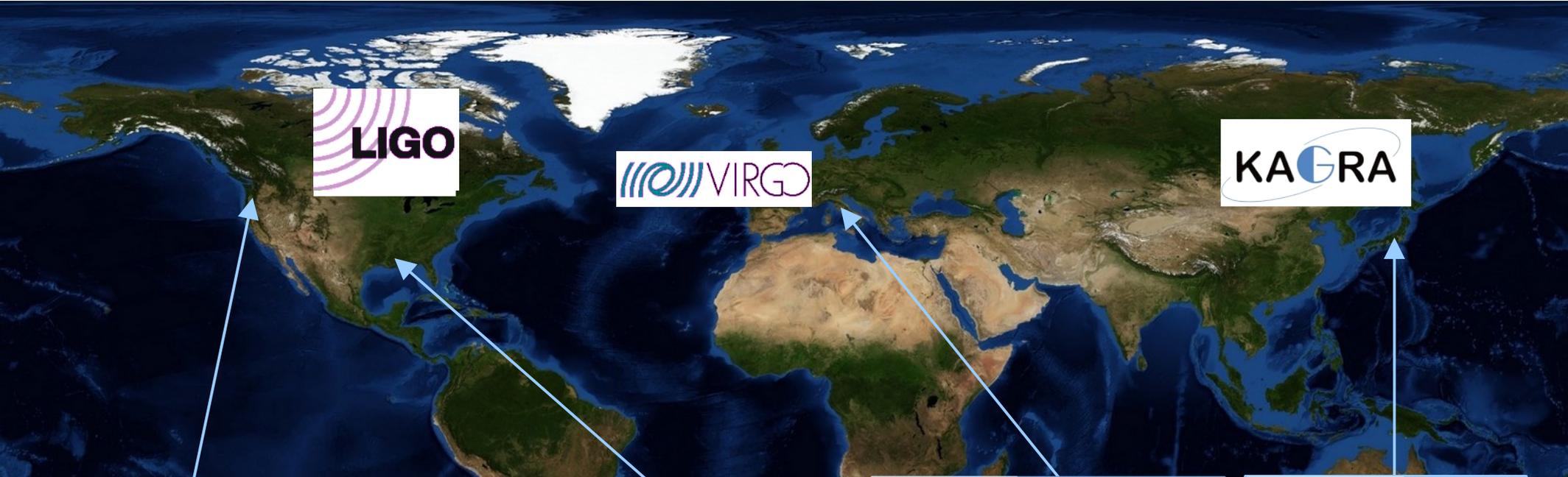


R&D matériaux pour les ondes gravitationnelles

Jérôme Degallaix pour le LMA

Un réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles



LIGO

VIRGO

KAGRA



Un interféromètre de Michelson géant...



Le détecteur Virgo: un microphone à ondes gravitationnelles

...avec en son cœur de supers miroirs

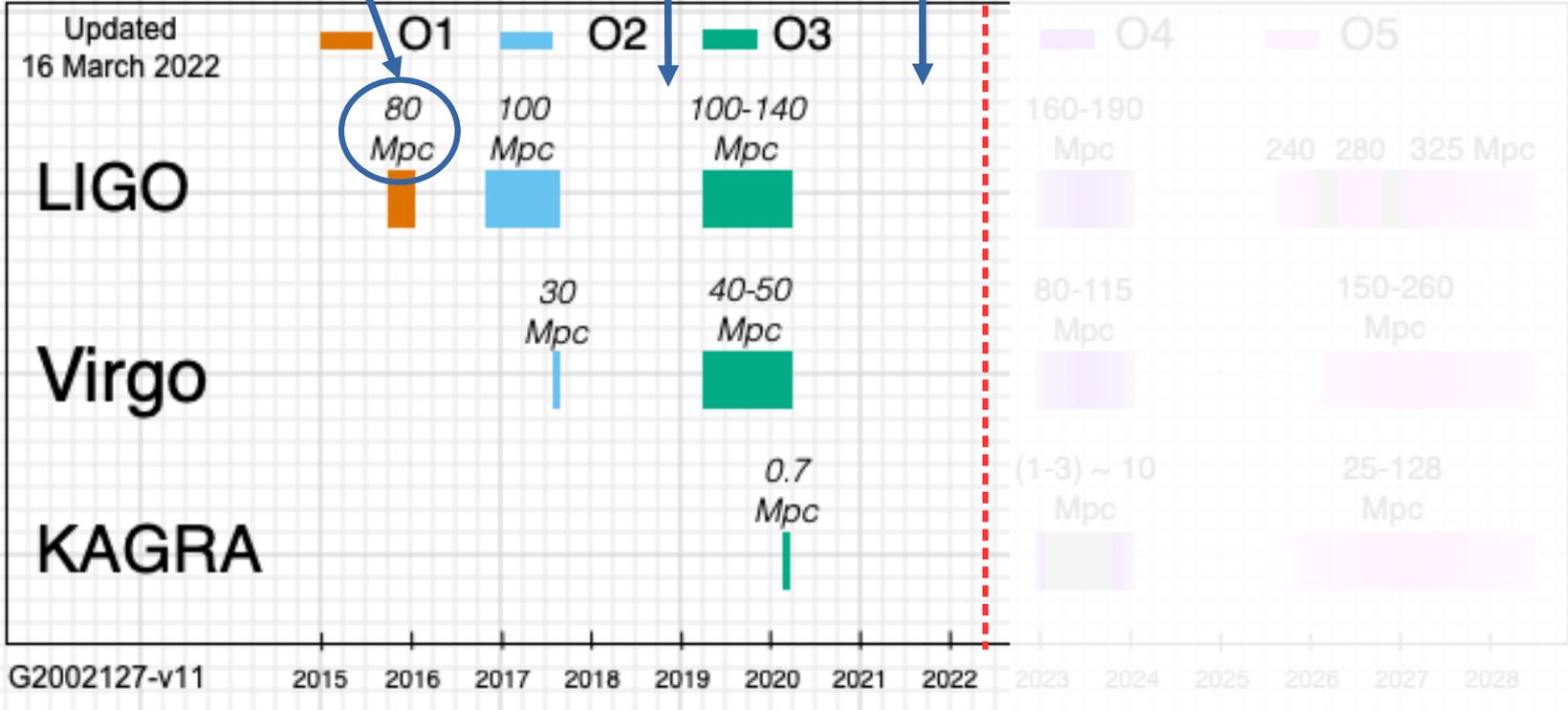


Le détecteur Virgo: un microphone à ondes gravitationnelles

Les prises de données

distance de détection

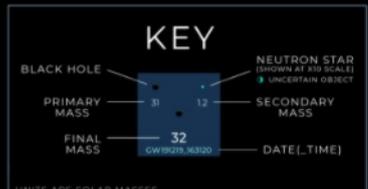
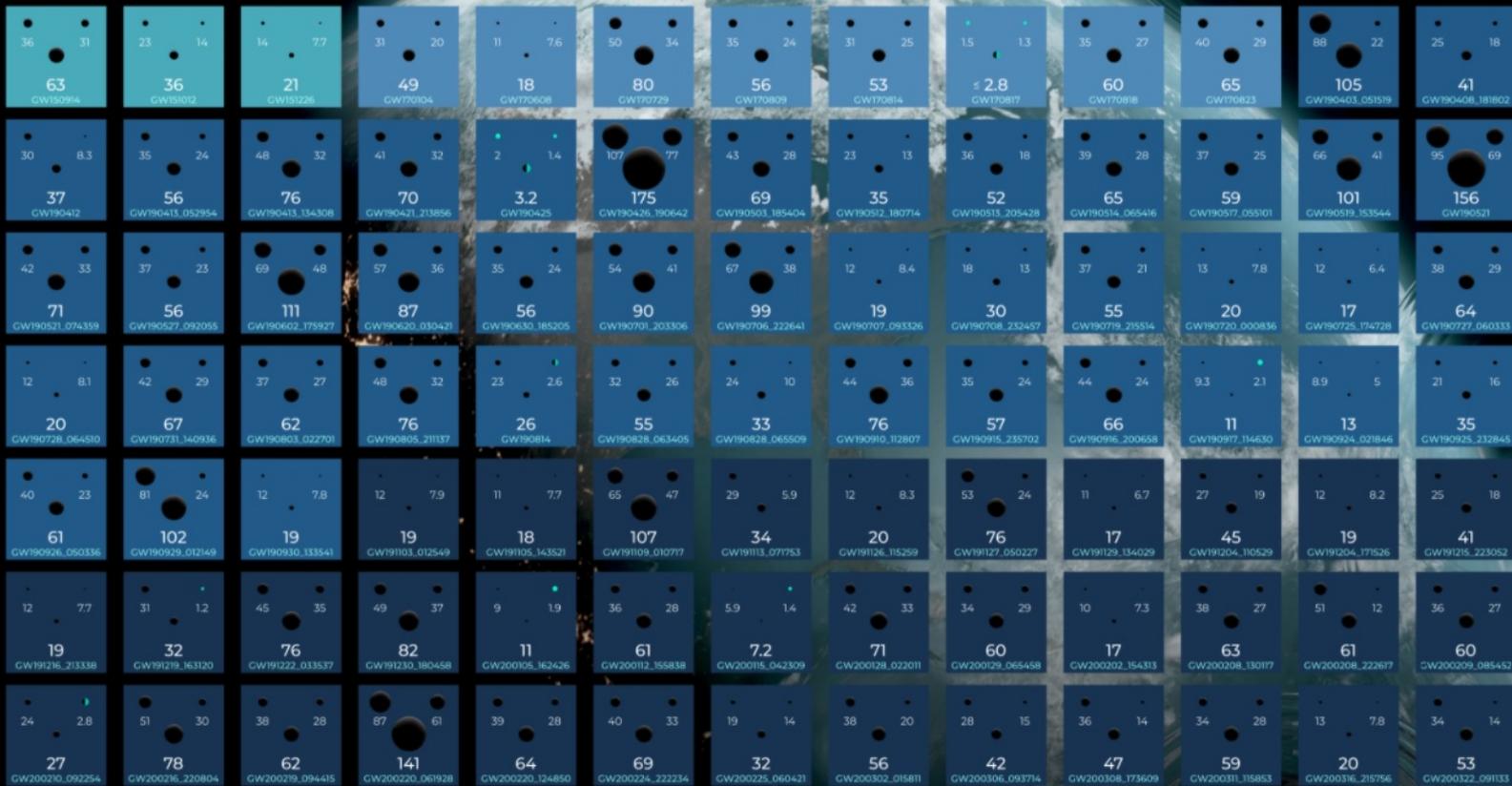
amélioration des instruments



