

Contexte futur des ondes gravitationnelles

EGO VIRGO



AG IP2I Lancement des prospectives

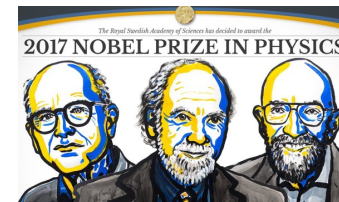
Lyon, 7 Avril 2023

Patrice Verdier (IP2I Lyon – IN2P3) – patrice.verdier@in2p3.fr

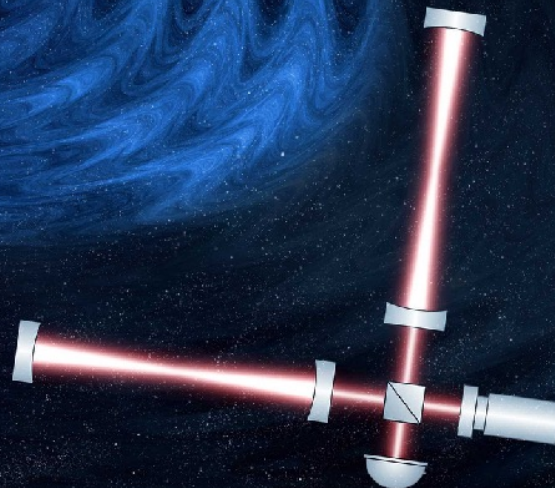
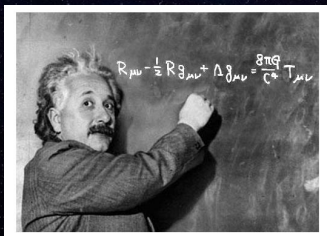
100 ans après leur prédiction dans le cadre de la théorie de la relativité générale d'Einstein, la découverte des ondes gravitationnelles ouvre une nouvelle voie d'exploration et d'étude de l'univers !



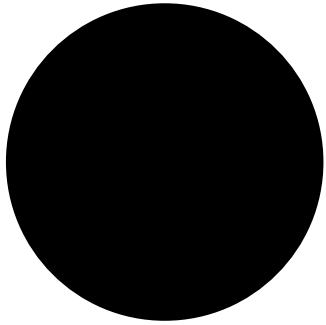
Prix Nobel de Physique 2017



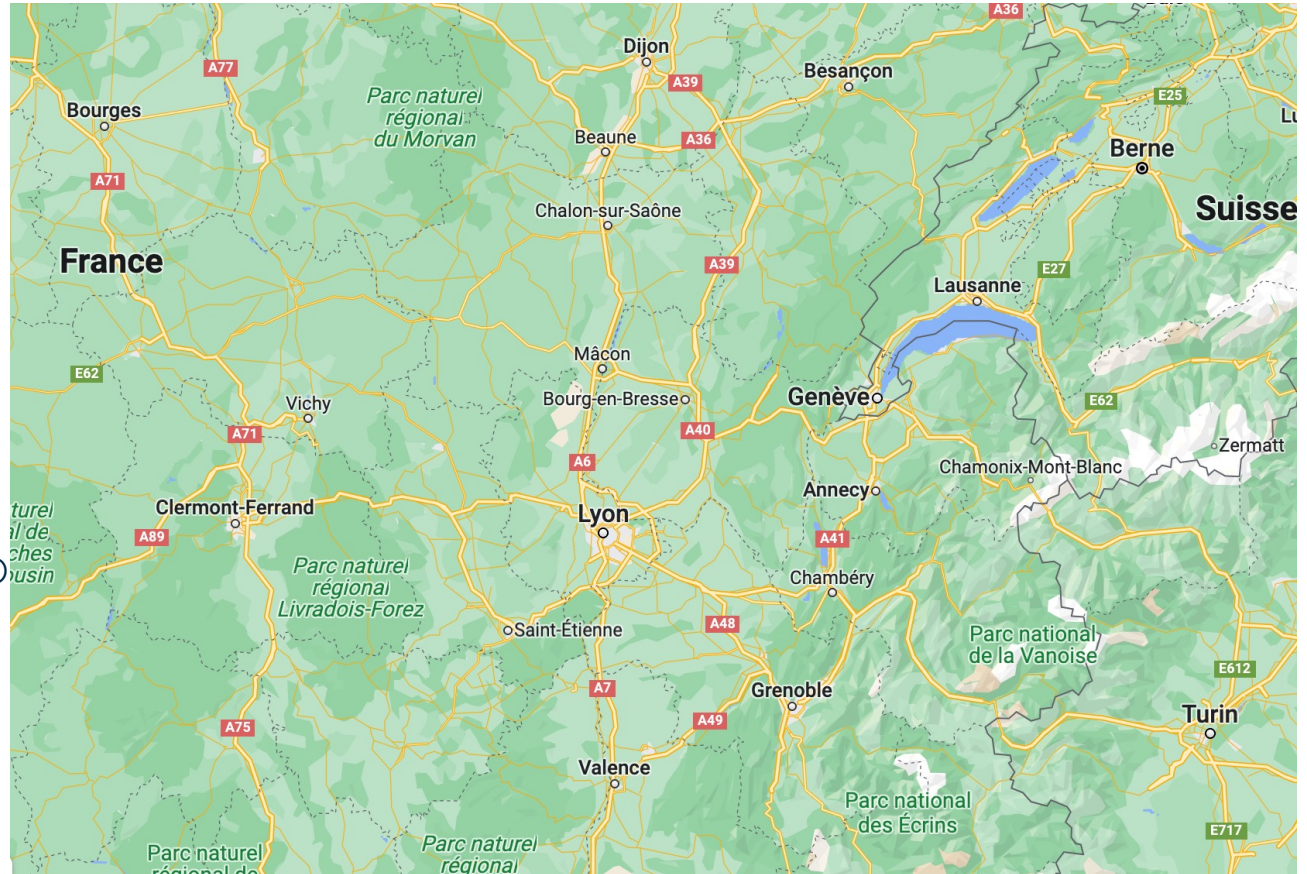
Ce domaine de recherche est actuellement en pleine expansion



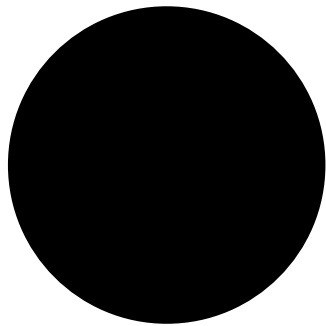
Trou noir de $15 M_{\odot}$



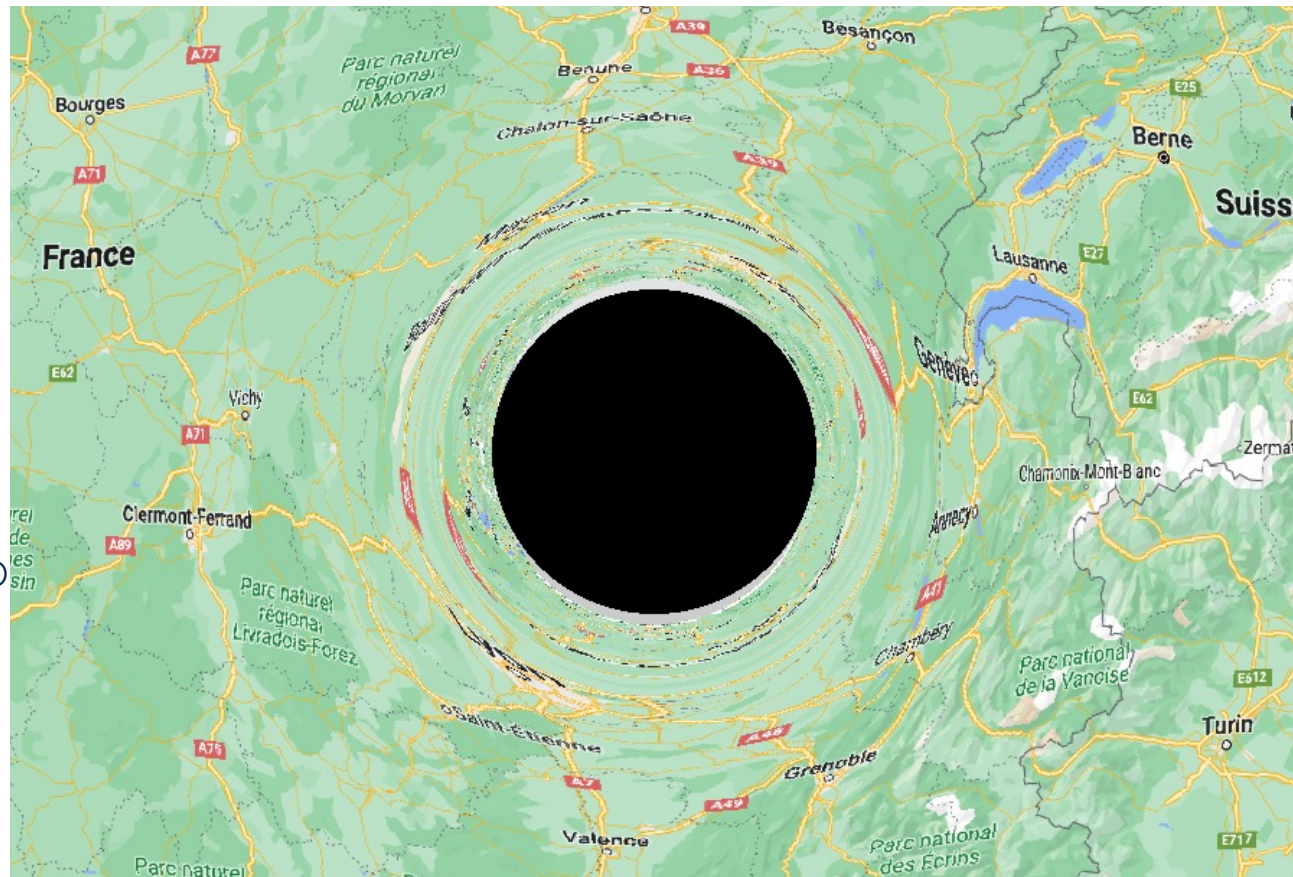
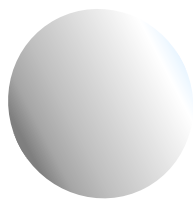
Etoile à neutrons de $1.4 M_{\odot}$



