

Défis technologiques : R&D et instrumentation pour ET

Christelle Buy

christelle.buy@l2it.in2p3.fr



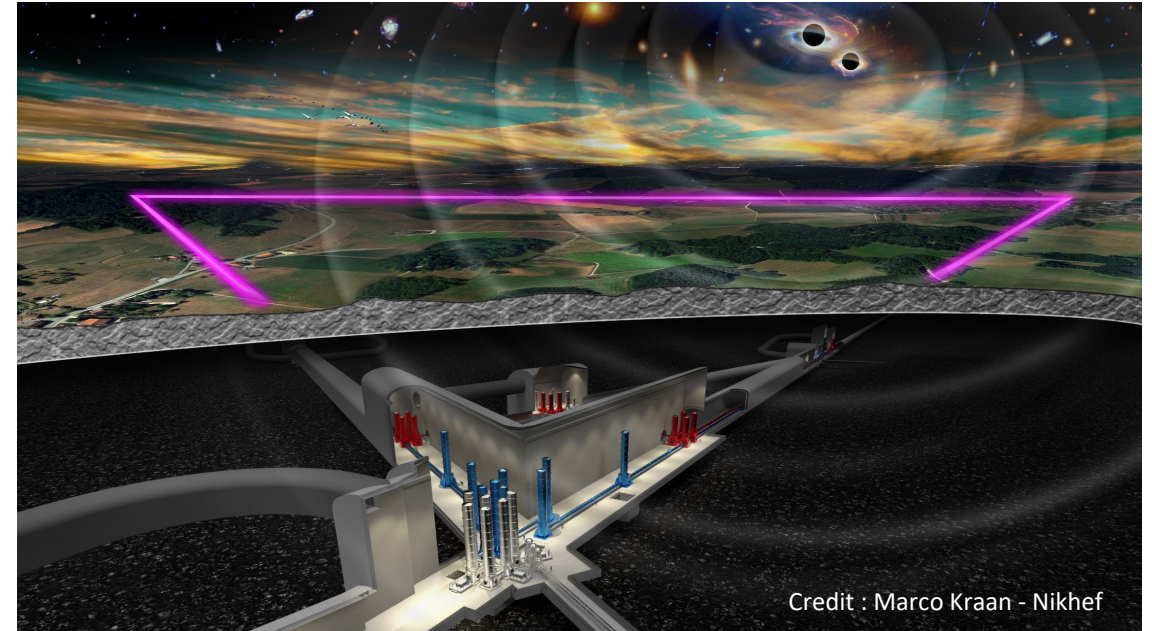
Principales améliorations par rapport aux détecteurs actuels :

- Détecteur sous-terrain : pour éviter le bruit sismique de surface (250 m de profondeur)
- Trois interféromètres avec des bras de 10 km de long (3 fois plus longs que Virgo - 6 de ces ITF)
- Miroirs cryogéniques pour réduire le bruit thermique
- Technologie quantique (squeezing) pour réduire le bruit quantique
- Amélioration des coatings pour réduire le bruit thermique

➔ Sensibilité 10 fois meilleure que les détecteurs actuels



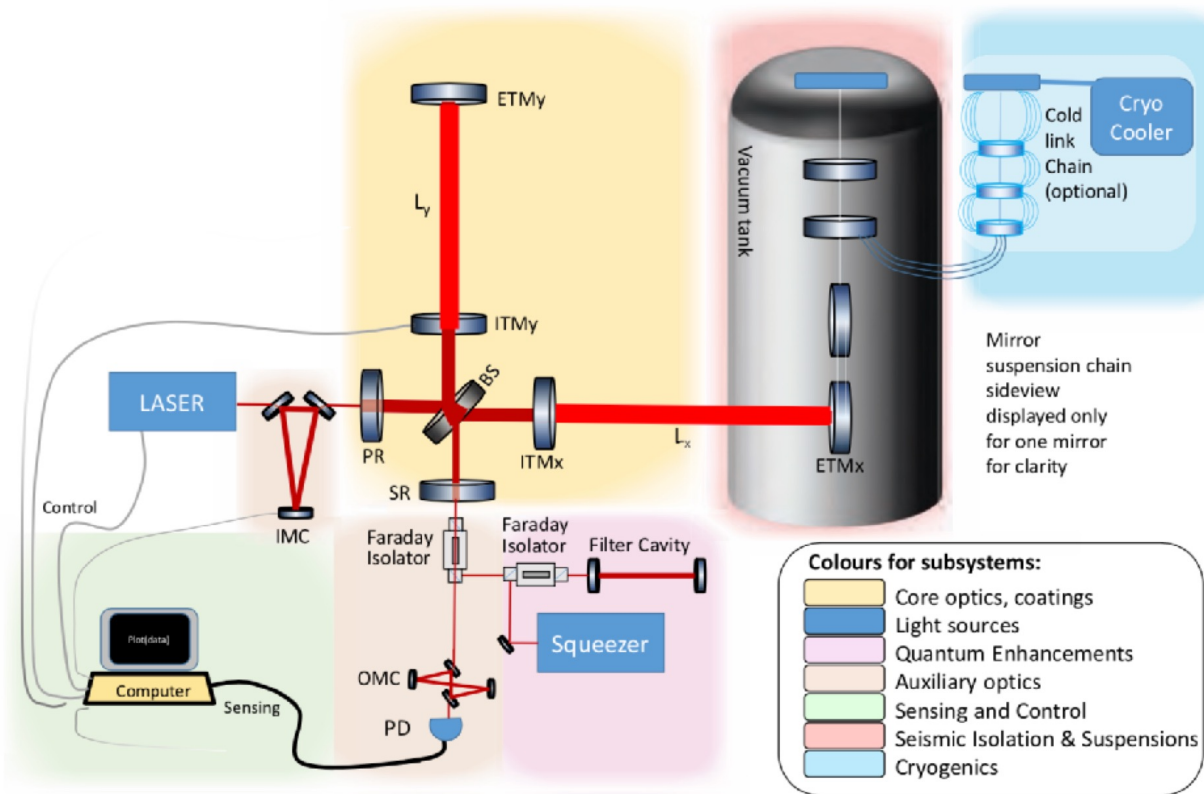
Nombreux challenges technologiques afin d'atteindre ces objectifs