OBSERVING
01
2015 - 2016

02
2016 - 2017

03a+b
2019 - 2020

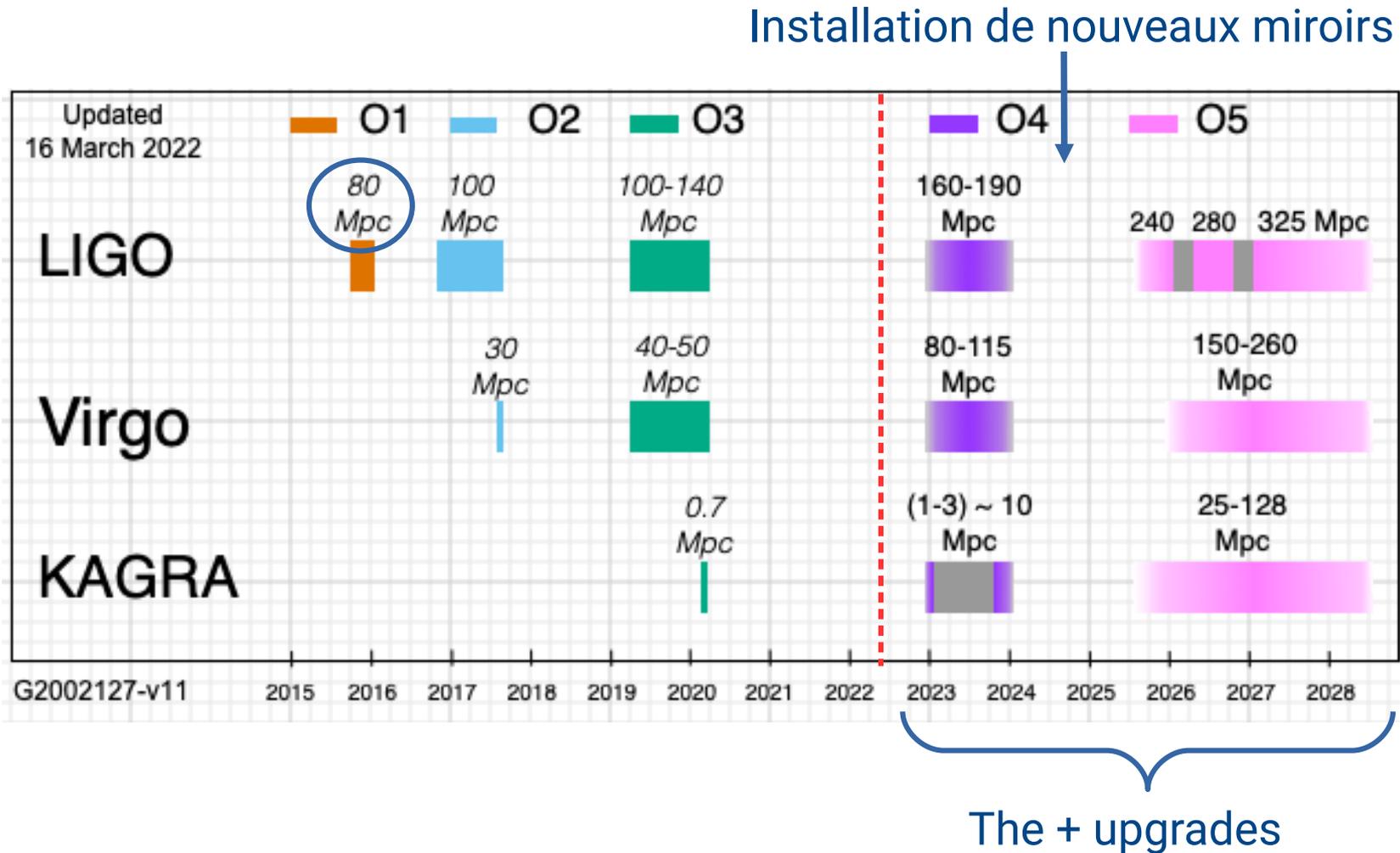


GRAVITATIONAL WAVE MERGER DETECTIONS

SINCE 2015

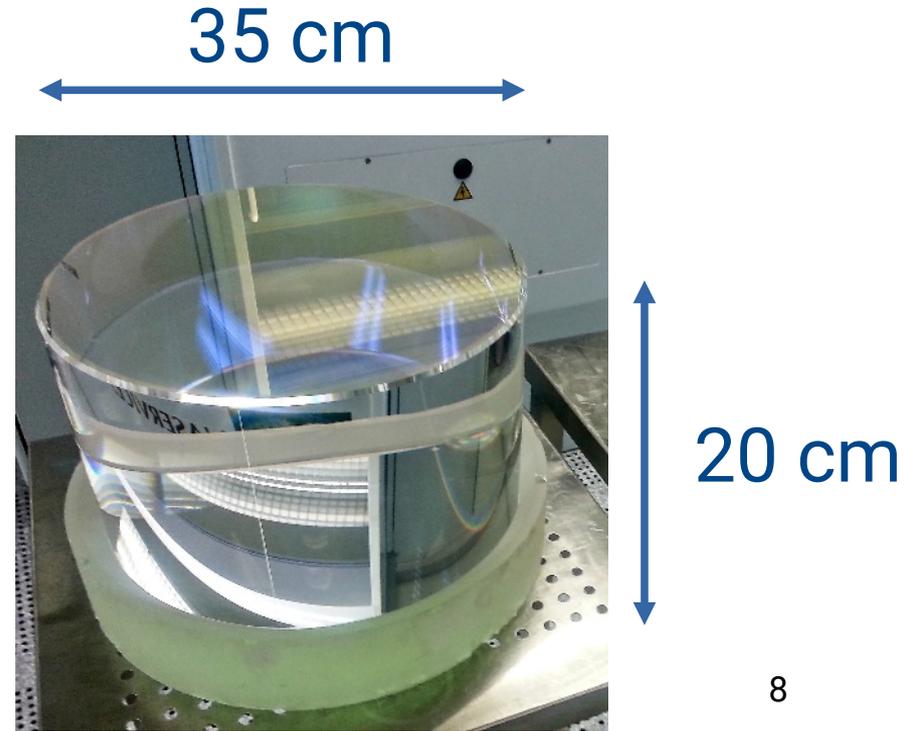
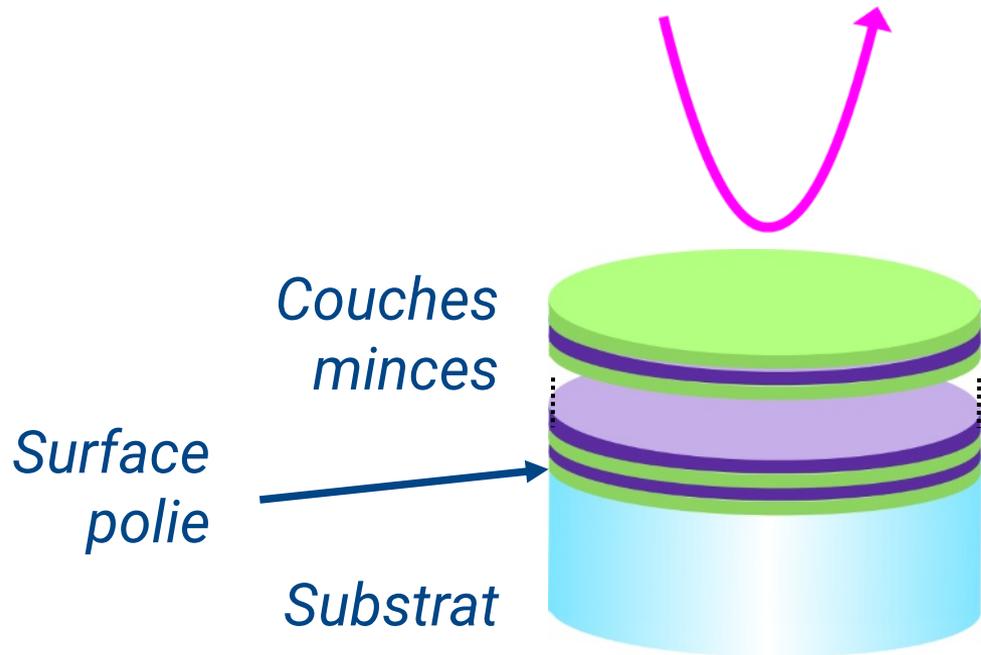