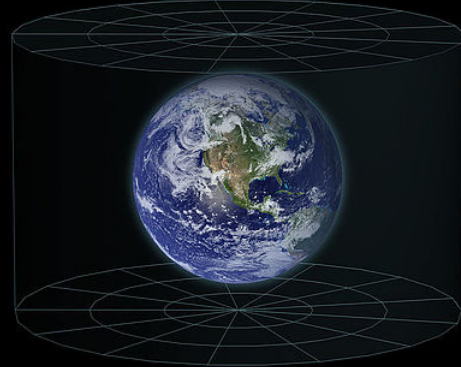
Trou noir de $15 M_{\odot}$



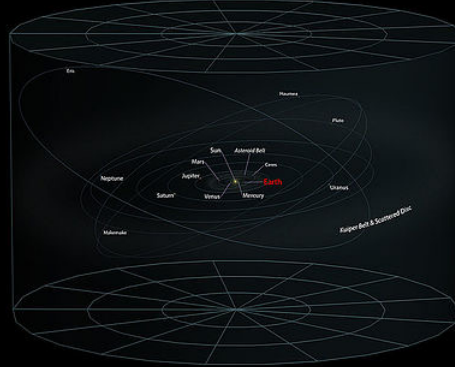
Etoile à neutrons de $1.4 M_{\odot}$



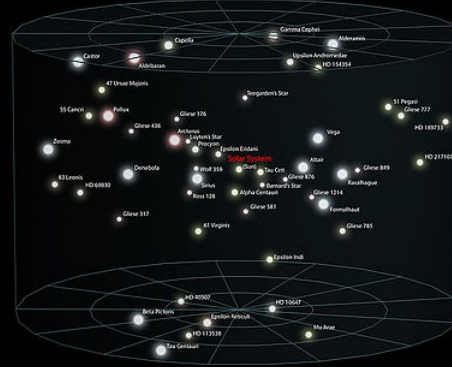
EARTH



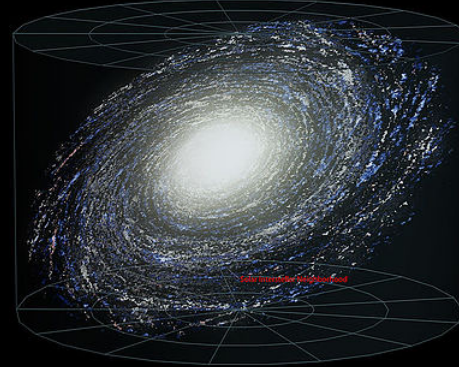
SOLAR SYSTEM



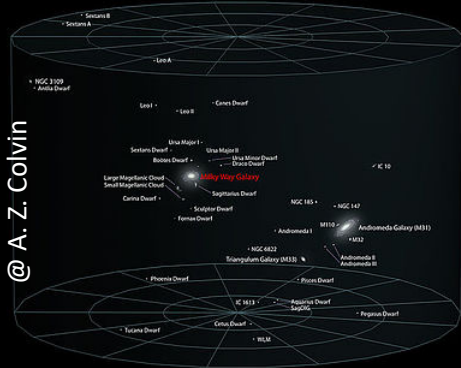
INTERSTELLAR NEIGHBORHOOD



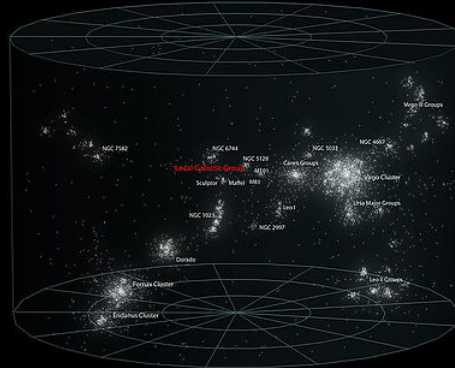
MILKY WAY GALAXY



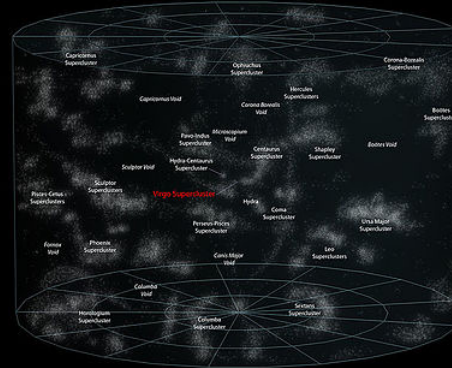
LOCAL GALACTIC GROUP



VIRGO SUPERCLUSTER

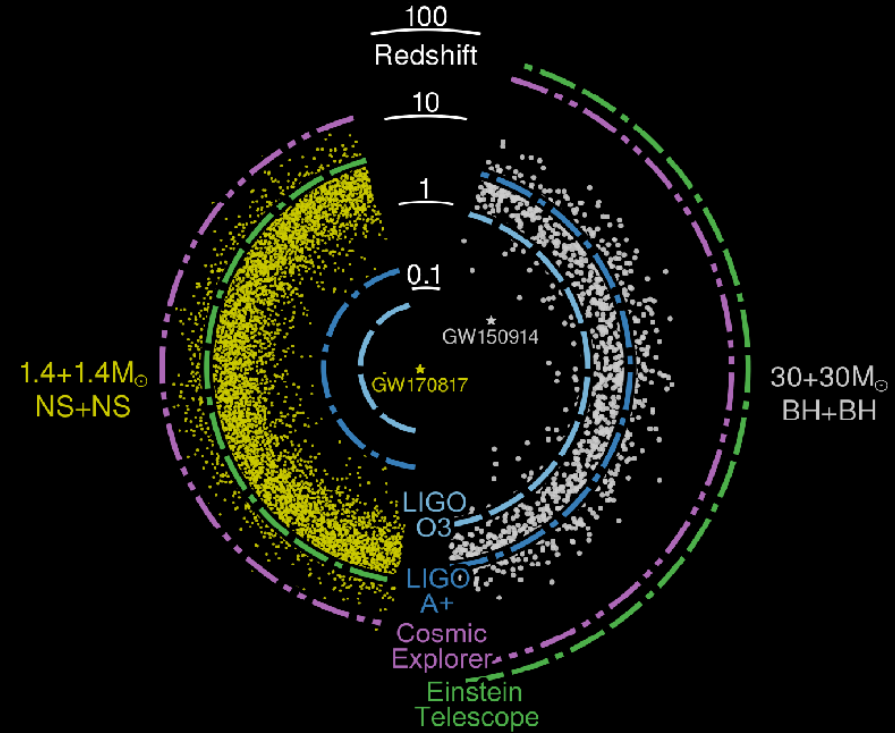
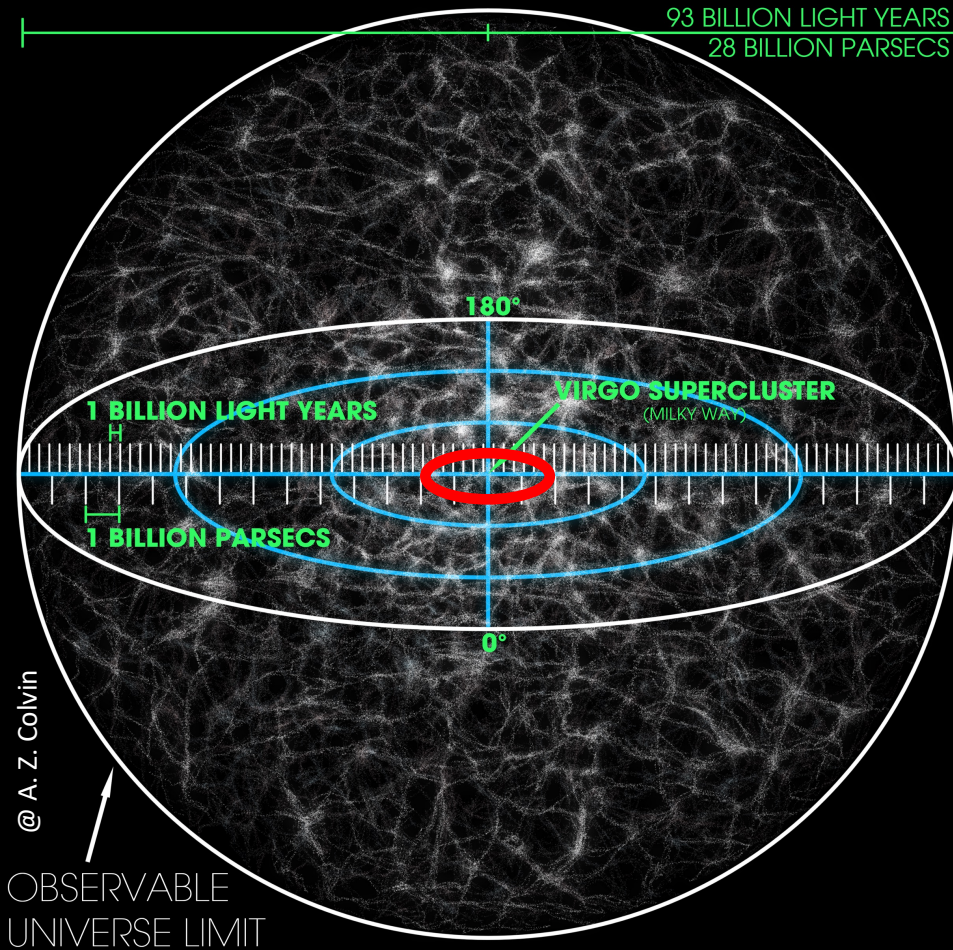


