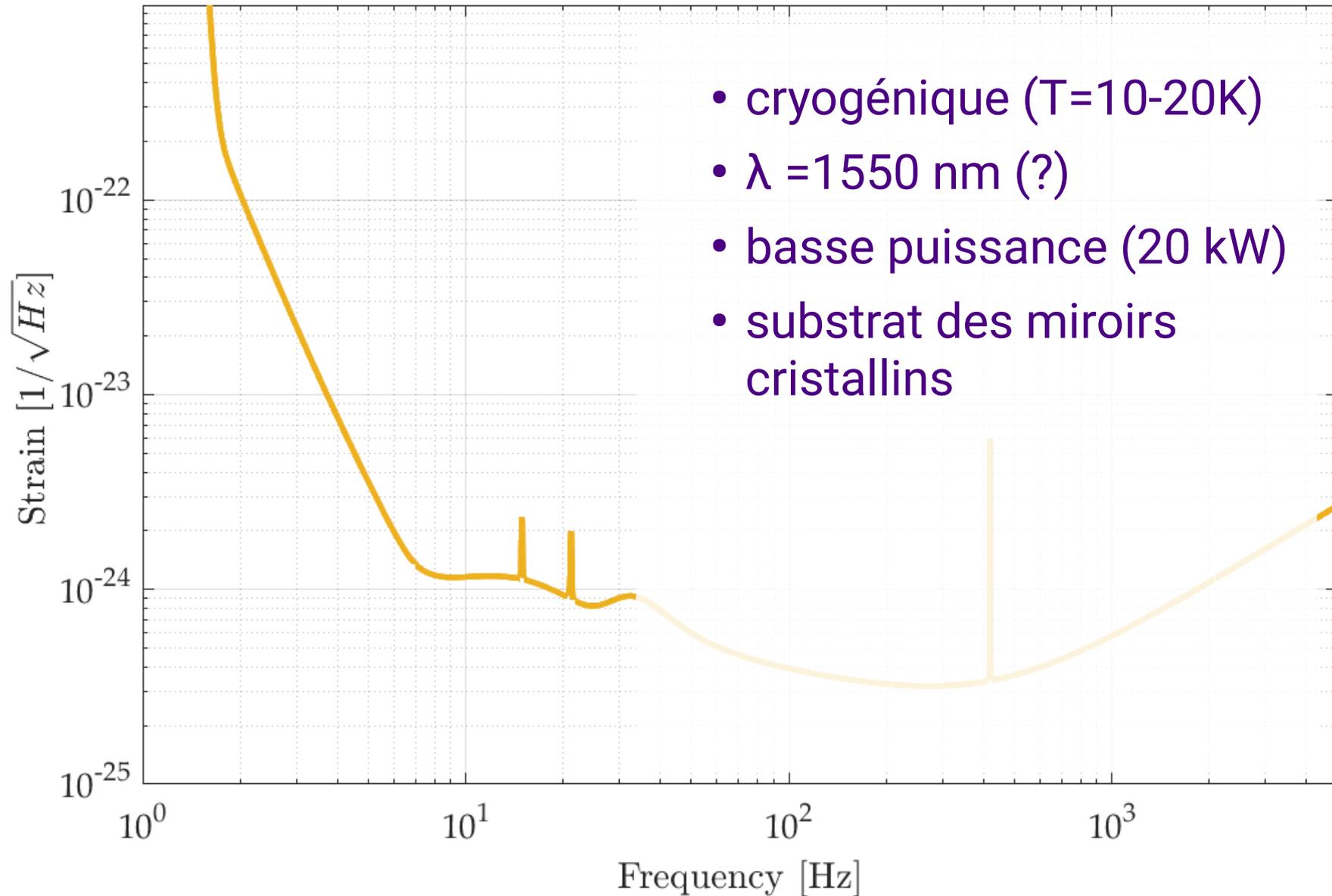
que la seconde génération de LIGO-Virgo (Advanced Virgo/LIGO)