La suite



Définition d'un miroir

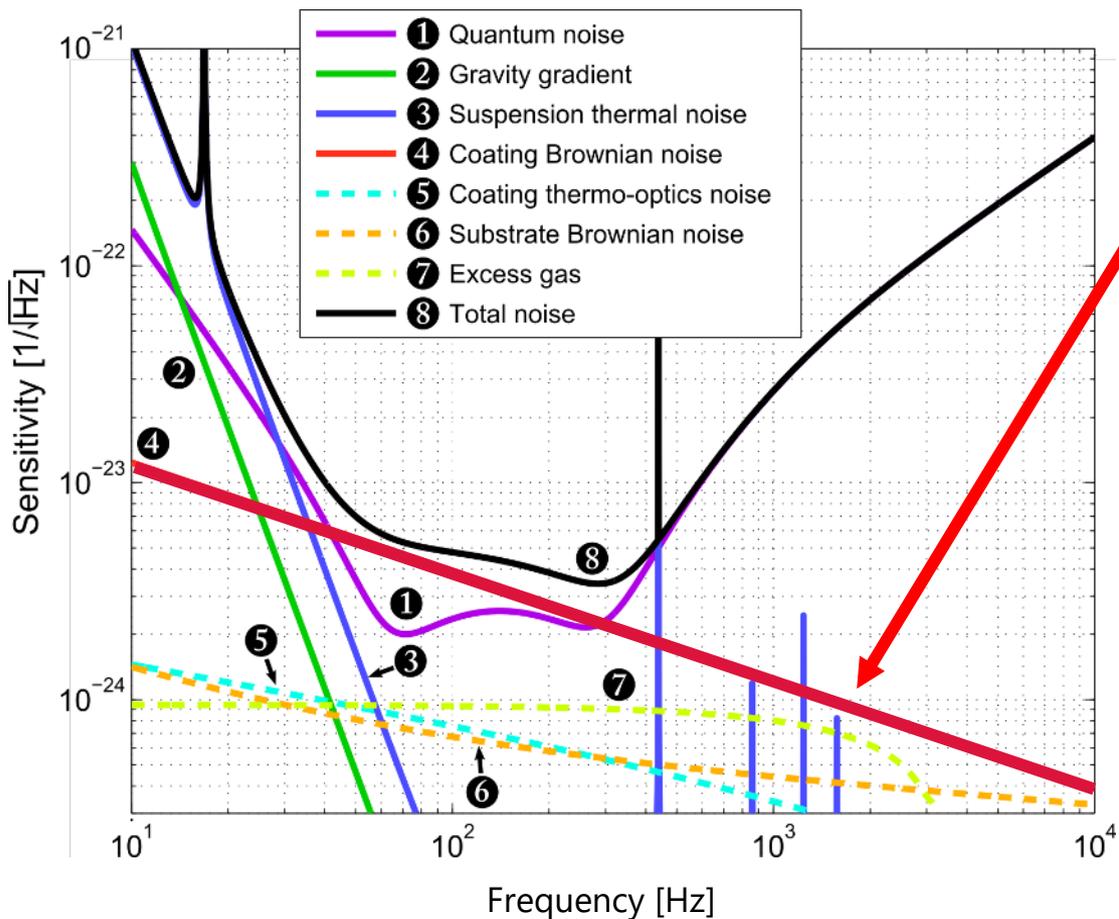
Miroir (n.m.): Verre poli et métallisé qui réfléchit les rayons lumineux.



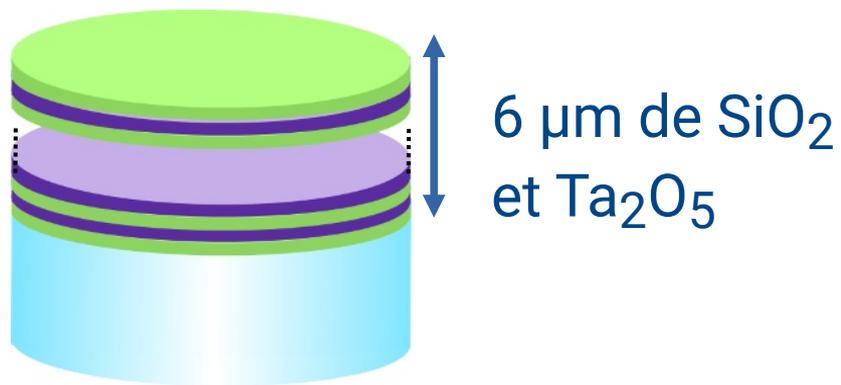
Chapitre I

Nouveaux miroirs pour O5 (LIGO/Virgo)

Comment gagner en sensibilité ?



Un levier: réduire le bruit thermique des couches minces



Bruits théoriques limitant la sensibilité

Le niveau du bruit thermique est proportionnel à :

Densité spectrale
du bruit thermique

S_{CTN}
Le plus bas le meilleur

Épaisseur
des couches

Angle des
pertes mécaniques

\propto

T

Température

$\frac{d\phi}{w^2}$

Taille du faisceau
sur le miroir

La stratégie

$$S_{\text{CTN}} \propto T \frac{d\phi}{w^2}$$

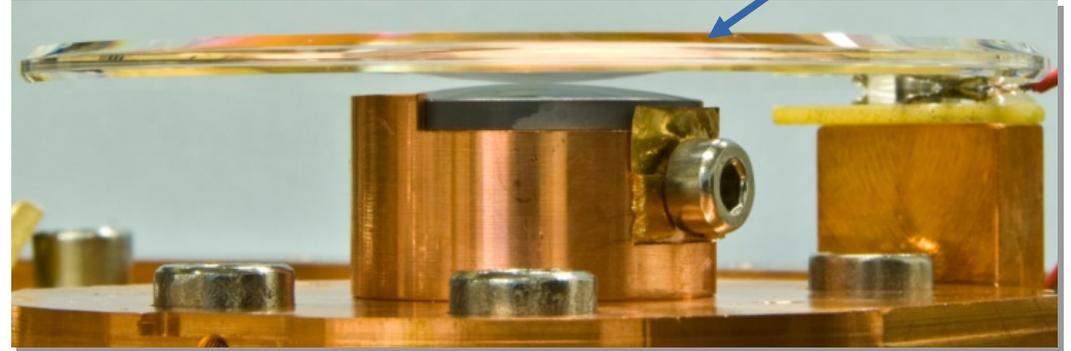
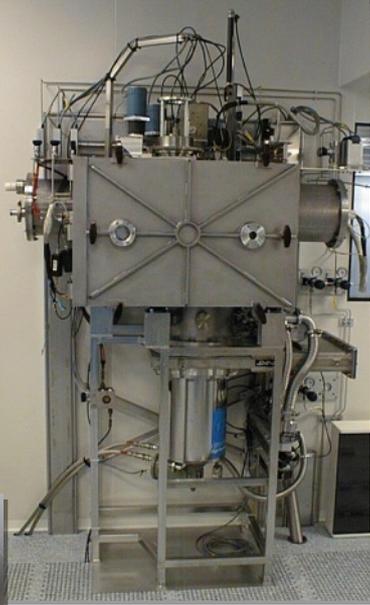
Aller à basses
températures
(KAGRA et prochaine
génération de détecteurs)

Réduire les pertes
mécaniques
ALIGO+, AdVirgo+

Augmente la taille
du miroir
AdVirgo+

La synthèse de nouveaux matériaux et caractérisation

wafer avec
dépôt



Caractérisation mécanique



*Utilisation de 3
machines
de dépôt*



Caractérisation optique

Remplacer le tantale par :

Matériau	ϕ	indice de réfraction	Absorption	Diffusion
Nb ₂ O ₅	✗	✓	✓	✓
Ta ₂ O ₅ -ZrO ₂	✓	✓	✓	✗
SiC	✗	✓	✗	✗
SiNx	✓	✓	✗	✓

*Recette :
Paramètres source
+ flux de gas
+ recuit*

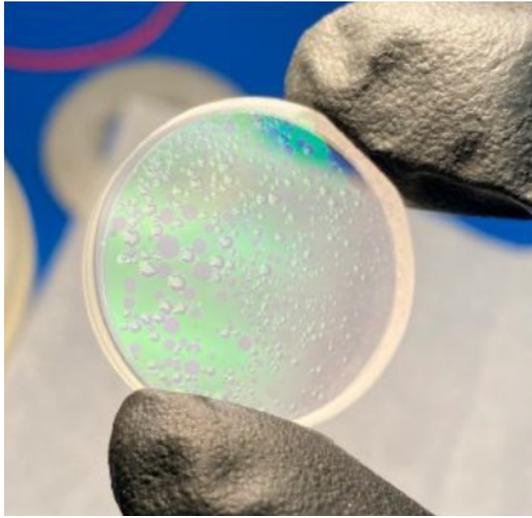
Si₃N₄ matériau le plus prometteur, à optimiser

Prochains tests : GaNx, HfO₂-Ta₂O₅

L'implémentation dans la grande machine pour O5

Le matériau sélectionné est le Ti-GeO₂ ($\phi \sim 10^{-4}$) pour les nouveaux miroirs par la collaboration LIGO-Virgo.