LOCAL SUPERCLUSTERS



OBSERVABLE UNIVERSE





Einstein Telescope a pour objectif d'étudier la majeure partie de l'univers observable

ASTROPHYSICS

Black hole properties

origin (stellar vs. primordial)
evolution, demography

Neutron star properties

interior structure, equation of state & properties
of dense matter, demography

Multi-band and –messenger astronomy

joint GW/EM observations (GRB, kilonova,...)
multiband GW detection (LISA)
neutrinos

Detection of new astrophysical sources

core collapse supernovae
isolated neutron stars (Radio, X, g and GW, FRB, ...)
stochastic background of astrophysical origin

FUNDAMENTAL PHYSICS AND COSMOLOGY

The nature of compact objects

near-horizon physics, tests of no-hair theorem
exotic compact objects, phase transition in dense matter

Tests of General Relativity

post-Newtonian expansion, strong field regime

Dark matter

primordial BHs
axions, dark matter accreting on compact objects

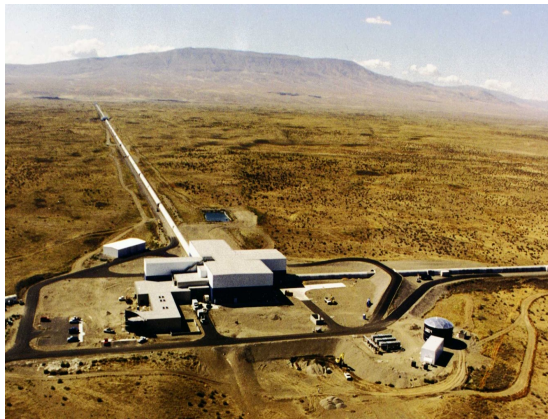
Dark energy and modifications of gravity on cosmological scales

dark energy equation of state,
modified GW propagation

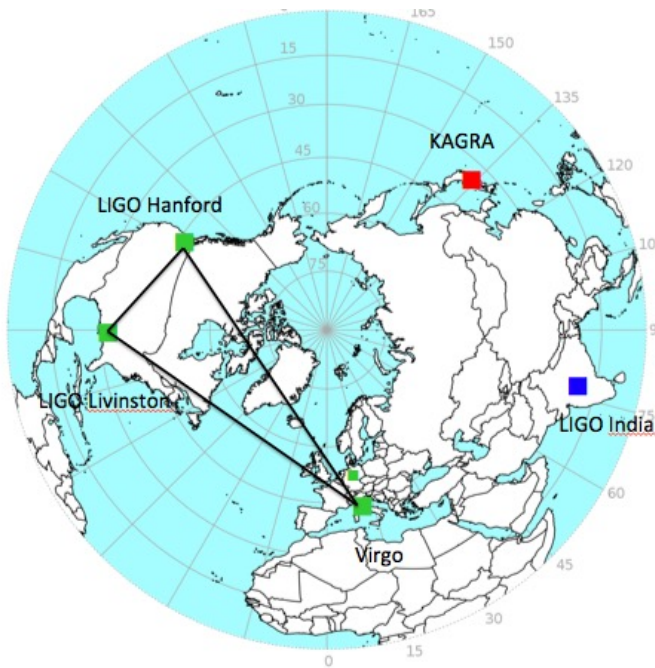
Stochastic backgrounds of cosmological origin inflation, phase transitions, cosmic strings

The “unexpected” ?