Credit : Marco Kraan - Nikhef

Une onde gravitationnelle induit une variation de distance entre les bras $\sim 10^{-20}$ m





https://gwic.ligo.org/3Gsubcomm/documents/GWIC_3G_R_D_Subcommittee_report_July_2019.pdf

Parameter	ET-D-HF	Et-D-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 K
Mirror material	fused silica	silicon
Mirror diameter/thickness	62 cm / 30 cm	min 45 cm/T
Mirror mass	200 kg	211 kg
Laser wavelength	1064 nm	1550 nm
SR-phase	tuend (0.0)	detued (0.6)
SR transmittance	10%	20%
Quantum noise suppression	freq. dep. squeez.	freq. dep. squeez.
Filter cavities	1 × 10 km	2 × 10 km
Squeezing level	10 dB (effective)	10 dB (effective)
Beam shape	LG ₃ 3	TME ₀ 0
Beam radius	7.25 cm	9 cm
Scatter loss per surface	37.5 ppm	37.5 ppm
Seismic isolation	SA, 8 m tall	mod SA, 17 m tall
Sesmic (for $f > 1$ Hz)	$5 \times 10^{-10}/m/f^2$	$5 \times 10^{-10}/m/f^2$
Gravity gradient subtraction	none	none

Interféromètres multiples en « Xylophone » -> développements technologiques parallèles

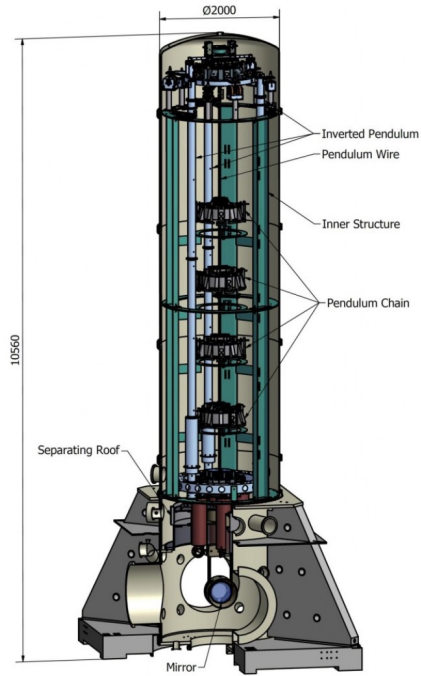
ET – High Frequency (1064 nm)

High power laser	Evolved laser technology
Large test masses	} Evolved technology in optics
New coatings	
Thermal compensation	Highly innovative adaptative optics
Frequency dependent squeezing	High quality opto-mechanics and new controls

ET – Low Frequency (1550 nm)

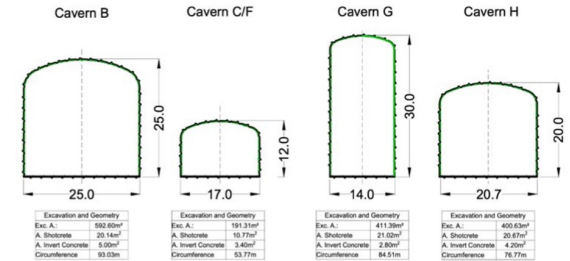
Underground	Challenging engineering - infrastructure
Cryogenics	New technology in cryo-cooling
Silicon or Sapphire test masses	} New optics technology
Large test masses	
New coatings	
New laser wavelength	New laser technology
Seismic suspensions	High precision mechanics and low noise controls
Frequency dependent squeezing	High quality opto-mechanics and new controls

Diminuer le bruit sismique et le bruit newtonien



Challenges pour ET:

- 30 km de tunnels sous-terrains (250 m)
- Construction d'immenses cavernes (30 m de hauteur)
- Etudes et explorations géologiques
- Construction de bâtiments de surface, de routes, etc



LHC underground caverns



Bruit sismique: super-atténuateurs pour réduire de 10^{16} le bruit du détecteur Virgo

Bruit newtonien: les séismes provoquent des changements de densité dans le sol et secouent l'environnement du miroir -> fluctuations qui provoquent un changement de la force gravitationnelle agissant sur le miroir