Validé sur des petits échantillons, pertes mécaniques ok mais absorption trop haute, problème de bulles.

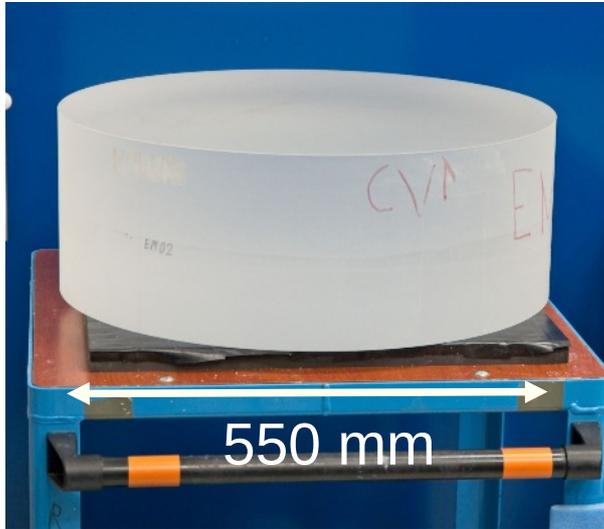


*Bulles après recuit
à 600 °C*

L'implémentation dans la grande machine pour O5

Travaux pour les 10 prochains mois : tests monocouches, optimisation puis multicouches, travaux sur l'uniformité...

Traitement des miroirs : seconde moitié de 2023



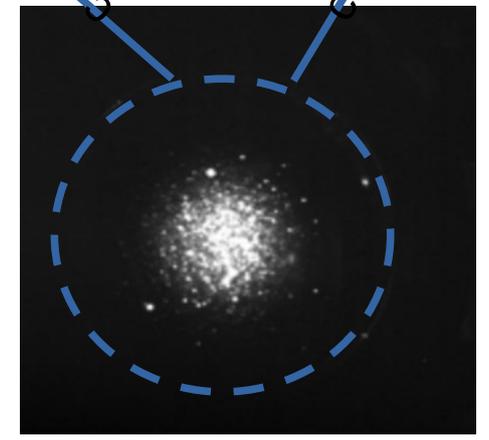
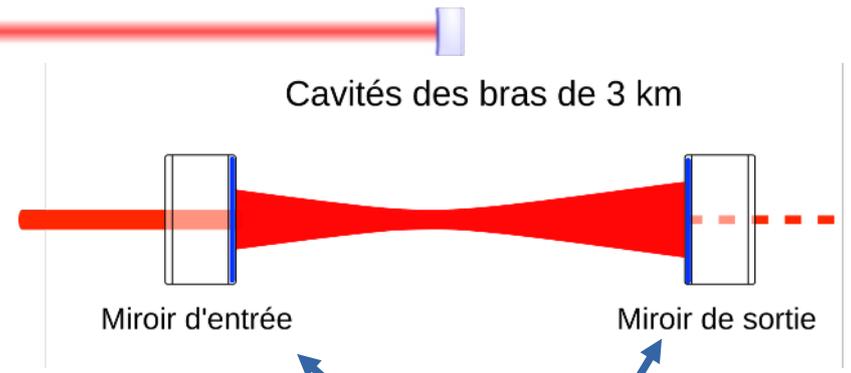
*Pendant ce temps
chez le polisseur...*

Recherche pour diminuer les pertes optiques

La lumière diffusée, principale source de perte optique dans l'interféromètre.

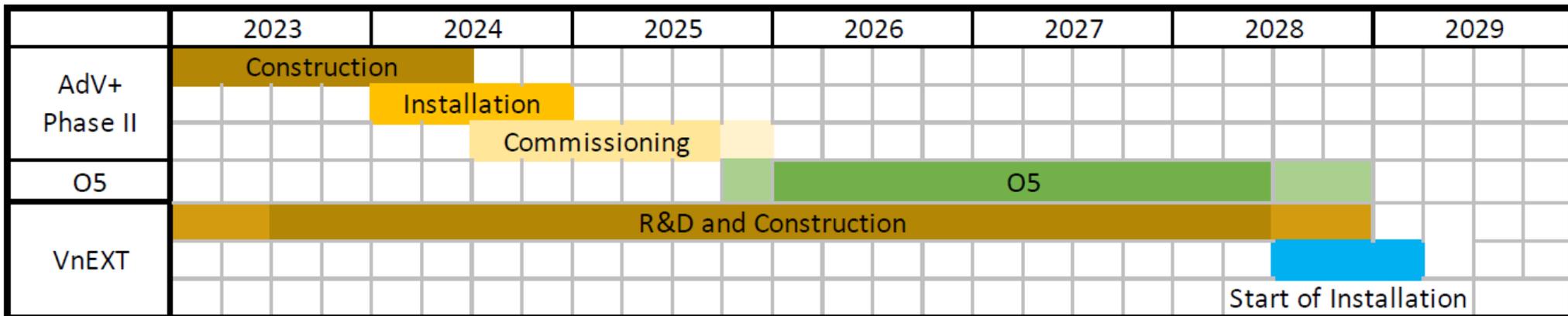
Présence de défaut ponctuel dans les couches minces.

Une thèse en cours pour comprendre la nature de ces défauts (Sihem S.)



*Vue du miroir illuminé
perte ~20 ppm / miroir*

Les miroirs pour après O5



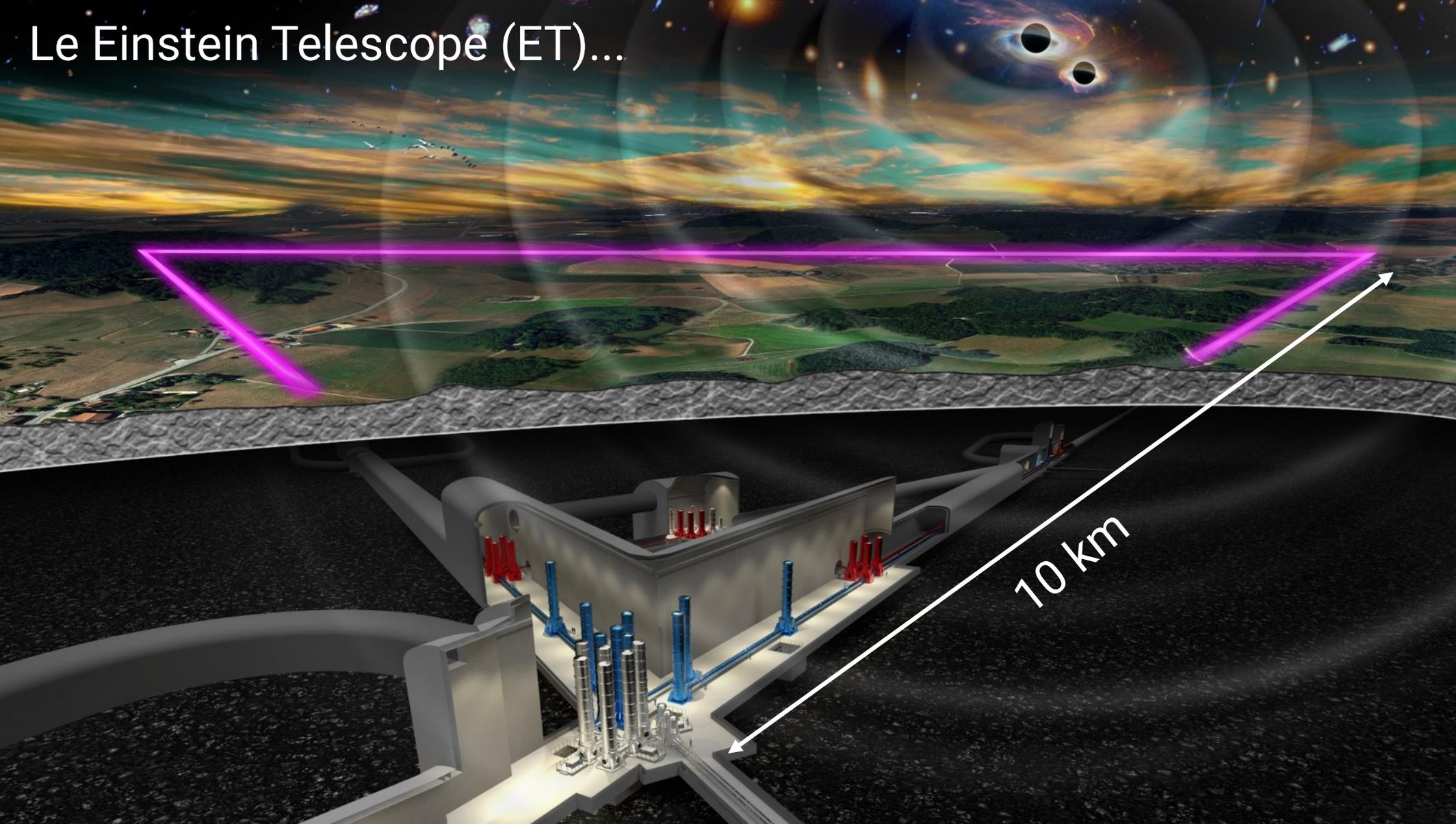
2035 → ET

Virgo_nEXT, la prochaine amélioration de Virgo, miroirs avec toujours un bruit plus bas et des pertes optiques plus faibles.