# La courbe de sensibilité reconstituée



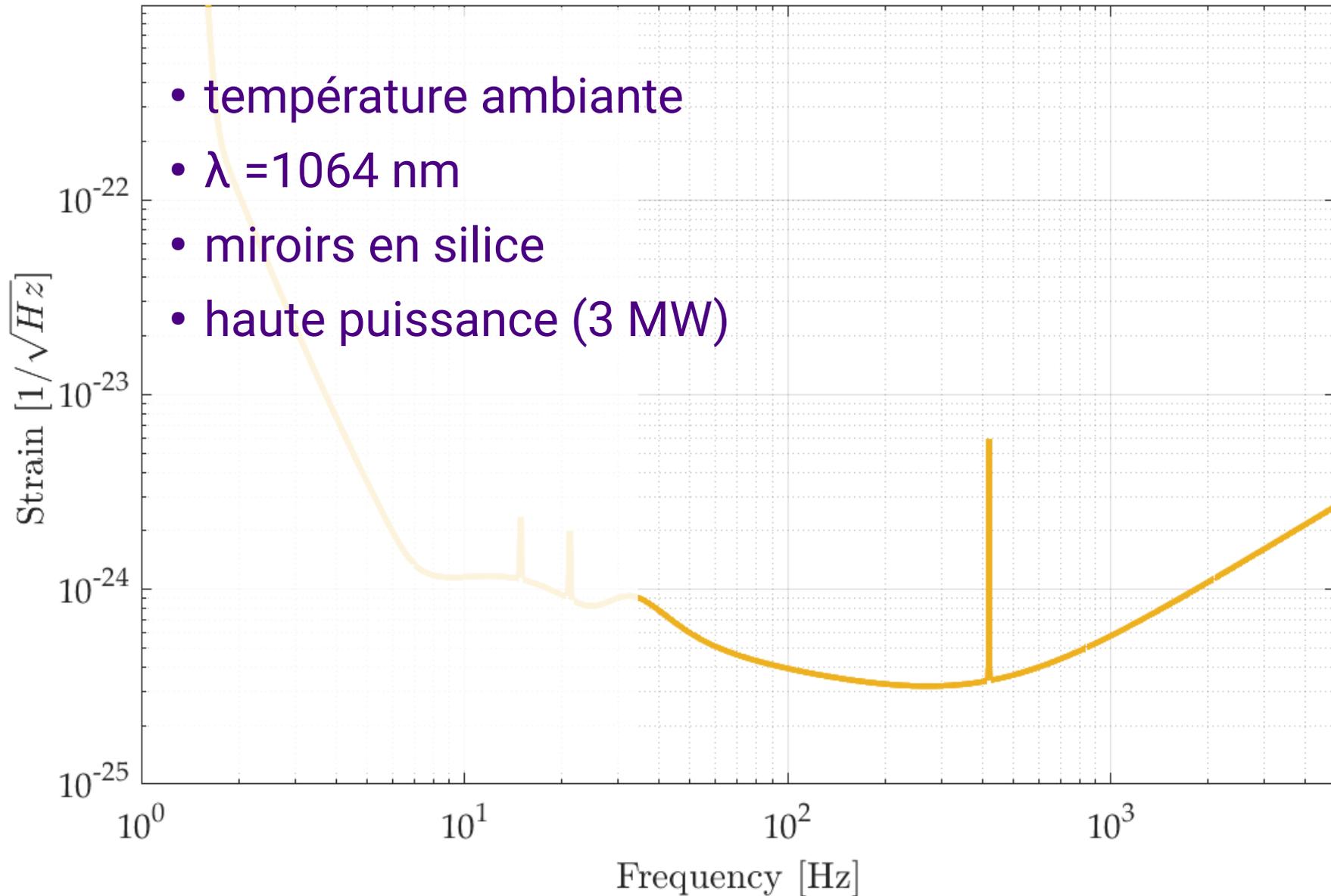
## Le détecteur basse fréquence (ET-LF)