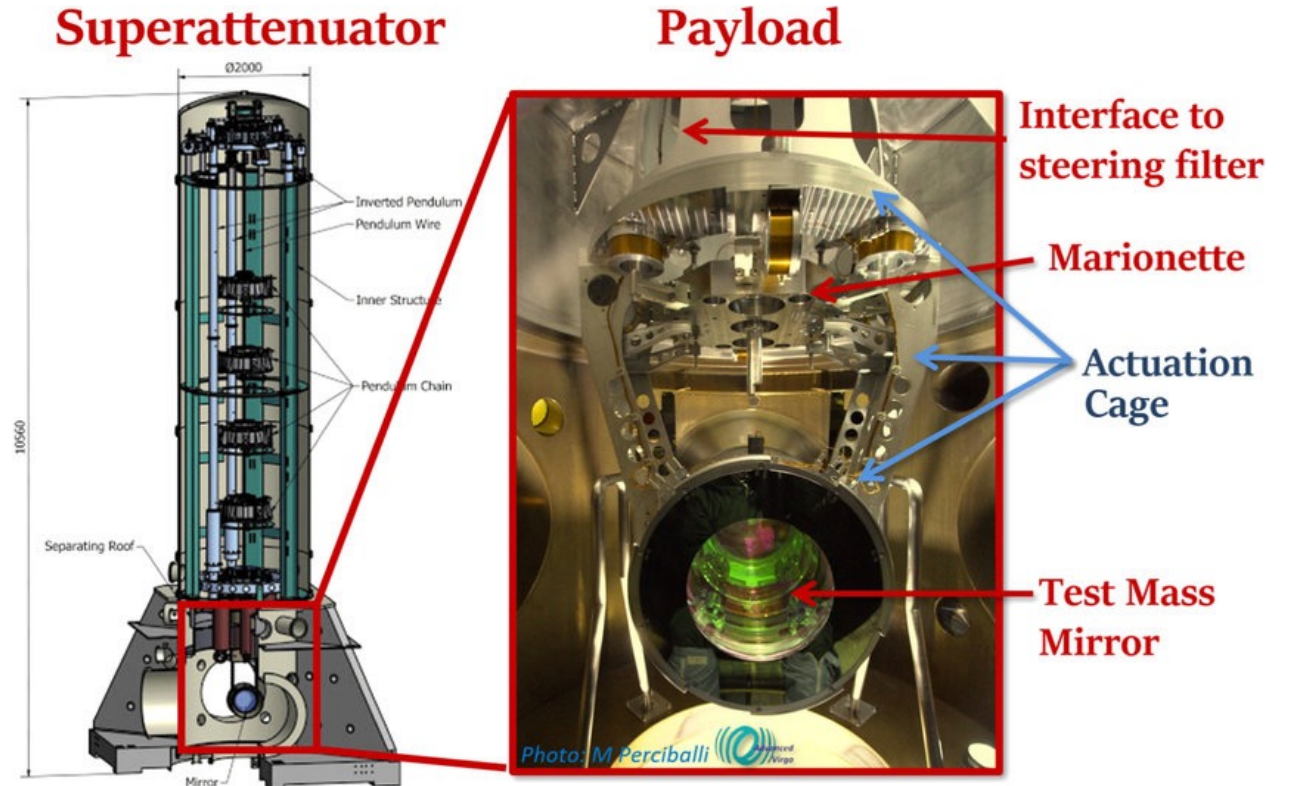
Einstein Telescope
Cavern B: 25 m x 22 m x 38 m (about 21k m³)

Diminuer le bruit sismique et le bruit newtonien

Sources de vibrations : pompes, climatisation, sources sonores, dispositifs de refroidissement, ondes microsismiques, activité humaine, tremblements de terre.

Challenges pour ET:

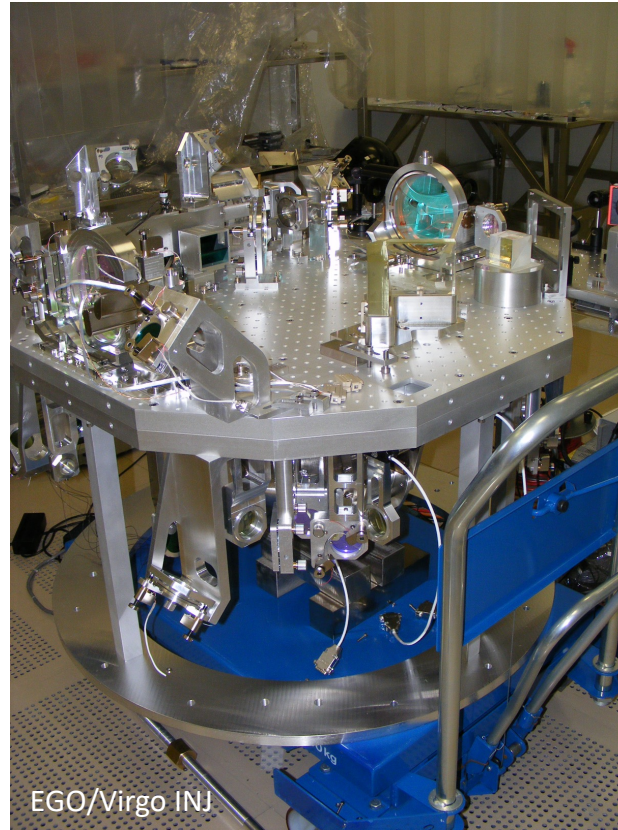
- Systèmes complexes sur mesure offrant une suppression de 10 ordres de grandeur à 10 Hz
- Etage de suspension final monolithique, avec fibres de verre ou de silicium
- SA de 17 m
- Très grandes cavernes (jusqu'à 30 m de hauteur)
- Capteurs inertiels sensibles pour améliorer le contrôle des vibrations à basse fréquence



Diminuer le bruit acoustique et garantir un niveau de propreté

Challenges pour ET:

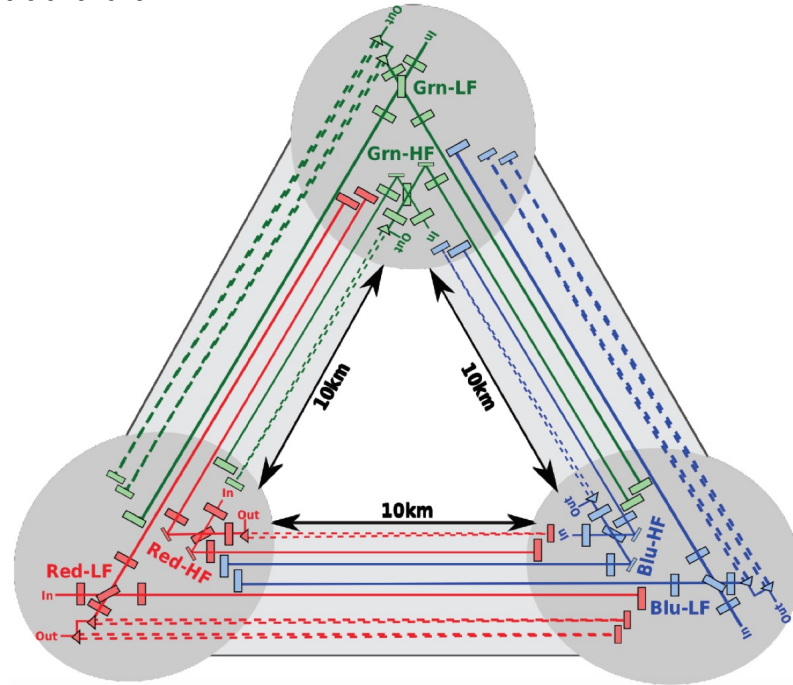
- ET pathfinder va nécessiter 6000 m2 de salle blanche – il en faudra bien davantage pour ET
- Faible bruit acoustique
- Très faible bruit de ventilation et de climatisation
- Très faible contamination particulaire