Chapitre II

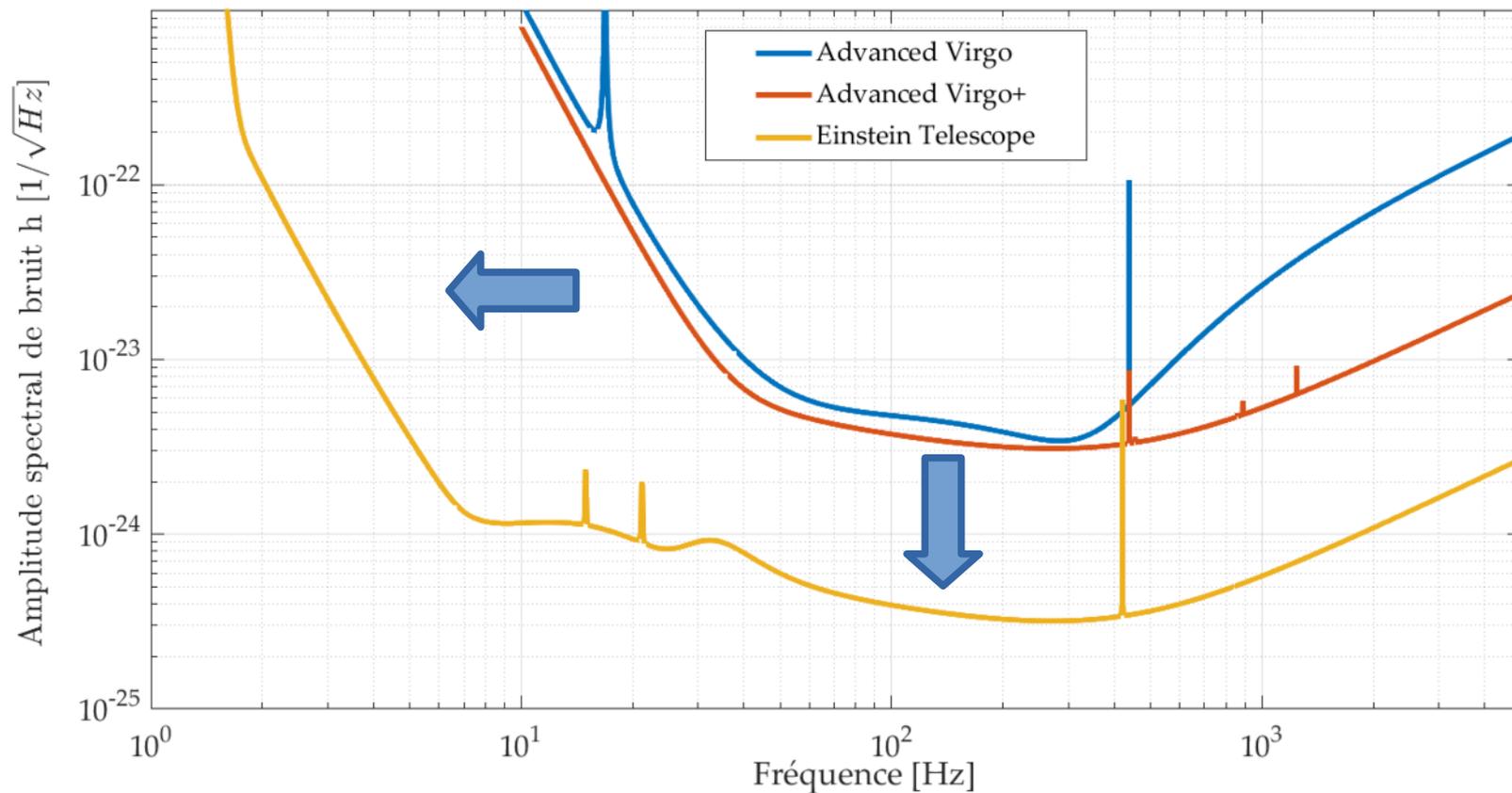
Nouveaux miroirs pour nouveaux détecteurs

Le Einstein Telescope (ET)...



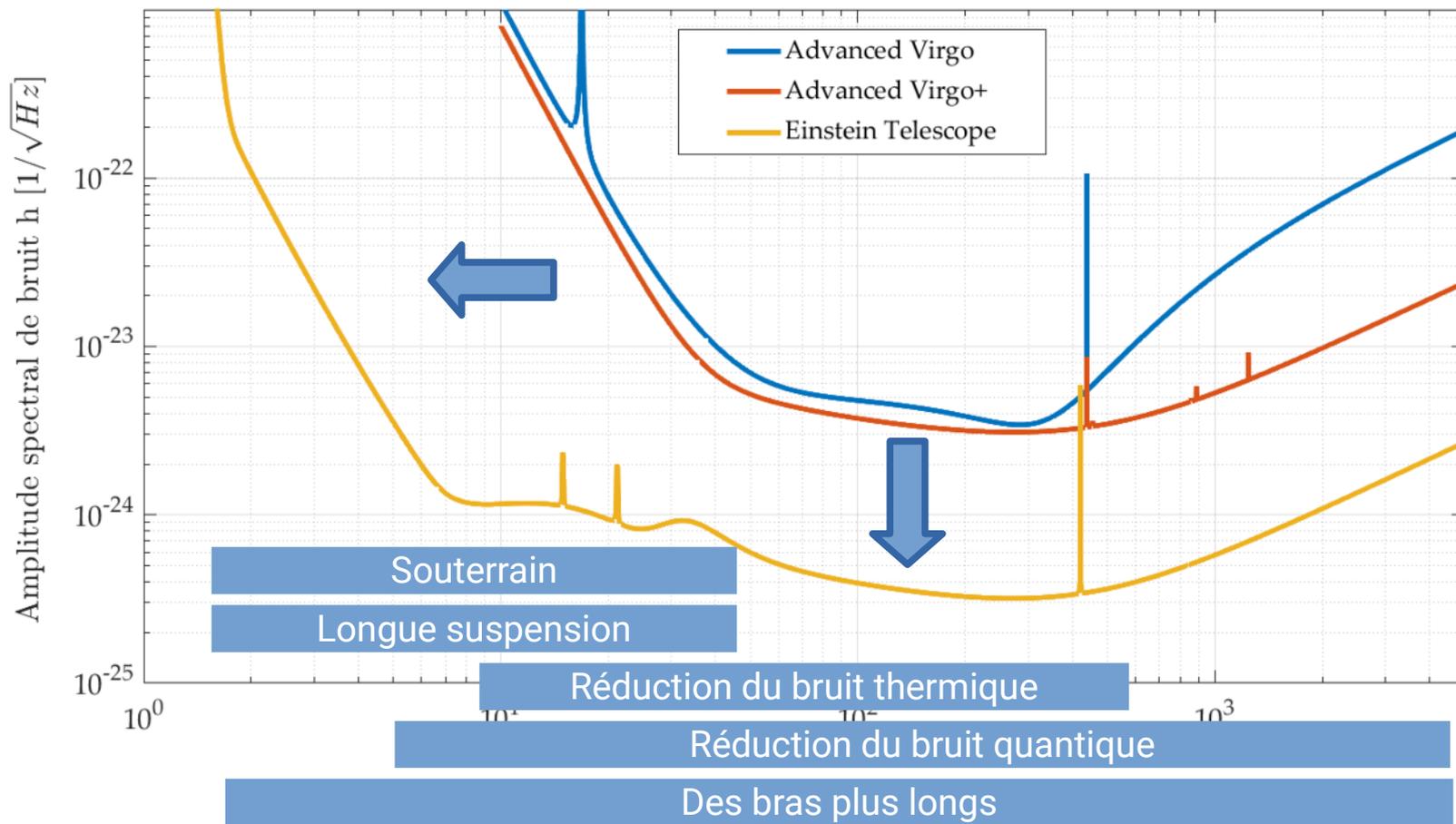
Le but de ET : être 10 fois plus sensible