# La courbe de sensibilité reconstituée



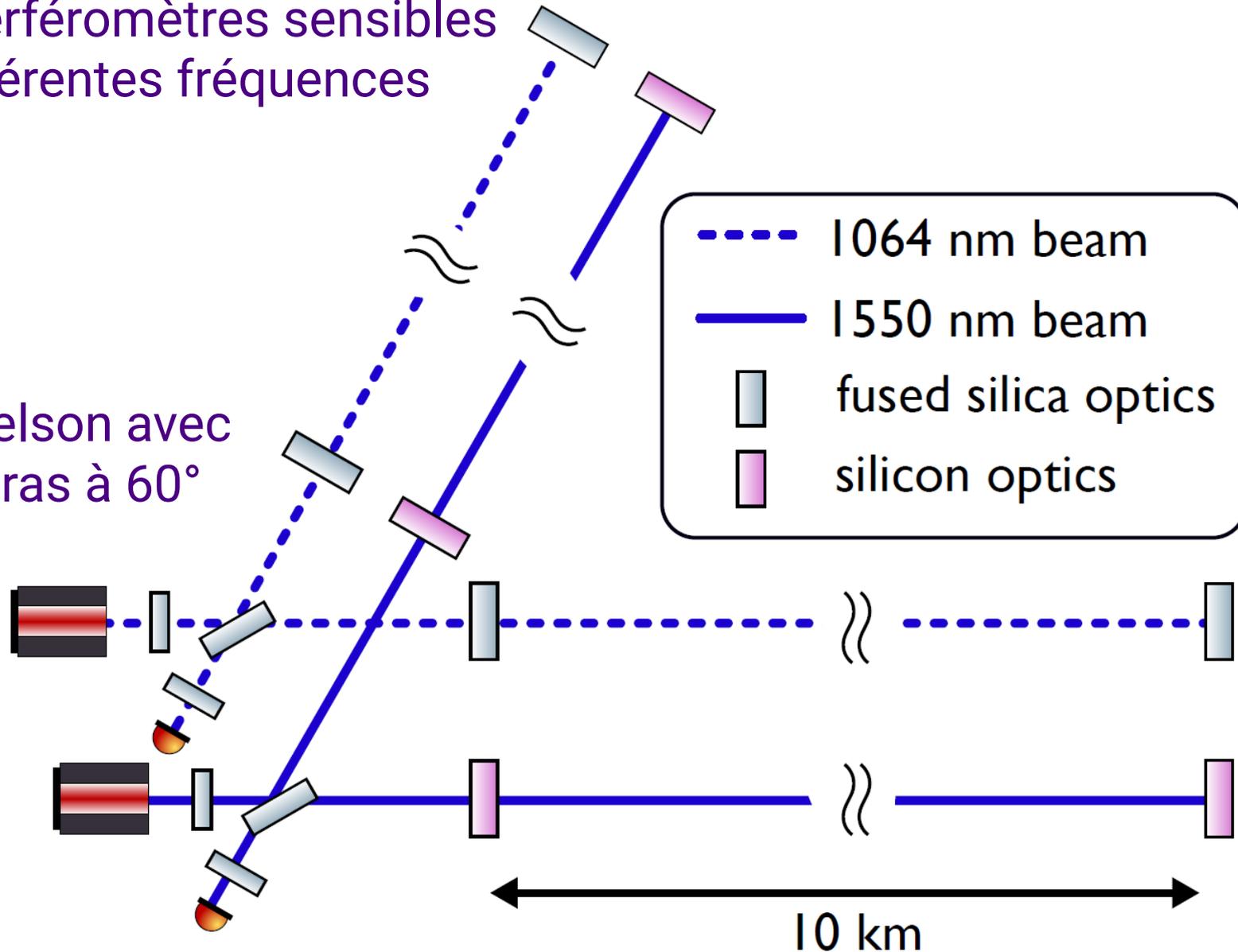
## Le détecteur haute fréquence (ET-HF)