Diminuer le bruit thermique des suspensions, le bruit acoustique, le bruit environnemental, réduire les fluctuations de densité des gaz résiduels

Ultra-vide :

- Diminuer le bruit thermique des suspensions en réduisant les pertes par frottement dans la suspension du miroir
- Réduire le bruit de phase et le mouvement des miroirs dû aux fluctuations de densité des gaz résiduels
- Isoler les miroirs du bruit acoustique et du bruit environnemental/sismique
- Préserver la propreté des optiques



Virgo vacuum system

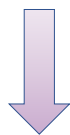
Challenges pour ET:

- Environ 120-130 km de tubes à vide de ~1m de diamètre
- 120 000 m³ de vide (2000 m³ LHC au CERN pour comparaison) - ~100 tours à vide
- Pression attendue < 10⁻¹⁰ mbar
- Nombreux composants associés : pompes, capteurs, valves, etc

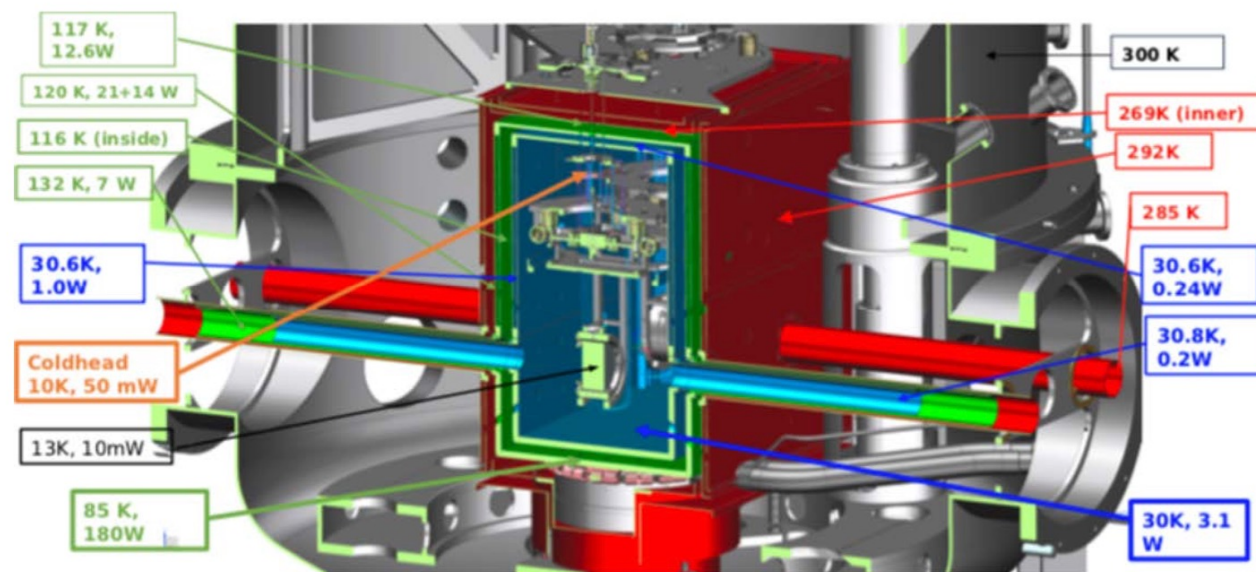
Réduire le bruit thermique des miroirs et des suspensions

Challenges pour ET:

- En raison des fluctuations thermiques, la position du miroir détectée par le faisceau laser n'est pas nécessairement une bonne représentation du centre de masse du miroir.
 - Pour réduire ce bruit -> miroirs cryogéniques
 - Les miroirs doivent être refroidis à ~15K et 123K sans introduire de bruit, c'est-à-dire que le refroidissement n'est possible que par de minces fils de suspension.
 - La suspension doit être refroidie pour réduire le bruit thermique dans les fibres qui provoquent le mouvement des miroirs.
- Il faut maintenir un bon vide dans le bras de l'ITF et autour des miroirs de fond