comparé à la génération précédente



Le but de ET : être 10 fois plus sensible

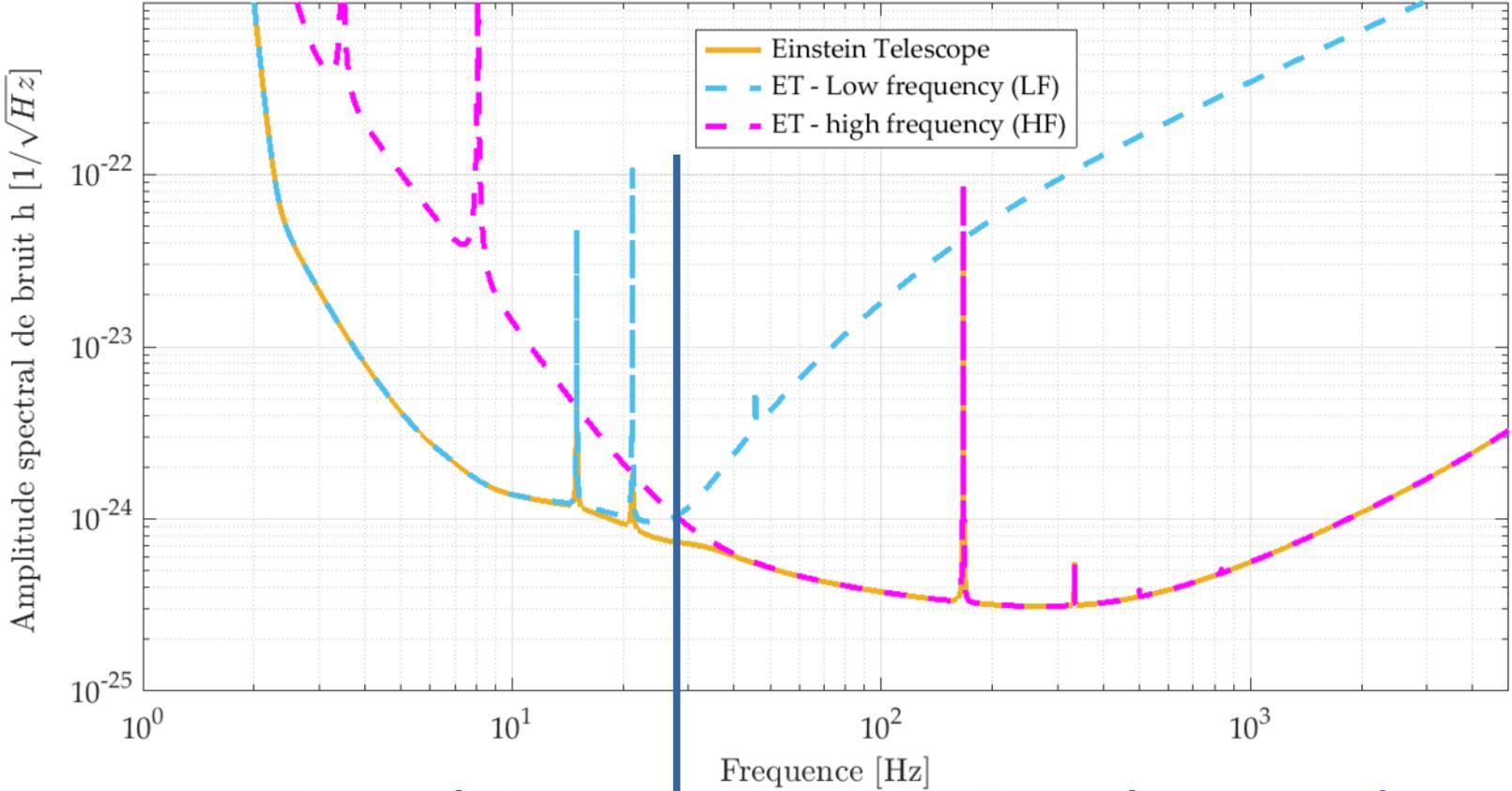
comparé à la génération précédente



Une courbe de sensibilité composite



1 détecteur = 2 interféromètres



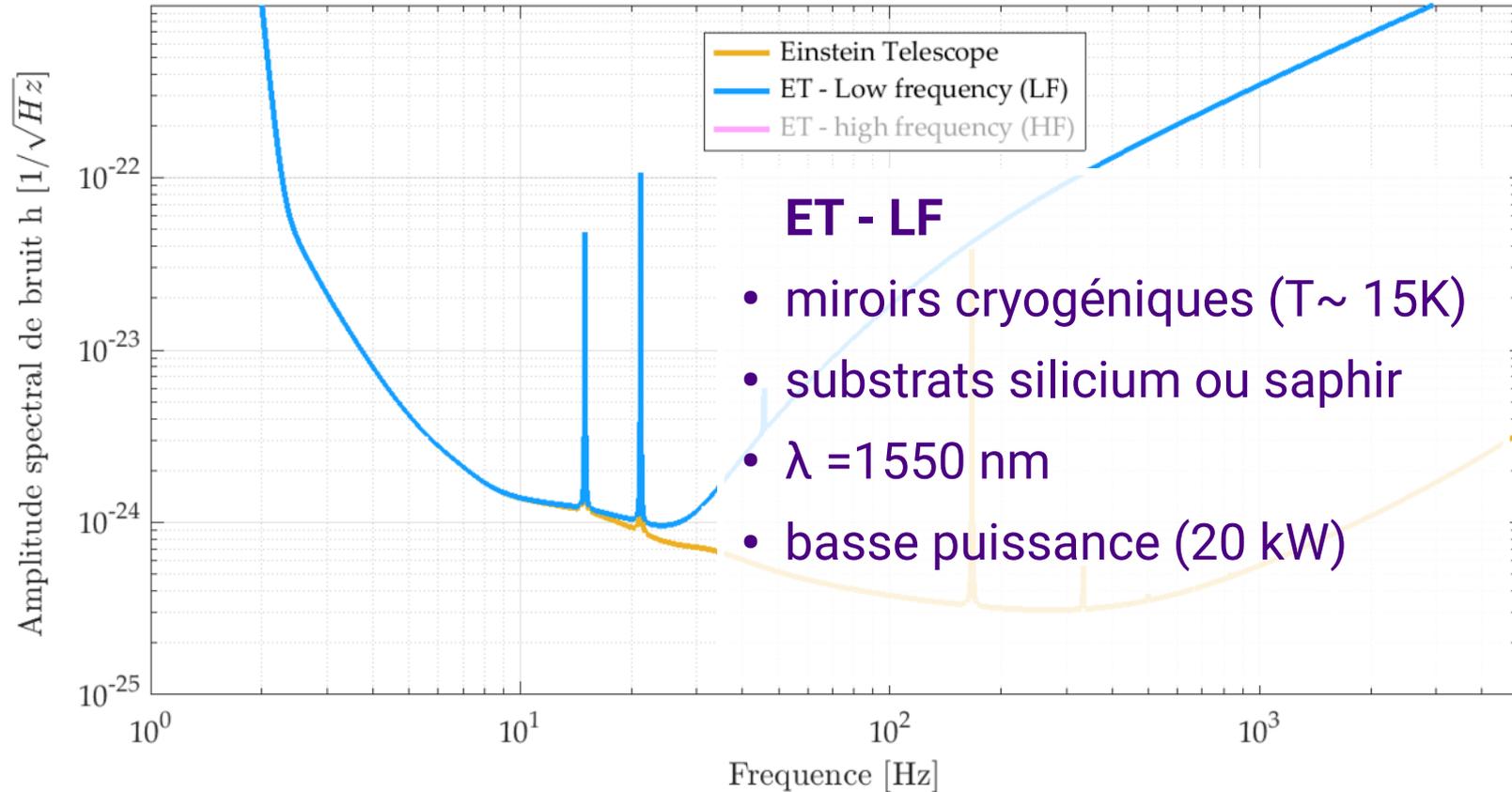
La stratégie du xylophone

Cryogénie

Température ambiante

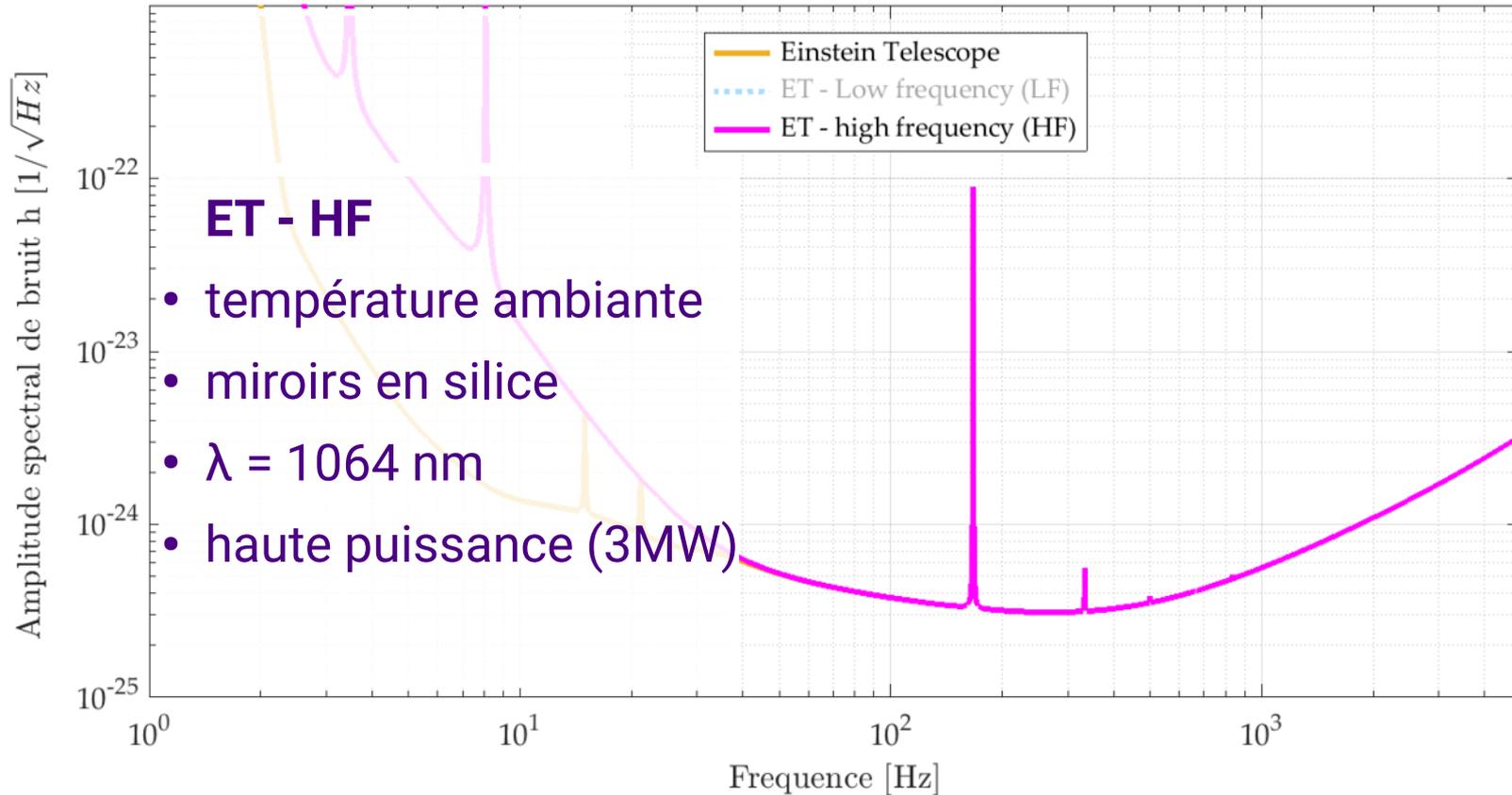
1 détecteur = 2 interféromètres

La stratégie du xylophone



1 détecteur = 2 interféromètres

comparé à la génération précédente

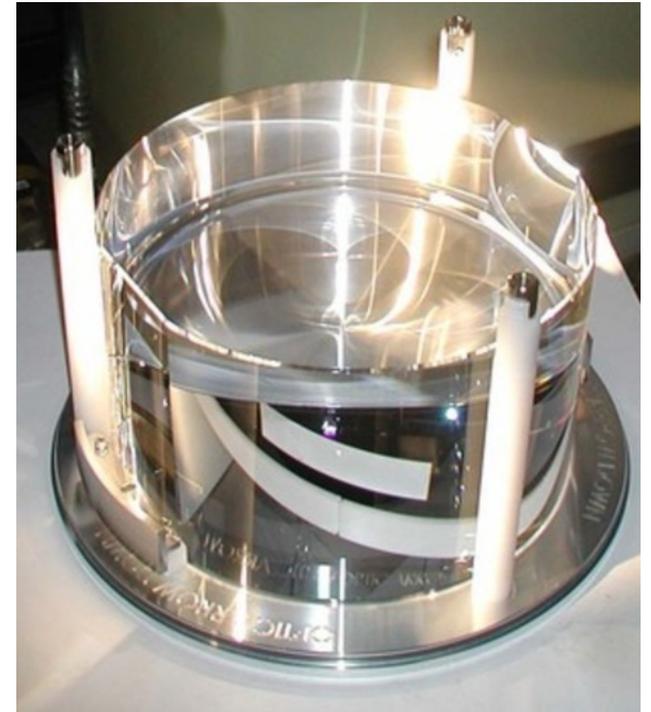


Pour ET-HF : on garde la silice