LIGO Hanford



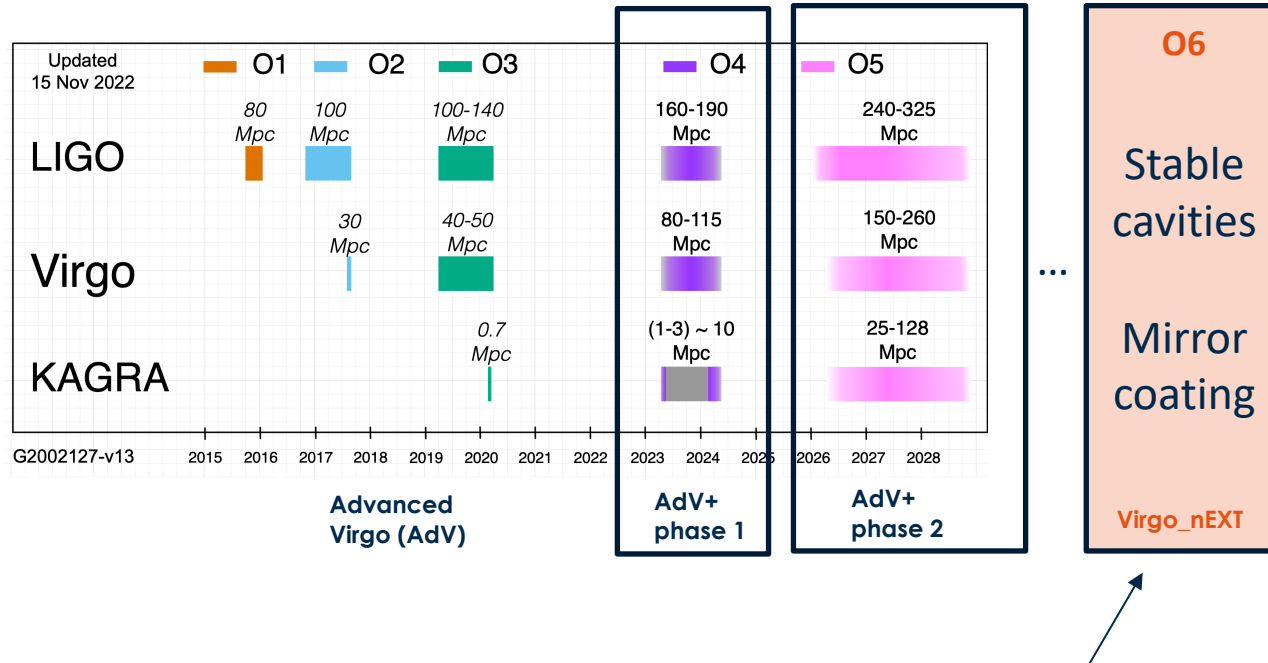
KAGRA



LIGO Livingston



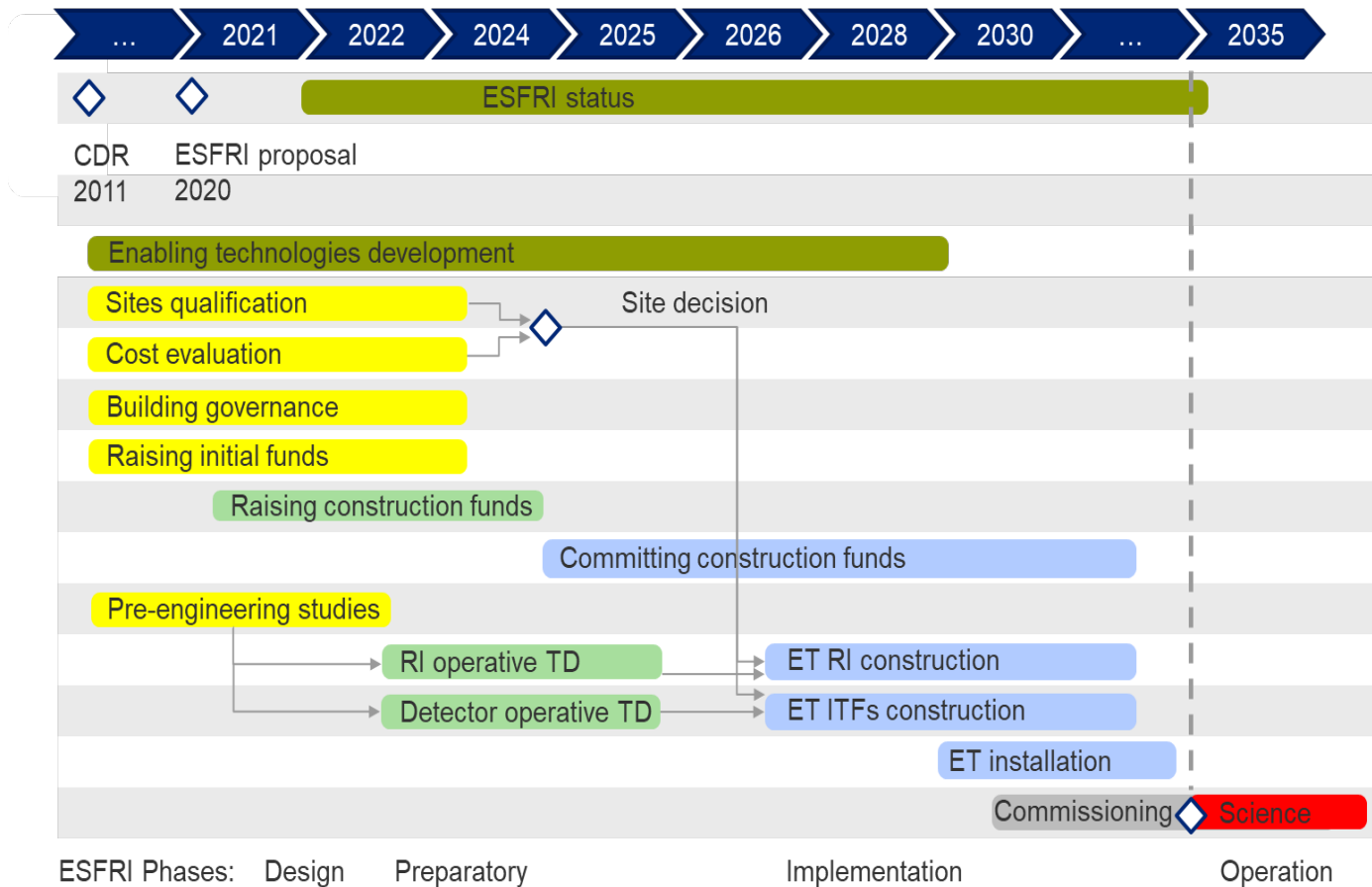
Virgo

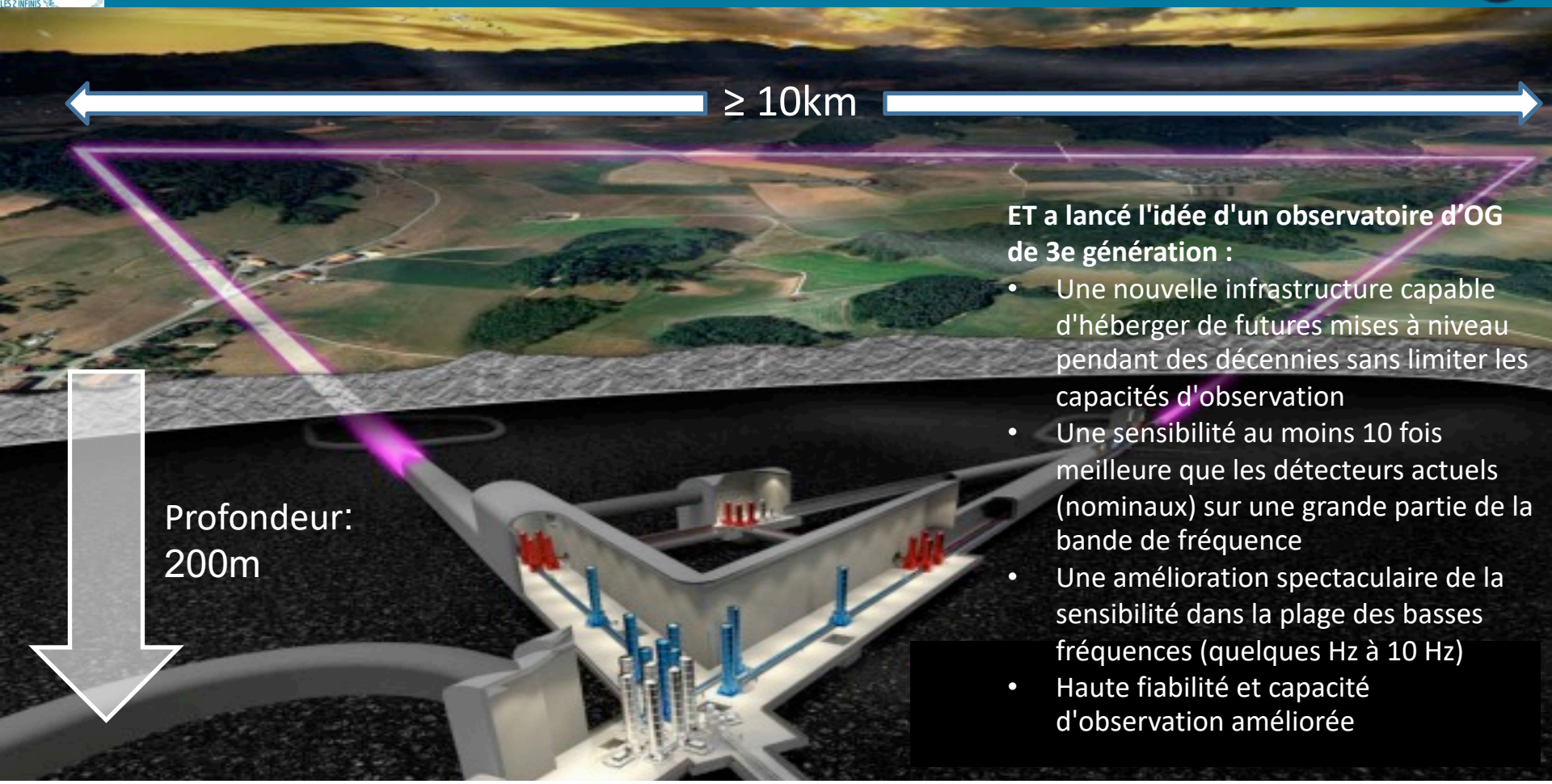


Virgo and LIGO are currently studying post-O5 upgrades, Virgo_nEXT (not yet approved) and A#

KAGRA is also planning major upgrades

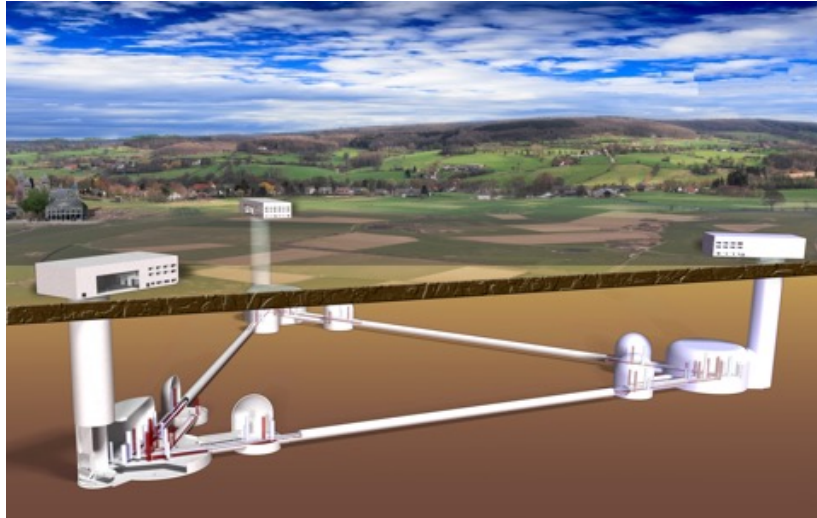
* Tentative schedule





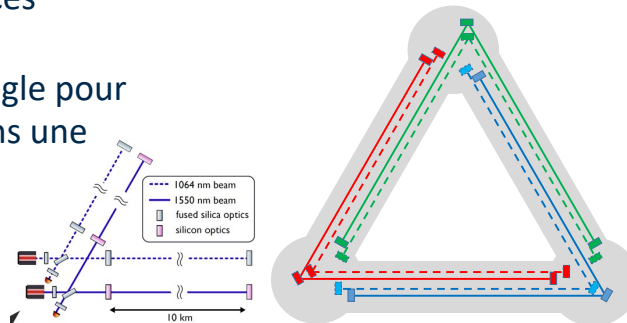
ET a lancé l'idée d'un observatoire d'OG de 3e génération :

- Une nouvelle infrastructure capable d'héberger de futures mises à niveau pendant des décennies sans limiter les capacités d'observation
- Une sensibilité au moins 10 fois meilleure que les détecteurs actuels (nominaux) sur une grande partie de la bande de fréquence
- Une amélioration spectaculaire de la sensibilité dans la plage des basses fréquences (quelques Hz à 10 Hz)
- Haute fiabilité et capacité d'observation améliorée



Xylophone: 2 interféromètres sensibles
à différentes fréquences

Configuration en triangle pour
avoir 3 détecteurs dans une
même infrastructure



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

The multi-interferometer approach asks for two parallel technology developments:

ET-LF:

- Underground
- Cryogenics
- Silicon (Sapphire) test masses
- Large test masses
- New coatings
- New laser wavelength
- Seismic suspensions
- Frequency dependent squeezing

ET-HF:

- High power laser
- Large test masses
- New coatings
- Thermal compensation
- Frequency dependent squeezing

Challenging engineering

New technology in cryo-cooling

New technology in optics

New laser technology

High precision mechanics and low noise controls

High quality opto-electronics and new controls

Evolved laser technology

Evolved technology in optics

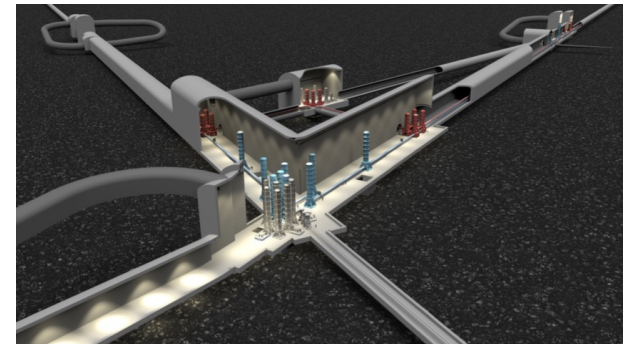
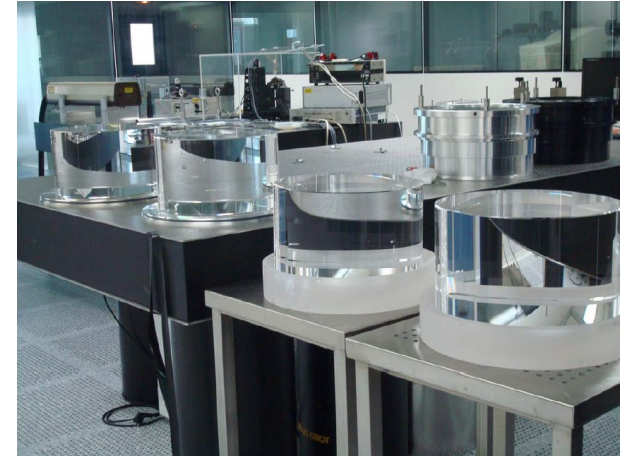
Highly innovative adaptive optics

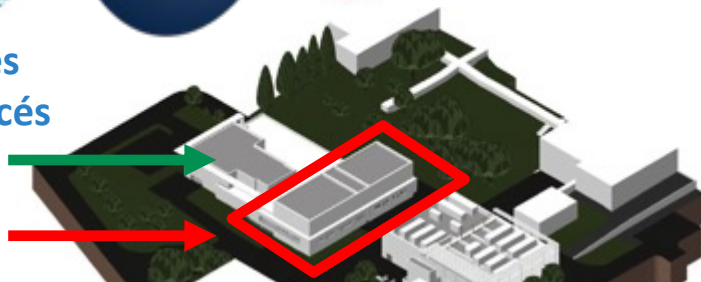
High quality opto-electronics and new controls