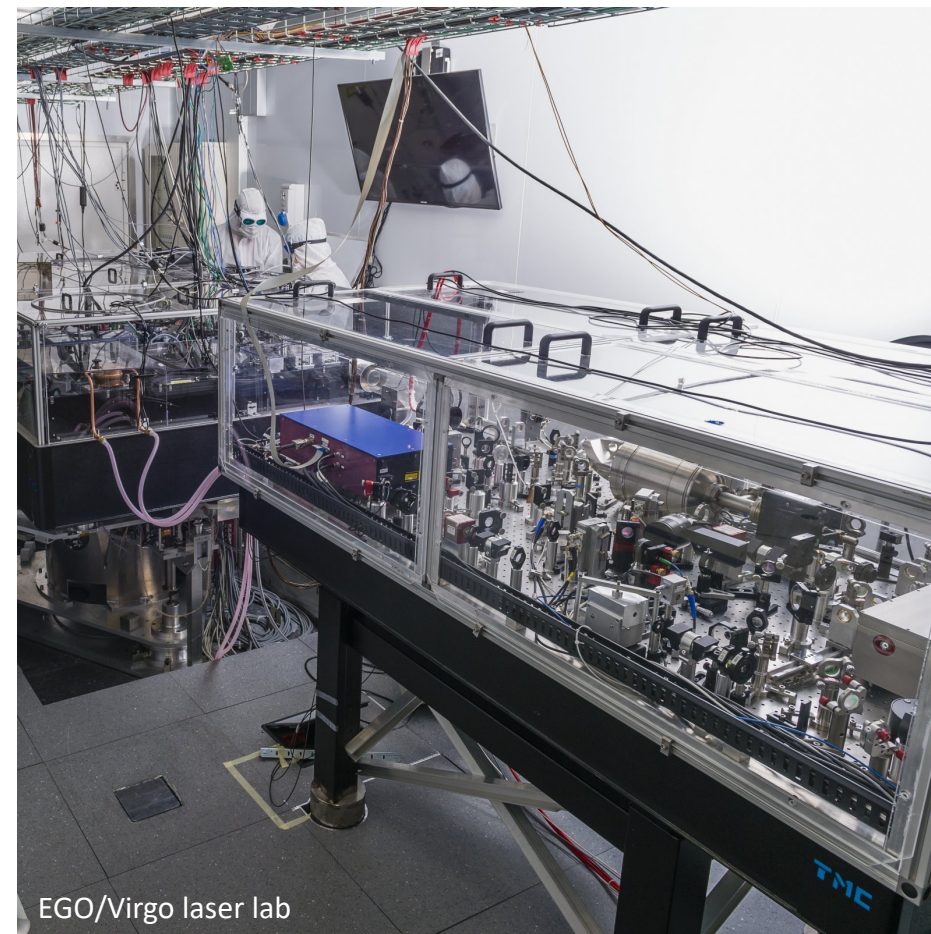
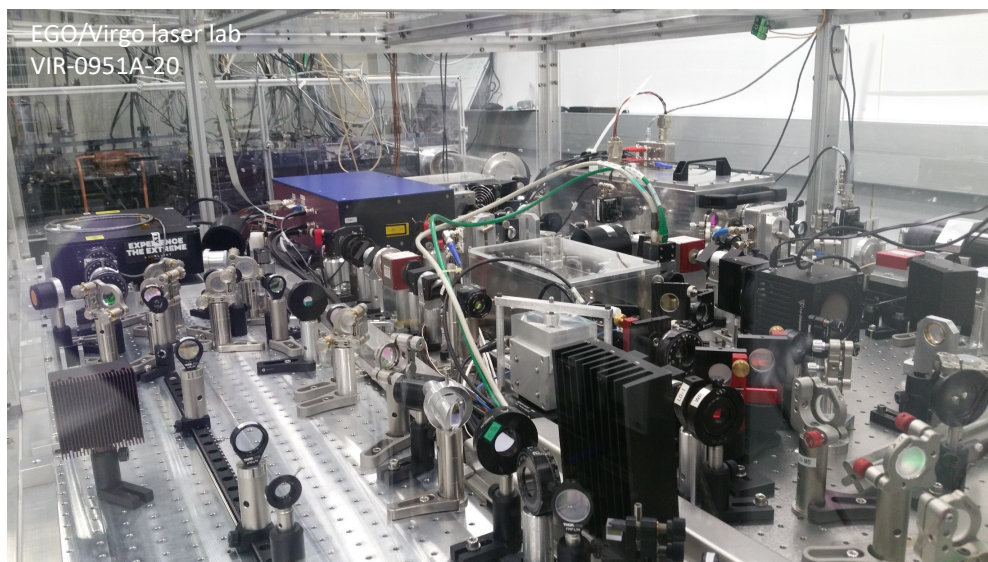
- Sans introduire de vibrations ($<10^{-18}$ m/sqrt(Hz))
- Sans geler l'eau sur la suspension monolithique et à la surface des miroirs
- Avec des écrans thermiques dotés d'ouvertures pour le faisceau laser et les leviers optiques



ETpathfinder cooling budget

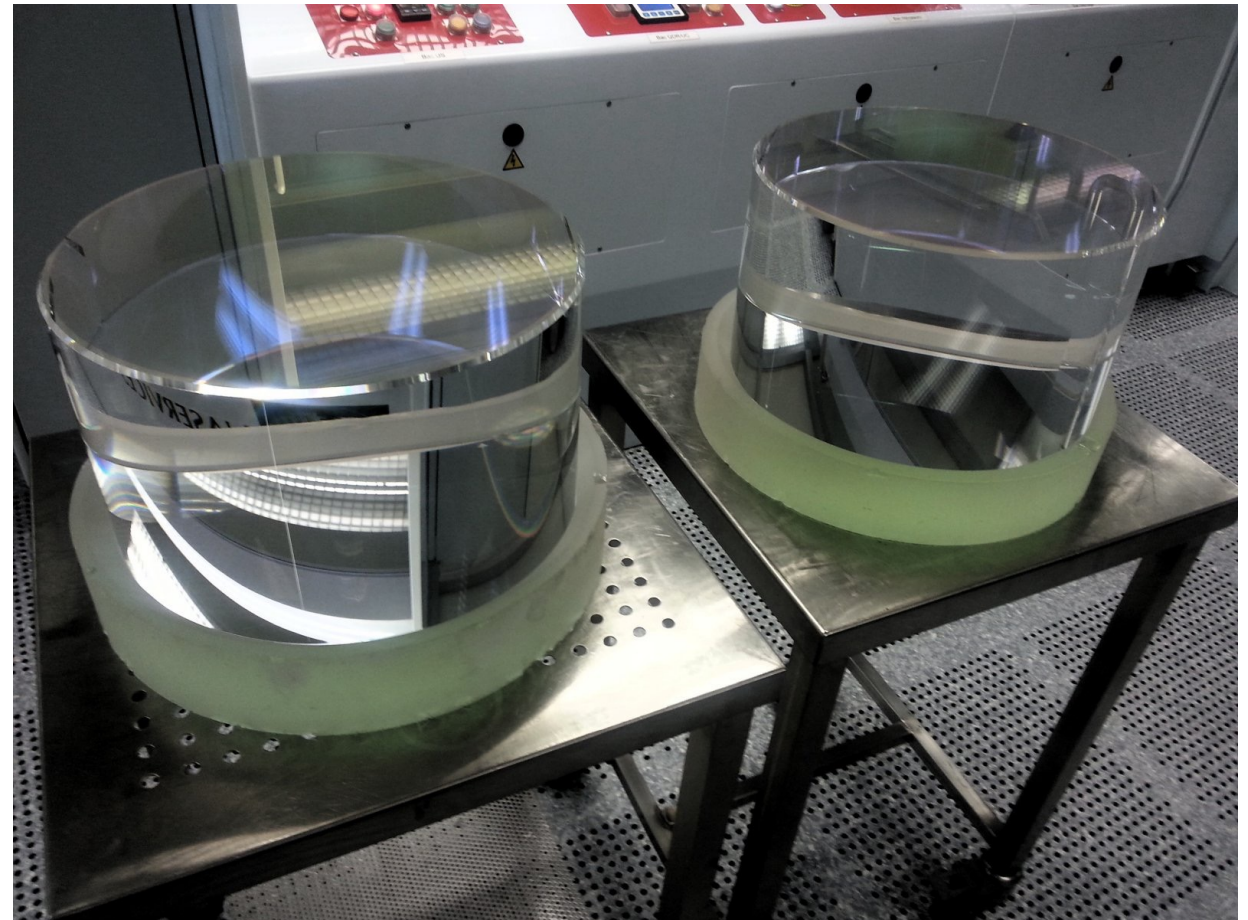
Challenges pour ET:

- Deux longueurs d'onde: 1064 nm et 1550 nm
- Lasers continus ultra-stables – amplifiés jusqu'à ~ centaine de W
- Largeur de bande <1 kHz and stabilisation au ~mHz
- Faible bruit d'intensité RIN
- Faible bruit de phase



Challenges pour ET:

- Large miroirs – 60 cm de diamètre pour 200 kg – avec des propriétés optiques extrêmes:
 - Absorption < 1ppm
 - Rugosité < 100ppm
 - Planéité < few nm
- Silice fondue pour les hautes fréquences et miroirs en silicium pour les basses fréquences
- Revêtements en couches minces à faibles pertes optiques et mécaniques
- Absence de points de diffusion et d'absorption
- Nouvelle technologie : revêtements cristallins
- Plusieurs types de capteurs optiques et systèmes de métrologie pendant la production et le fonctionnement
- Mesure du front d'onde réfléchi et transmis pendant le polissage et le revêtement
- Contrôle de la courbure du miroir
- Positionnement des miroirs à l'aide de capteurs optiques



Bruit quantique

- Il s'agit de fluctuations du vide qui pénètrent dans l'interféromètre par la sortie du détecteur. Ces fluctuations ont des composantes d'amplitude et de phase. Le bruit d'amplitude domine aux LF, tandis que le bruit de phase domine aux HF.
 - Les fluctuations réfléchies par l'interféromètre sont détectées par un photodétecteur sous forme de shot noise
 - Les fluctuations agissant sur les miroirs provoquent un bruit de pression de radiation.

Challenges pour ET:

- Augmenter le diamètre des miroirs
- Augmenter la puissance laser
- Squeezed light -> utilisation d'un cristal non-linéaire afin de redistribuer les incertitudes d'amplitude et de phase

- Réduction du bruit quantique grâce au squeezing à haute fréquence -> Virgo/LIGO 3dB pour O3, amélioration en cours pour O4
- 10dB attendu pour ET

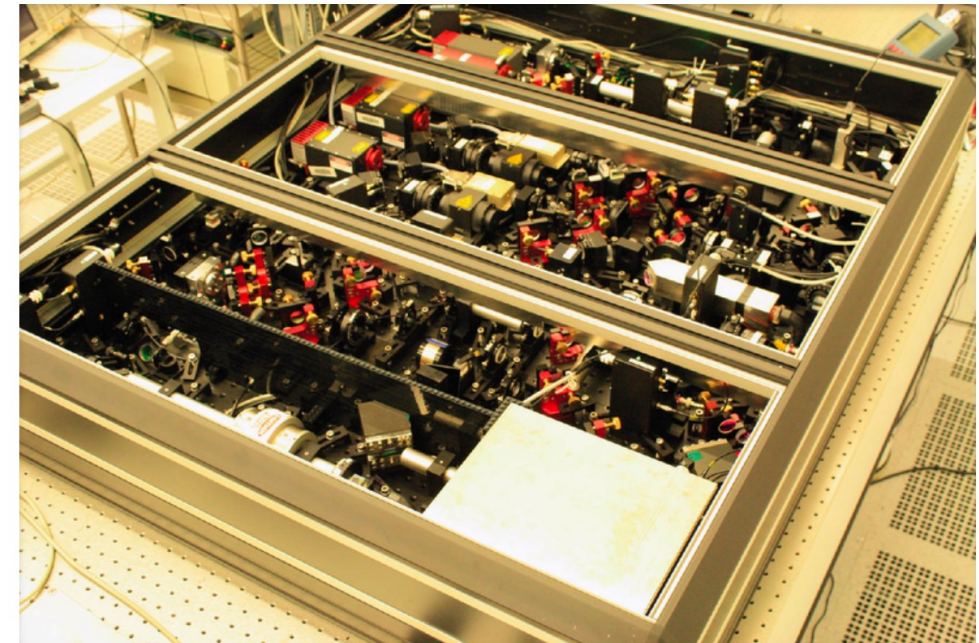
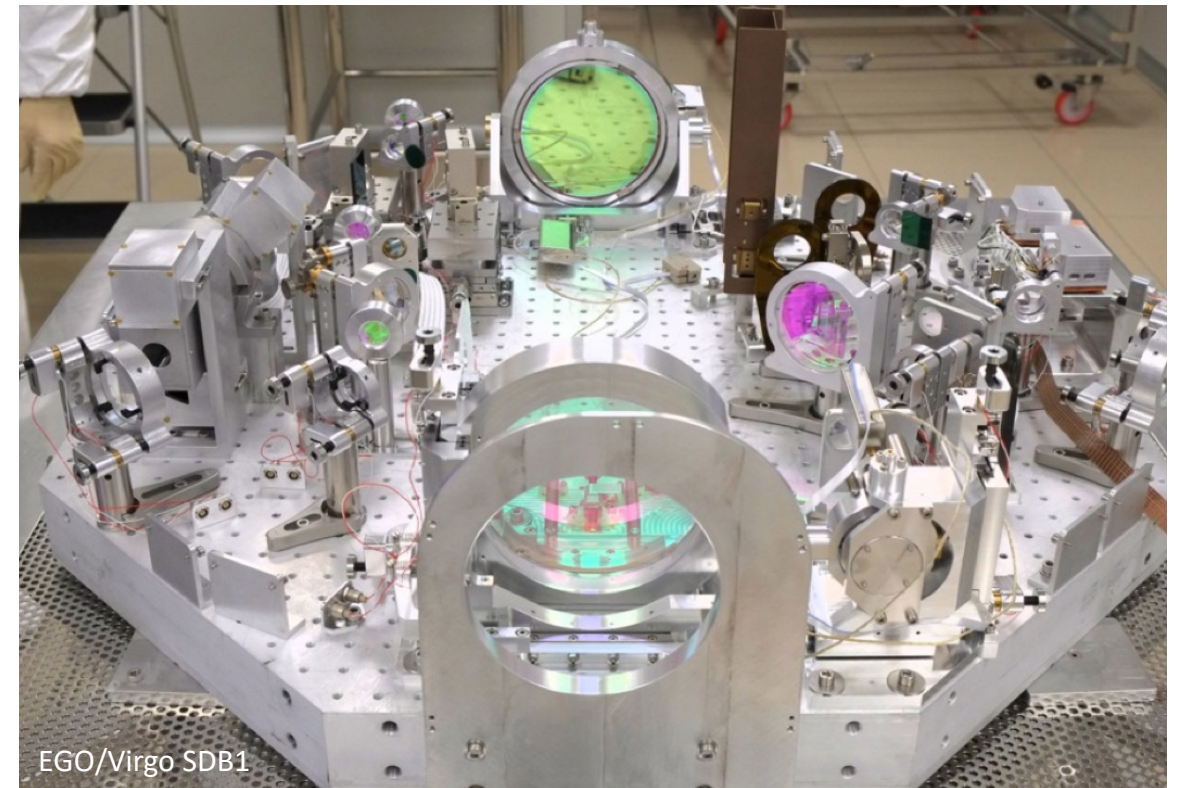