Le matériau de choix pour les interféromètres présents et futurs à température ambiante

Un choix parfaitement justifié :

- propriétés optiques exceptionnelles
- disponible en grande taille
- polissage et dépôt maîtrisés



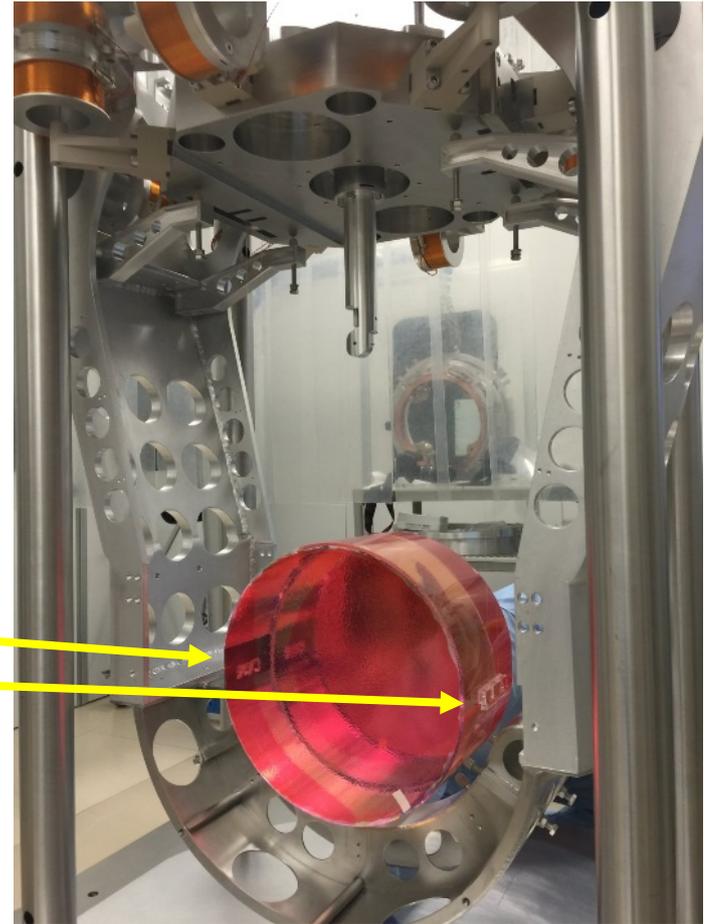
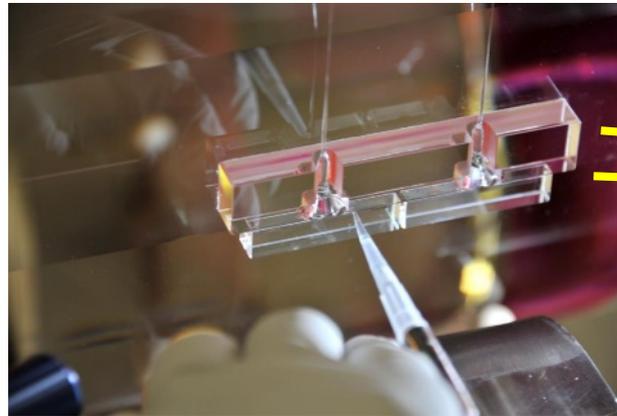
Pour ET-HF : on garde la silice

Des particularités particulièrement utiles pour les détecteurs :

- très faible bruit thermique
- possibilité de suspension monolithique



Réduit le bruit de déplacement du miroir

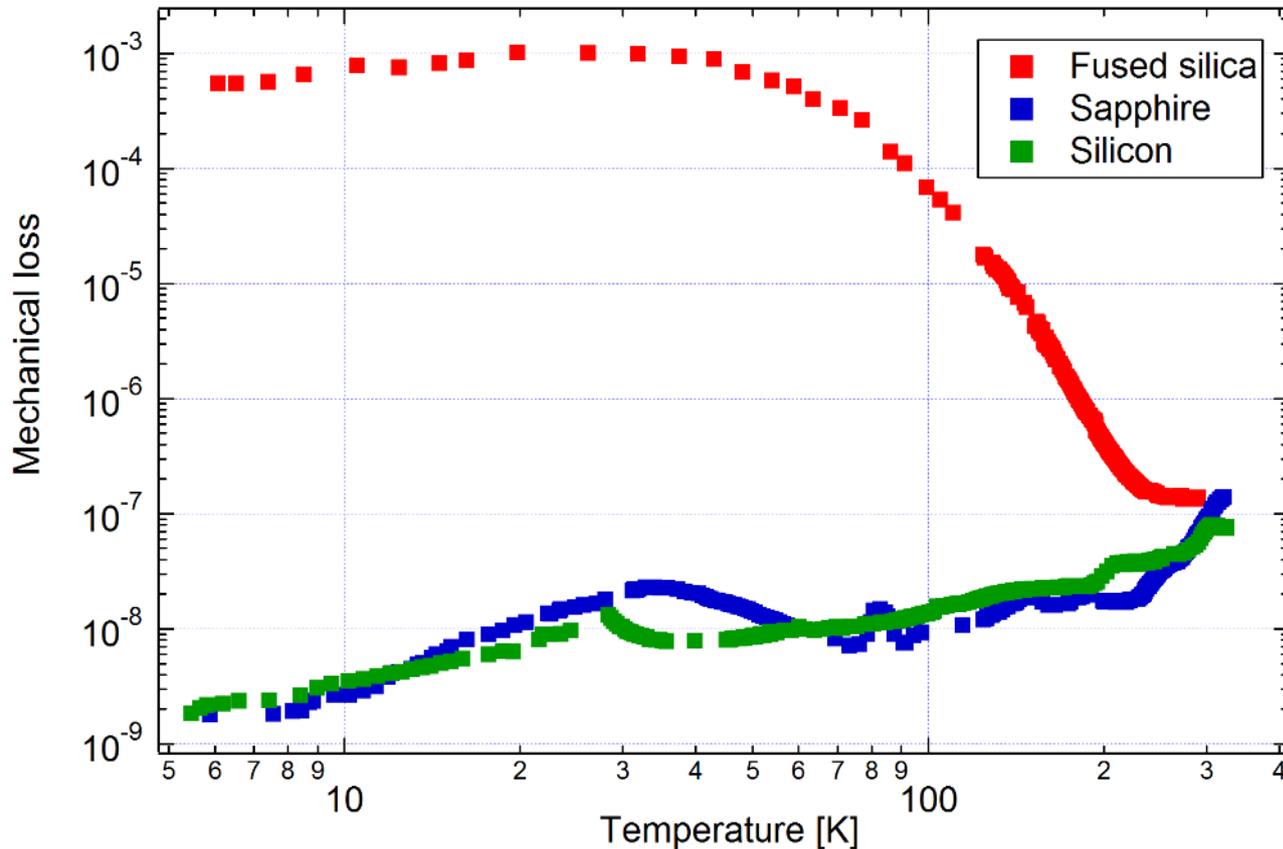


Et la silice à basse température ?