- Extrapolation des technologies actuelles ou prévues pour Virgo et LIGO
 - Squeezing (états quantiques de lumière)
 - Lasers haute puissance
 - Des miroirs plus grands
 - Nouvelles couches minces pour les miroirs
 - Techniques de compensation thermique
 - Systèmes de suspension parasismique
- Technologies non testées dans Virgo et LIGO (prototypes et/ou R&D en cours)
 - Cryogénie (également dans KAGRA)
 - Nouveaux matériaux cryogéniques
 - Nouvelles longueurs d'onde laser

⇒ Mise en place de programmes de R&D

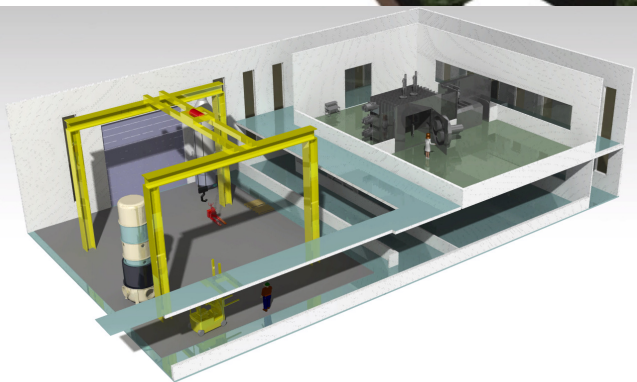
Leadership français sur les miroirs (LMA) Virgo-LIGO-Kagra





Laboratoire des
Matériaux Avancés

Actuel
Extension



Les miroirs les plus parfaits au monde sont fabriqués à Lyon au LMA

Contrat de Plan
Etat-Région
2021-2027



Un investissement de **12 M€** pour:

- l'extension du bâtiment du LMA
- la construction d'un nouveau bâti permettant le dépôt de couches minces sur de très grands substrats ($\varnothing 1,6 \text{ m}$, 600 kg)
- les outils optiques et de métrologie associés

Le LMA est une infrastructure de recherche unique au monde

- Développer les technologies pour les expériences du futur (Ex. : Einstein Telescope)
- Conserver le leadership international du LMA pour les 20 prochaines années

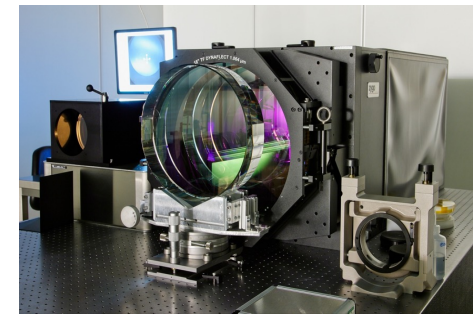
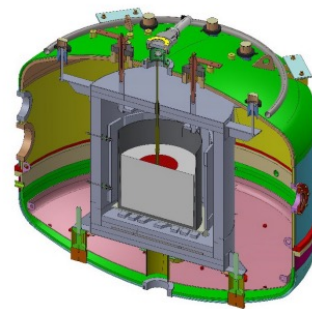
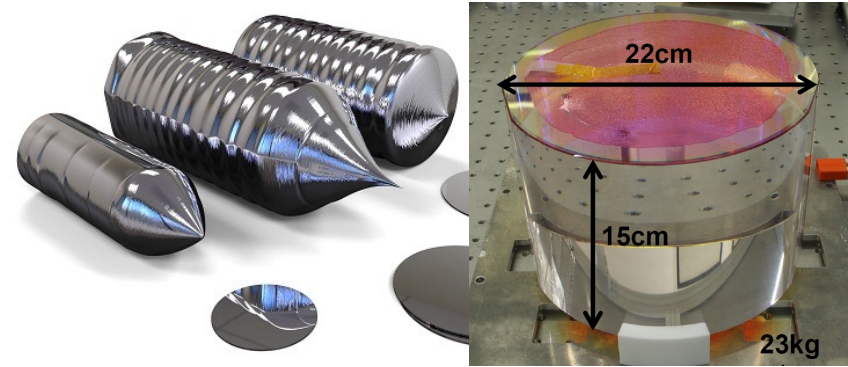
At cryogenic temperature, silica is no longer compatible

- Crystalline substrates:
 - silicon ($\lambda > 1300$ nm)
 - Sapphire ($\lambda > 400$ nm)
- R&D on low T thin films
- Must be available in \varnothing 450 mm, 200 kg and with good optical properties

Today, no solution for such substrates!

Project in Lyon: *Sapphire Optics for Gravitational Astronomy*

- Funded by Université de Lyon
- Sized to make substrates of \varnothing 450 mm, 200 kg
- Production on \varnothing 200 mm in progress
- Combined with LMA : measurement of optical absorption
birefringence measurement of surface quality



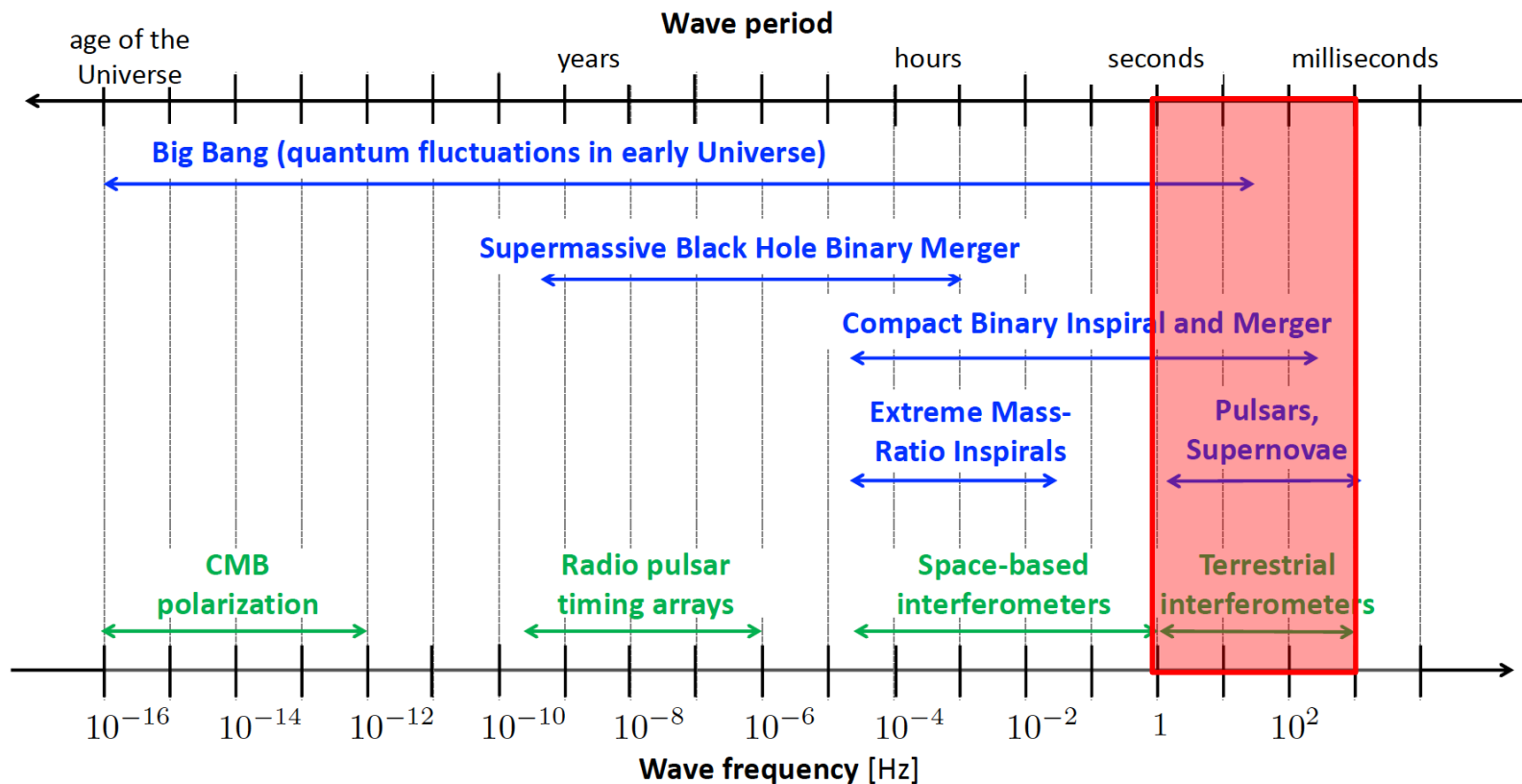
Dans les semaines à venir: organisation des forums pour préparer la prospective OG à l'I2PI dans lesquels il va falloir aborder:

- La physique : analyses CBC, cosmologie, équation d'état matière nucléaire, physique multi-messagers ...
- Développement des technologies pour Virgo_nEXT et Einstein Telescope:
 - Programme de R&D miroirs couches minces
 - R&D substrats et suspensions saphir
 - Simulations : systèmes optiques, Digital Twins (?)
 - R&D électronique: Timming (white rabbit), Système d'acquisition intelligent (ML sur FPGA), systèmes de capteurs distribués (IOT) (?)
 - Computing et Software : calcul HTC/HPC, système d'alertes
 - ...