Photo: AEI/GEO600

Challenges pour ET:

- En complément des masses de test, chaque interféromètre possède
 - Environ 10 optiques larges (20cm de diamètre) avec des spécifications complexes
 - Des télescopes hors-axe à miroirs sphériques ou paraboliques avec un grand facteur de magnification (10cm -> qq μm s)
 - Des centaines de « petites » optiques, super-polies pour la plupart
- Opto-mécanique de large dimension, ultra-stables, motorisées
- Optiques adaptatives
- Compensation thermique
- Faible lumière diffusée (beam dumps, baffles, logiciels de simulations performants)

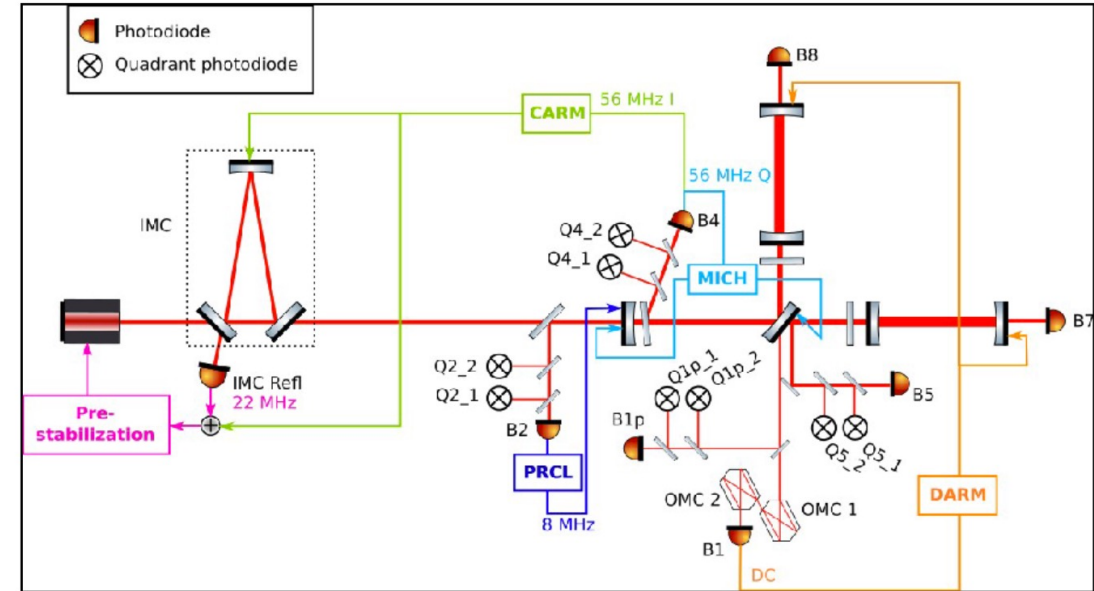


EGO/Virgo SDB1

Challenges pour ET:

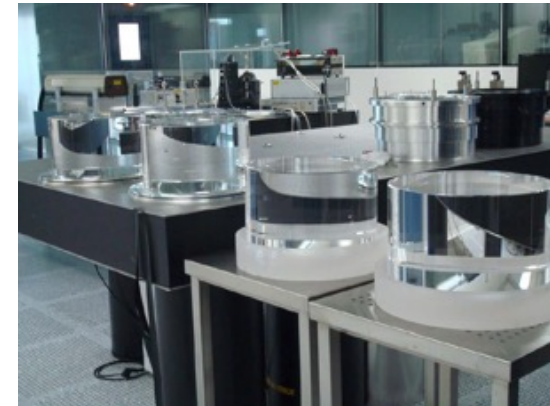
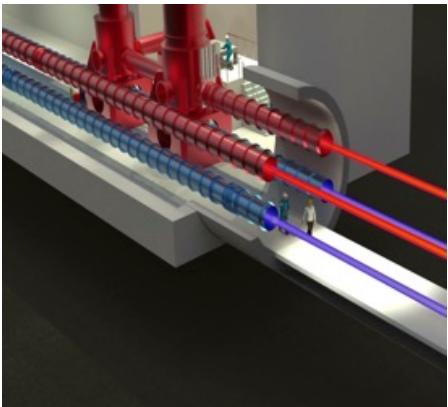
- Plusieurs milliers de :
 - Photodiodes (PD, QPD) pour contrôler la puissance optique, le centrage des faisceaux, l'alignement longitudinal et angulaire
 - Des « phase cameras » pour corriger les distorsions des miroirs
 - Des caméras pour le pré-alignement de l'ITF et le monitoring
 - Des actionneurs de boucles de contrôle
 - Des capteurs de déplacement (LVDT)
 - Des capteurs environnementaux : température, pression, magnétomètres, microphones