Le bruit thermique (Brownien) se dégrade aux basses températures

Bruit



Donc, on cherche :

Des gros blocs cristallins, diamètre > 450 mm, > 200 kg
très peu absorbant dans l'infrarouge.

Le saphir et le silicium sont 2 candidats
mais aucun fournisseur ne répond à nos
spécifications.



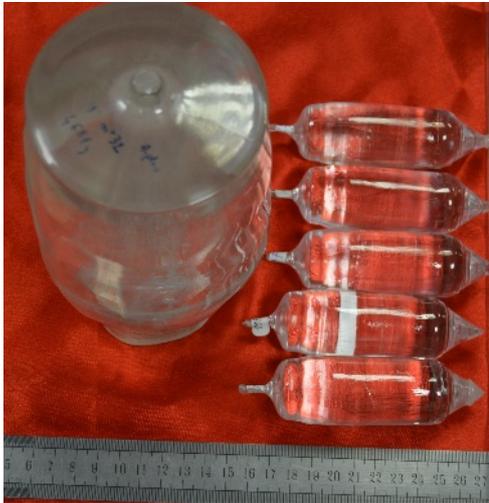
Le saphir a de meilleures propriétés (transparence à 1064 nm, plus dense, conductivité thermique plus élevée,...)

Des expertises locales pour le développements du saphir

Un spécialiste de la croisse cristalline à l'iLM :
Kheirreddine Lebbou



Avec des années d'expérience sur le saphir avec
la production de substrats et de fibres :



Des expertises locales pour le développements du saphir

Grande expérience au LMA sur les substrats de demain

Rayleigh scattering, absorption, and birefringence of large-size bulk single-crystal sapphire

Zewu Yan, Li Ju, Chunong Zhao, Slawomir Gras, David G. Blair, Masao Tokunari, Kazuaki Kuroda, Jean-Marie Mackowski, and Alban Remillieux
Applied optics 2005

Institute of Physics Publishing
doi:10.1088/1742-6596/32/1/062

Journal of Physics: Conference Series **32** (2006) 404–412
Sixth Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves

Superiority of sapphire over silicon test masses regarding thermal noise and thermal lensing for laser interferometers with transmissive optics

Jérôme Degallaix† Chunong Zhao† Li Ju† and David Blair †

June 15, 2013 / Vol. 38, No. 12 / OPTICS LETTERS

Bulk optical absorption of high resistivity silicon at 1550 nm

Jerome Degallaix,* Raffaele Flaminio, Danièle Forest, Massimo Granata, Christophe Michel, Laurent Pinard, Teddy Bertrand, and Gianpietro Cagnoli

IOP Publishing

Class. Quantum Grav. 31 (2014) 185010 (13pp)

Classical and Quantum Gravity

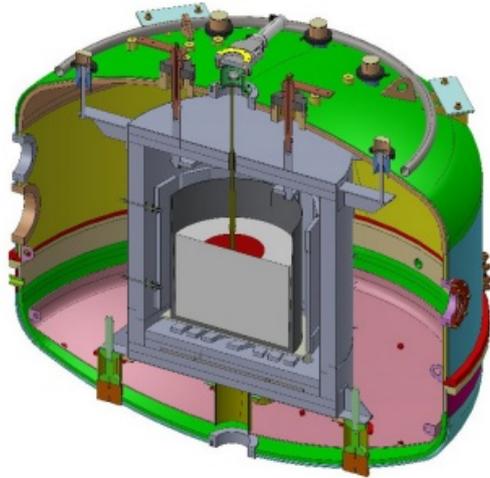
doi:10.1088/0264-9381/31/18/185010

Measurement of the optical absorption of bulk silicon at cryogenic temperature and the implication for the Einstein Telescope

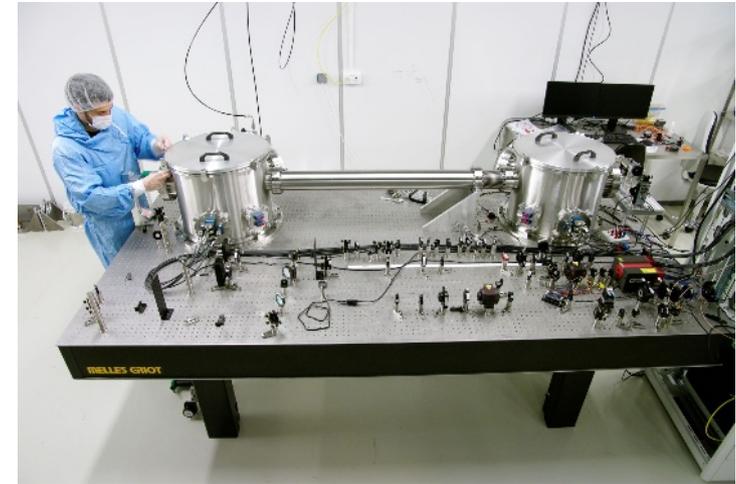
J Degallaix¹, J Komma², D Forest¹, G Hofmann², M Granata¹, D Heinert², C Schwarz², R Nawrodt², L Pinard¹, C Michel¹, R Flaminio¹ and G Cagnoli¹

Projet OSAG : Optiques en Saphir pour l'Astronomie Gravitationnelle

- four unique de croissance cristalline très grande taille
- démonstration des faibles pertes optiques du saphir



*four pour fondre
500 kg d'alumine*



*Banc de caractérisation optique
des pertes des miroirs*

2 financement régionaux

2020-2025

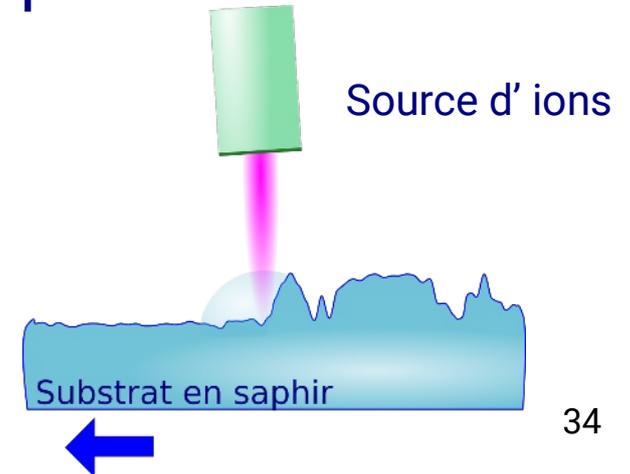
Projet DOSFaP : étude des pertes optiques et de la biréfringence du saphir sur petites dimensions

- recrutement d'un doctorant iLM - LMA
- mesure des pertes en fonction des conditions de tirage

Projet UIA : étude du polissage ionique sur saphir

2019-2022

- source d'ions Polygon Physics
- banc de démonstration au LMA



Conclusion

Miroir = substrat + polissage + dépôt



*Miroir de KAGRA
avec le dépôt du LMA*

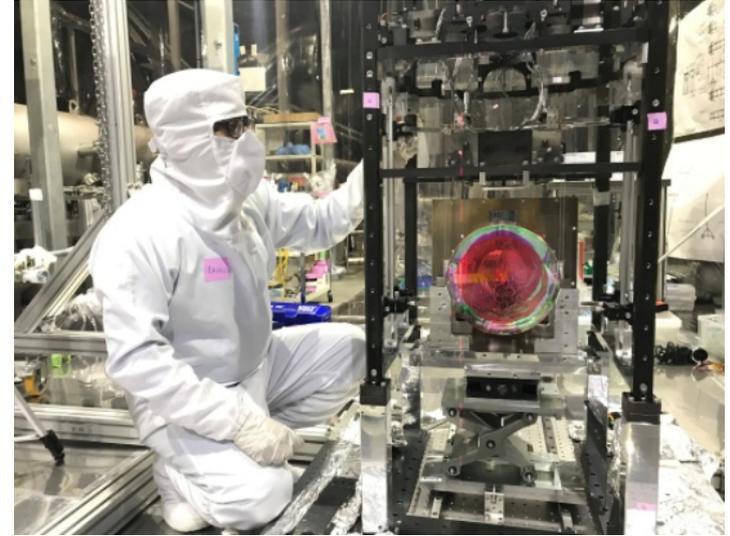
Conclusion

Miroir = substrat + polissage + dépôt



R&D clé sur le campus pour améliorer la sensibilité des détecteurs actuels et futurs.

Opportunité unique pour fournir une contribution majeure avec une solution de miroir complète et une partie de la suspension.



*Miroir de KAGRA
avec le dépôt du LMA*