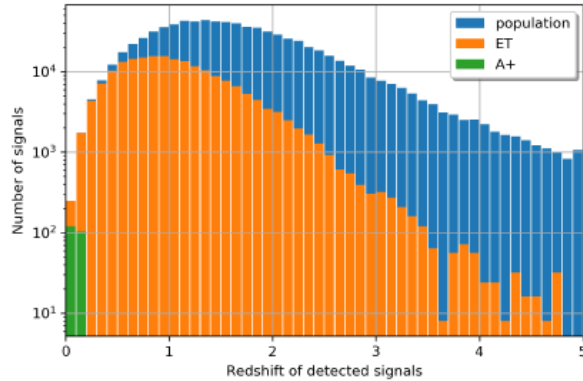
Exploiter au maximum les synergies entre Virgo et Einstein Telescope

Backup

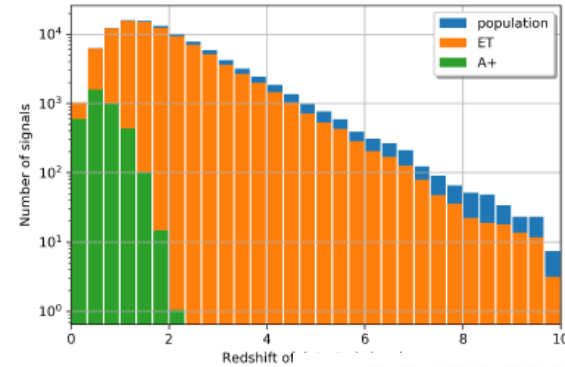
Physical phenomenon, Search techniques



BINARY NEUTRON-STAR MERGERS

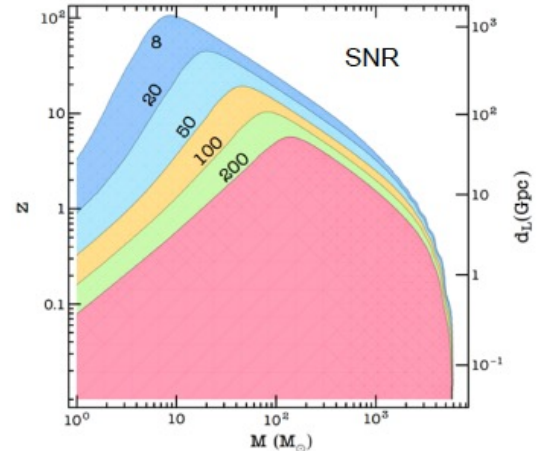
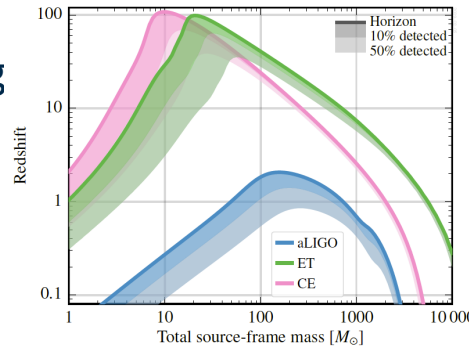


BINARY BLACK-HOLE MERGERS

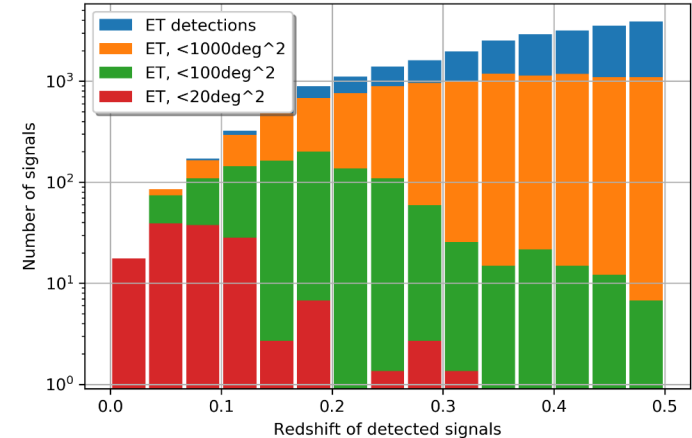


- 10^5 - 10^6 BBH detections per year
- 10^4 - 10^5 BNS detections per year among which ~ 10 - 100 with EM counterparts
- High SNR events
- Overlapping events

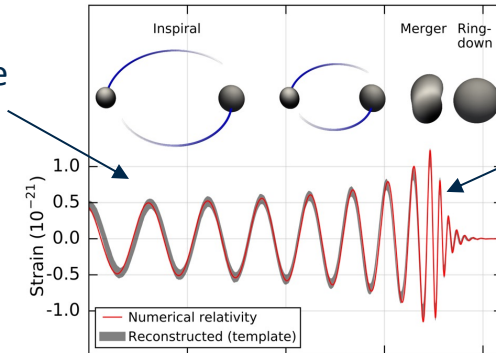
~ 1 detection every 30s



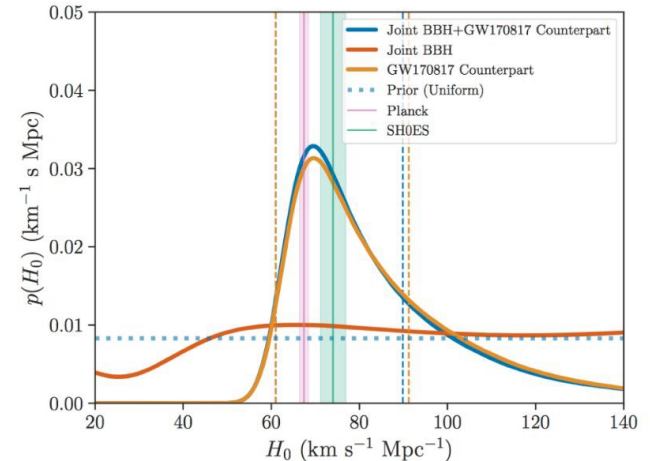
- **BNS detection with EM counterparts and localization precision $< 20 \text{ deg}^2$: $\sim 10\text{-}100$ per year**
- Overlap with many BBH signals
- Potentially, very long signals
- ET will be able to provide alerts few hours before the merger



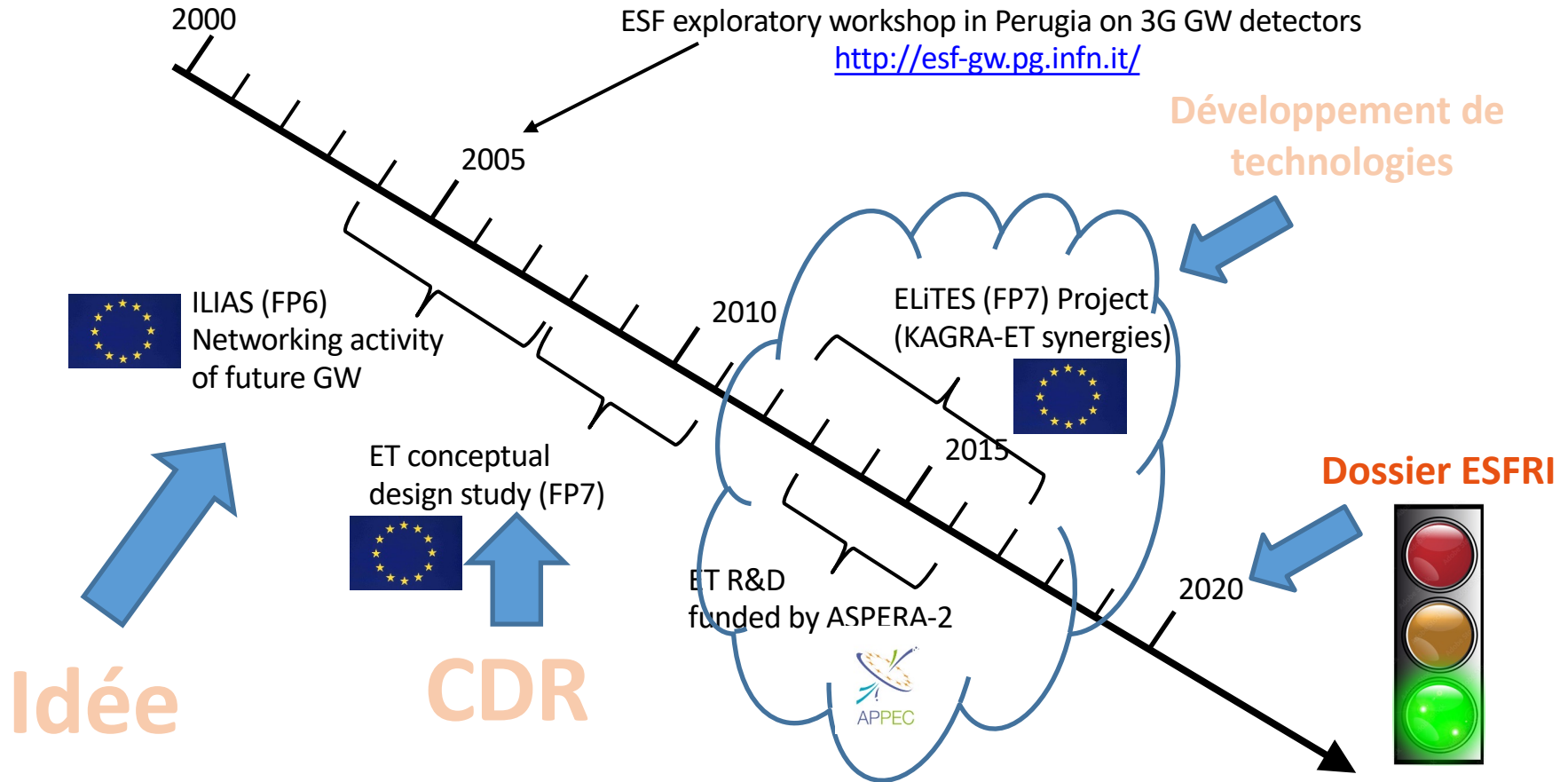
Identify early the inspiral ...