- Deux aspects : hardware et software -> machine learning, smart controls, intelligence artificielle



- Nombreux développements technologiques à mettre en place
 - R&Ds à développer
 - Financements à trouver (ANR, ERC, CNRS, Labex, etc) – *présentation par Stephan lien industriels-CNRS / valorisation*
- Plusieurs études et axes de recherche en cours au CNRS pour les besoins d'ET ou pour les améliorations des détecteurs actuels qui serviront à ET (liste non exhaustive) :

- Etudes en cours sur les tubes à vide (LAPP/IJCLab) – Workshop design tubes à vide <https://indico.cern.ch/event/1208957/>
- Squeezing/technologie quantique pour Virgo_nEXT et le futur ET (APC/IJCLab)
- Etudes sur les coatings cristallins (LAPP/LMA)
- Substrats saphire (ILM/IP2I)
- Coatings amorphes (LMA)
- Lasers (ARTEMIS)
- Optiques auxiliaires (LAPP/APC/L2IT)
- Bancs suspendus (LAPP)
- Electronique – temps réel (LAPP/IP2I/IJCLab)
- Acoustique (LAUM)



- Nouveaux développements encore non-étudiés pour Virgo (Virgo_nEXT) ou LIGO, à préparer pour ET :
 - Cryogénie
 - 1550 nm
 - Machine learning / IA / calcul parallèle intensif



Source image: roforge.net

- Collaborations à mettre en place
- Exemples de partenariats:
 - Photodiodes à quadrants pour LISA
 - Polissage des miroirs pour Virgo avec Thalès SESO

QPRWG

(Quadrant Photo-Receiver Working Group)

- Nikhef → QPD development and testing
- SRON → Program management, housing design
- KU Leuven → Front-end electronics design and development
- JAXA → QPR development and testing
- AEI → TIA, definition and testing of the Optical Metrology System, QPR expertise
- ARTEMIS/OCA → stray-light studies, PR characterisation before and after proton irradiation
- UKATC → PR/OB interfaces
- Airbus → PR/Instrument architecture

Industrial partners

Bright Photonics

- ✓ Design house for Photonic Integrated Circuits
- ✓ Experience with InP & InGaAs materials


A journey into space!
 Recently, the Netherlands, a part of the Technical Group of Airbus, the Netherlands, has been developing and collaborating to support projects for space. Technics has currently done so using photonic integrated circuits, which combine many optical elements on one chip for the ultra-modulation and detection of light. **Technics**, who designed the chips for Technics is proud to be part of the space mission.

PHOTONICS
VELIA photonics.com

Experts added to the team to help with simulations and design

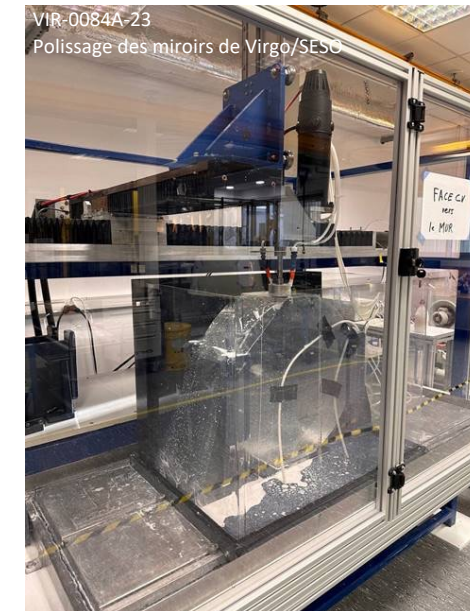
Smart Photonics

- ✓ Device processing of Indium Phosphide based components
- ✓ Zn diffusion
- ✓ Anti-reflection coating
- ✓ Dicing



Slide Stefan Hild – ET_technology / Webinar ET opportunities – July 2020

- Différents co-développements pouvant être identifiés (liste non exhaustive):
 - Cryogénie : cryo-coolers faible bruit, infrastructure cryogénique
 - Isolation des vibrations: mécanique, développement d'actuateurs, fibres silicone
 - Miroirs : polissage, coatings
 - Optiques auxiliaires : réalisation des miroirs/lentilles, optiques adaptatives
 - Capteurs/contrôles : électronique sous vide, intelligence artificielle



- Exemple de partenariats via un appel d'offre Européen – **Projet M2Tech**
- L'objectif général est de développer des technologies innovantes pour les détecteurs actuels et ceux de 3G dans le domaine de l'astrophysique multi-messager: Virgo, ET, CTA, MAGIC et KM3NET
- Durée 4 ans - démarrage en 2025 – coordination CNRS
- Domaines technologiques:
 - Revêtements optiques
 - ET/Virgo: faible absorption, faible diffusion, faible bruit thermique @1064 nm et 1550 nm
 - CTA/KM3NET : augmenter la réflectivité UV-B, résistance à l'abrasion
 - Photodétecteurs et électronique associée
 - ET/Virgo : faible réflectivité, haute sensibilité @ 1064nm, 1550nm
 - CTA/KM3NET : large surface de détection
 - Electronique avancée
 - Traitement du signal numérique, temps réel
 - Monitoring et synchronisation
 - Logiciels pour le monitoring de détecteurs à grande échelle (détection d'erreurs, maintenance prédictive, etc)
 - Synchronisation des détecteurs : débit élevé (10GbE), horloges à faible bruit de phase, distribution précise du temps
 - Outils de calcul efficaces
 - Traitement des données rapide, efficace et durable
 - Outils de génération et traitement des alertes