# 1 détecteur = 2 interféromètres

2 interféromètres sensibles à différentes fréquences

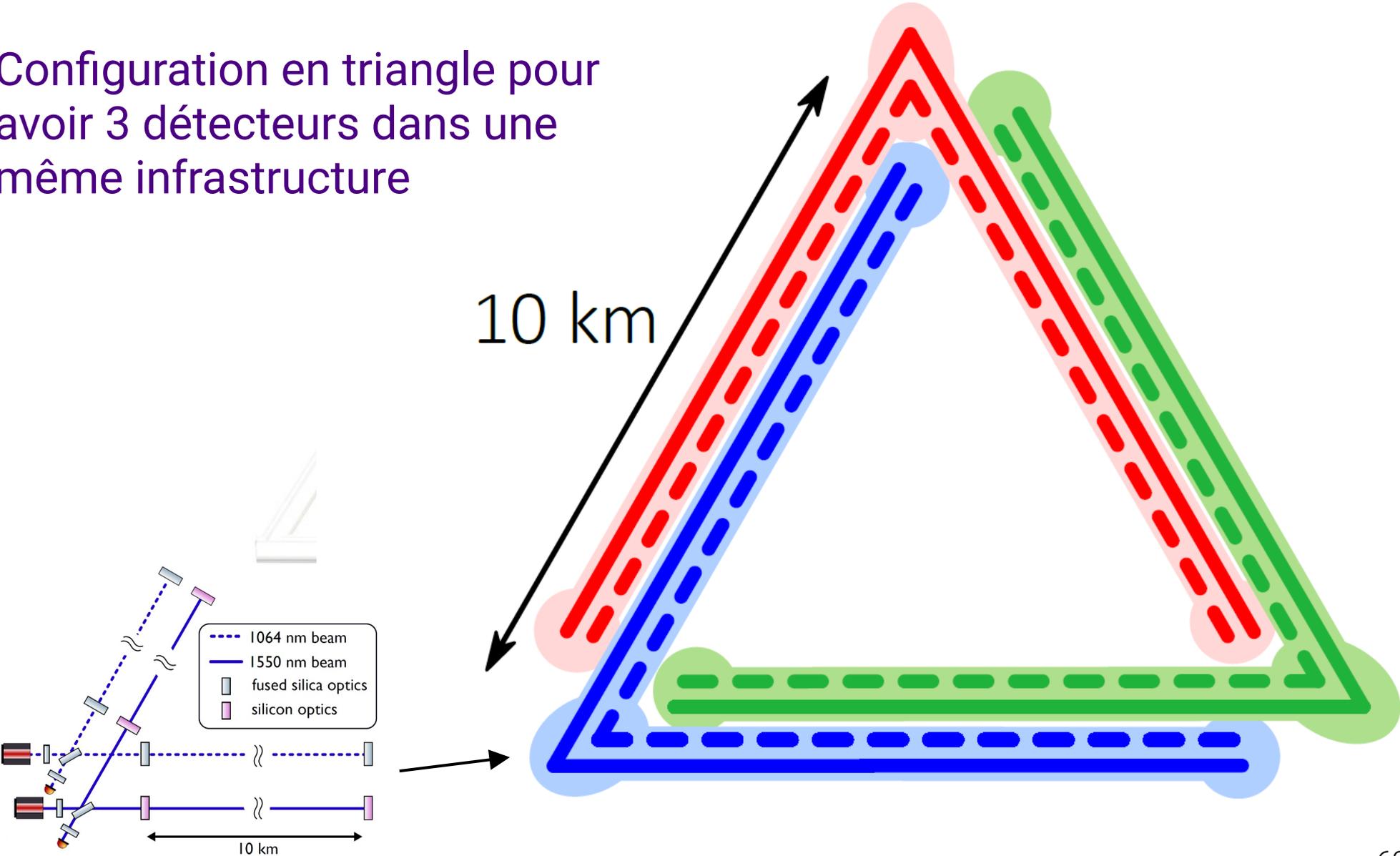
Michelson avec des bras à 60°



# Pas 1, mais 3 détecteurs



Configuration en triangle pour avoir 3 détecteurs dans une même infrastructure

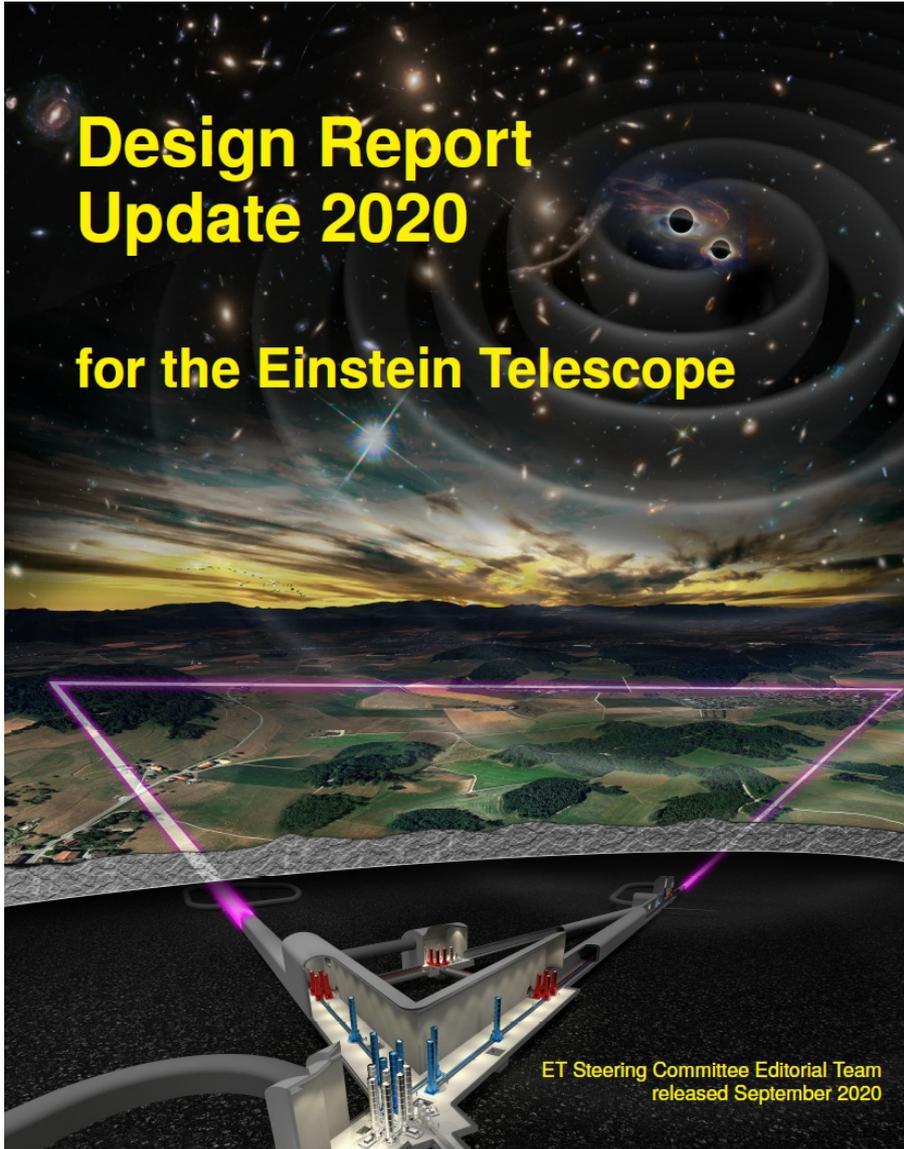


# Pour en savoir plus...



## Design Report Update 2020

### for the Einstein Telescope



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 <sub>00</sub>	TEM <sub>00</sub>
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)	$5 \cdot 10^{-10}$ m/ $f^2$	$5 \cdot 10^{-10}$ m/ $f^2$
Gravity gradient subtraction	none	factor of a few

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