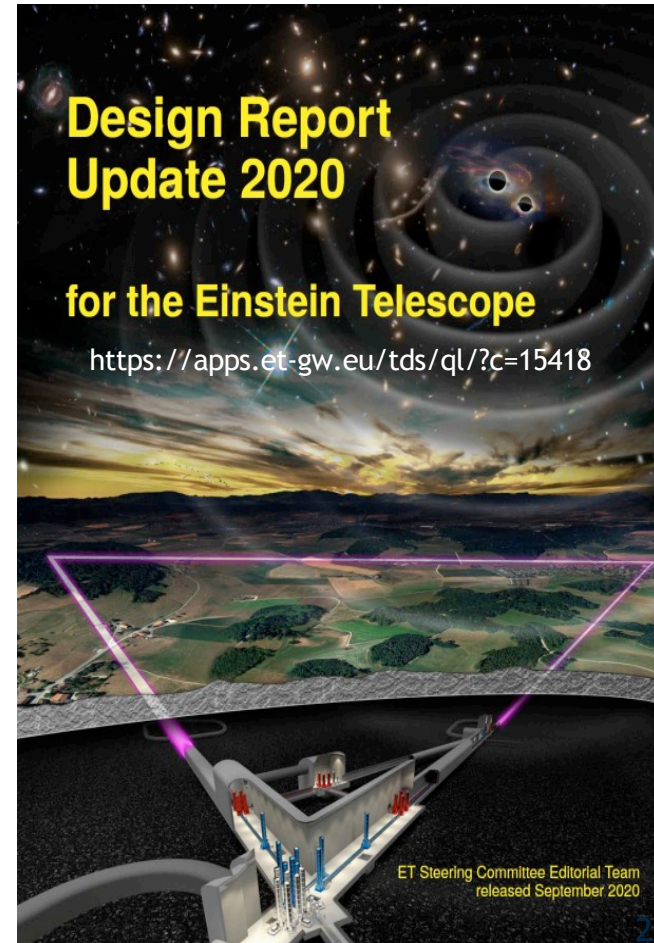


... and provide alert before the merger phase



- And with ~ 500 BNS-EM detection, we can reach Planck resolution on H_0 measurement

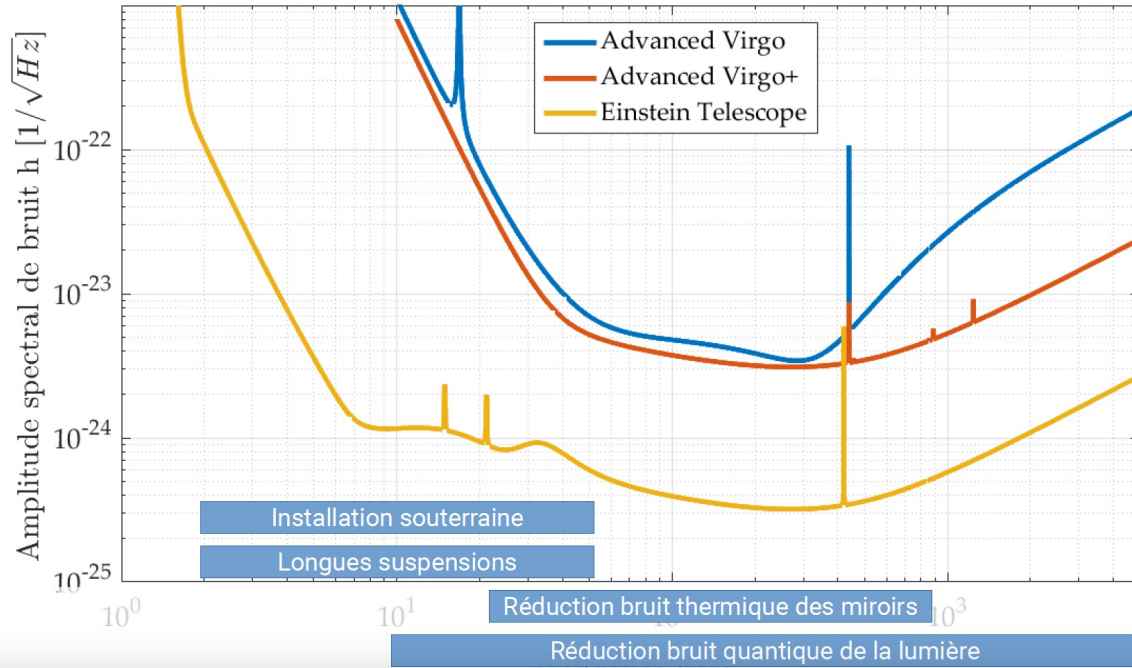




But de ET: être 10 fois plus sensible

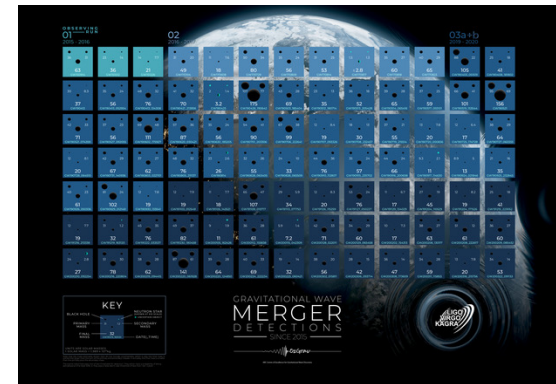
que la seconde génération de LIGO-Virgo (Advanced Virgo/LIGO)

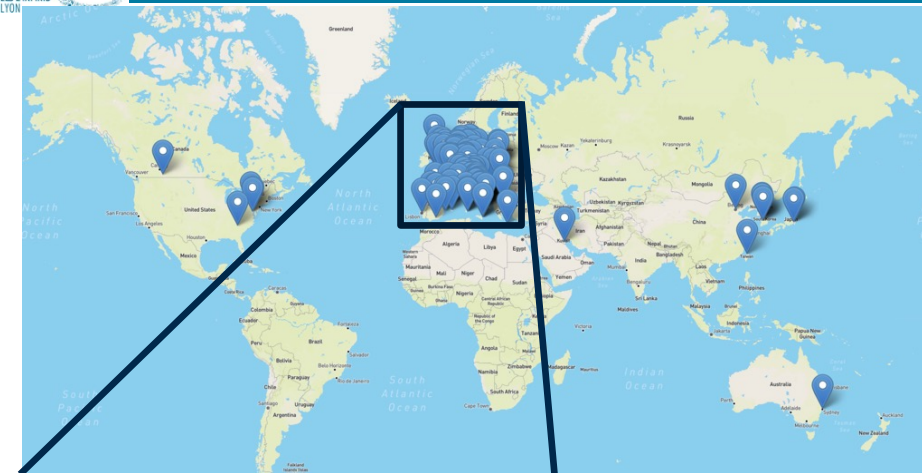
@J. Degallaix



Détecter 10^5 - 10^6 coalescences
de trous noirs et d'étoiles à
neutrons par an

[Run 03-04 de Virgo-LIGO:
90 détections]





1370 collaborateurs de 202 instituts dans 23 pays dans le monde
ET en France: 17 laboratoires et 116 members

ARTEMIS (Nice)
IF-ILM (Marseille-Lyon)
IP2i-LMA (Lyon)
LAPP (Annecy)

APC (Paris) avec Subatech
IJCLab (Orsay) avec LKB
IPHC-L2IT (Strasbourg-Toulouse)
PARIS-CAEN LPC Caen, LUTH, IAP, GANIL, SYRTE, GEPI

En France:

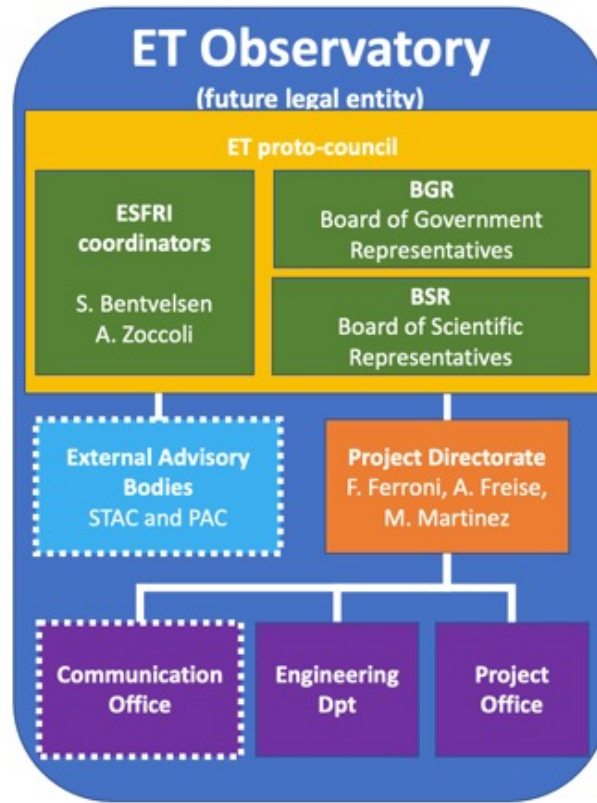
- Coordination CNRS avec la direction de l'IN2P3 qui rapporte au MESR les avancées du projet
- Revue en 2020 par le Haut-Conseil des TGR
- Mise en place d'une organisation projet (janvier 2023), synergies maximales avec EGO/Virgo



L'UE soutien la
création de
l'infrastructure ET
(ETO) via le
financement d'un
projet Infradev:

**Einstein Telescope
Preparatory Phase
(ET-PP)**

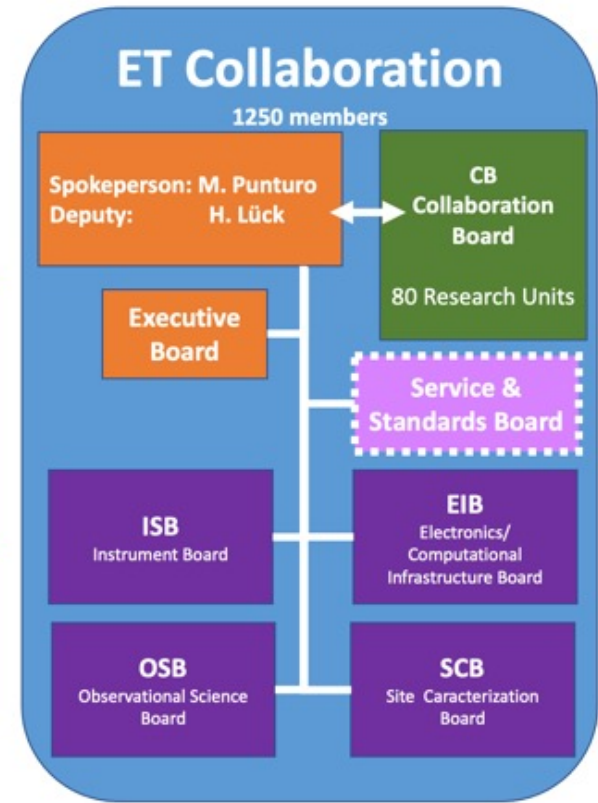
Forte contribution
CNRS



Projects

Infradev ET-PP
Implementation plan of ET
Observatory
M. Martinez
(Managed by
Project Directorate)

**Design of ET
Vacuum Pipe**
P. Chiggiato
(CERN coordination)



Depuis l'été 2022, le projet Einstein Telescope se structure rapidement

Il existe actuellement deux sites, en Europe, candidats pour héberger ET :

- Le site de Sardaigne, à proximité de la mine de Sos Enattos
- Le site EU Regio Rhin-Meuse, à proximité de la frontière NL-B-D
- Une troisième option en Saxe (Allemagne) est en discussion

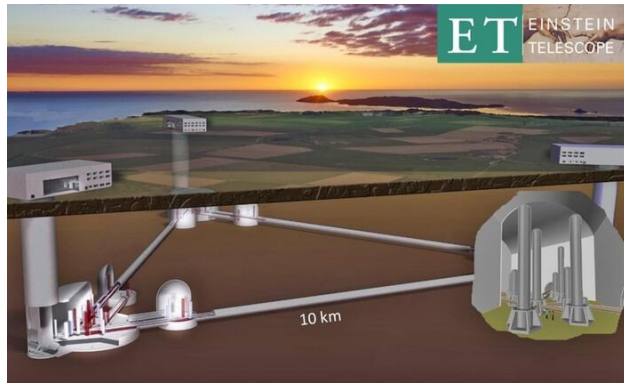
Les sites sont étudiés à travers

- mesures de bruit sismique en surface, en forage et en mine (Sardaigne)
- Mesures des bruits magnétiques et ambiants
- Caractérisations géophysiques et géotechniques
- ...

Des fonds importants sont nécessaires pour élaborer et proposer une candidature de site



Sardaigne – Italie

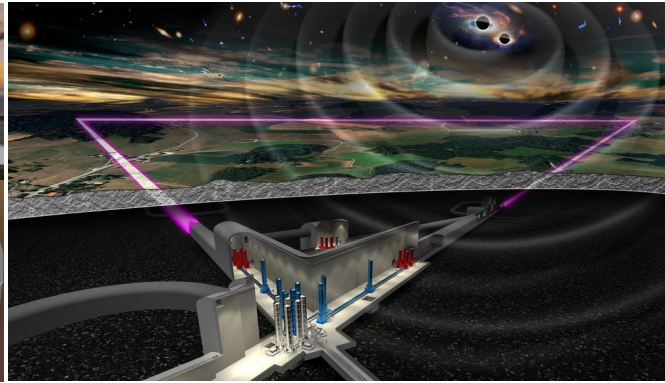


50 M€ pour les R&D et des
travaux préparatoires

ETIC en Italie

Einstein Telescope Infrastructure Consortium
Financement « multi-100 M€ »
si le site d'ET est en Sardaigne

Euregio Meuse-Rhin – Pays-Bas



42 M€ pour les R&D et des
travaux préparatoires

ET-Pathfinder à Maastricht

Financement « multi-100 M€ »
si le site d'ET est en Euregio
Meuse-Rhin

Saxe – Allemagne

The German Centre for Astrophysics

2 locations for research,
technology, digitalisation.



Nouveau laboratoire DZA (2022)
170 M€/an sur 10 ans

3 piliers: astrophysique, sciences
des données, technologies

ET-PATHFINDER

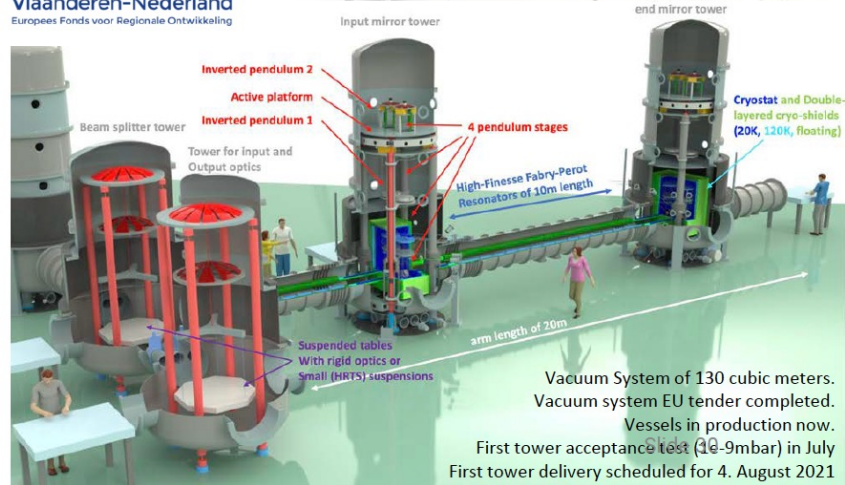
- New facility for testing ET-LF technology in a low-noise, full-interferometer setup
- Key aspects: **Silicon mirrors** (3 to 100+kg), **cryogenics** cryogenic liquids and sorption coolers, water/ice management), **"new" wavelengths** (1550 and 2090nm), coatings etc
- Start with 2 FPML, one initially at 120K and one 15K (2022+)
- >20 partners from NL/B/G/FR/SP/UK
- Initial capital funding of 14.5 MEuro
- Detailed **Design Report** available at apps.et-gw.eu/tds/?content=3&r=17177
- **Open for everyone interested to join**
- For more information please see:

www.etpathfinder.eu

CREDIT: S. Hild



Interreg
Vlaanderen-Nederland
Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling



Vacuum System of 130 cubic meters.
Vacuum system EU tender completed.
Vessels in production now.
First tower acceptance test (10-9mbar) in July
First tower delivery scheduled for 4. August 2021

Un des axes du projet ETIC est le développement d'un labo cryo à Rome



3G Gravitational-Wave Lab



With ARC funds, we are preparing a lab for low temperature tests on a real size prototype of an ET LF-Payload

Pulse Tube Cooling Station

Cryogenic Tests Area:

Test Cryostat for a full size LF-Payload, cooled by two PT (~Ø 3 m x 3.5 m):

- 2 thermal shields in insulation vacuum
- 1 experimental chamber with separated vacuum

Payload Development and Test Area (LF Payload – Real size)

The Rome1 ET Group:

From Virgo:

Sibilla	Di Pace	(Post Doc Researcher)
Ettore	Majorana	(Full Professor)
Valentina	Mangano	(Post Doc Researcher)
Luca	Naticchioni	(INFN Researcher)
Maurizio	Perciballi	(INFN Technician)
Paola	Puppo	(INFN Researcher)
Piero	Rapagnani	(Associate Professor)
Fulvio	Ricci	(Full Professor)

From CUORE:

Angelo	Cruciani	(INFN Researcher)
Antonio	D'Addabbo	(Post Doc Researcher LNGS)
Stefano	Pirro	(INFN Researcher)

From EGO:

Paolo Ruggi	(EGO Researcher)
-------------	------------------

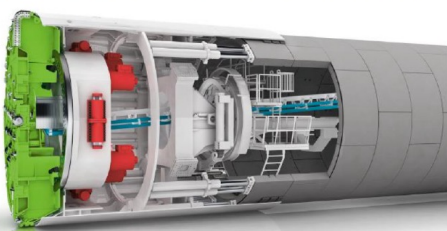
Infrastructure

@J. Degallaix

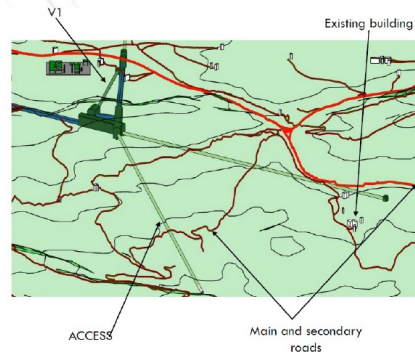
- stratégie pour la construction des tunnels et cavernes
- gestion infrastructure souterraine
- intégration dans l'environnement local



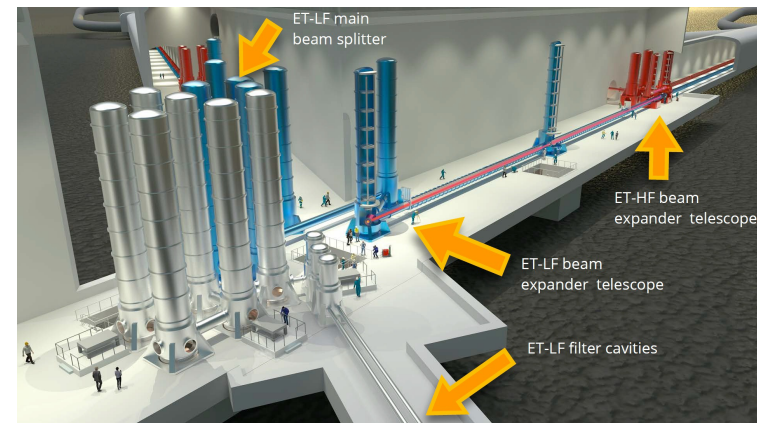
Taille, forme des cavernes ?



Méthode d'excavation ?



Installations existantes ?



+ Etudes pour la caractérisations des sites candidats en cours: forages, bruits ambiants (sismiques, éoliennes, magnétique ...)

Les systèmes à vide prévus pour les détecteurs 3G seront probablement les plus grands systèmes UHV construits

- Le tube de faisceau est son composant le plus important ($\sim 1/2$ du coût du système)
- 120 km de tubes UHV de 1 m de diamètre, volume total $\sim 10^5 \text{ m}^3$
- Exigences de vide : facteur > 5 plus strict que Virgo :
 10^{-10} mbar pour H_2
 10^{-11} mbar pour N_2
 $< 10^{-14}$ mbar pour les hydrocarbures
- Durée de vie: 50 ans
- Coût estimé préliminaire $\sim 560 \text{ M€}$

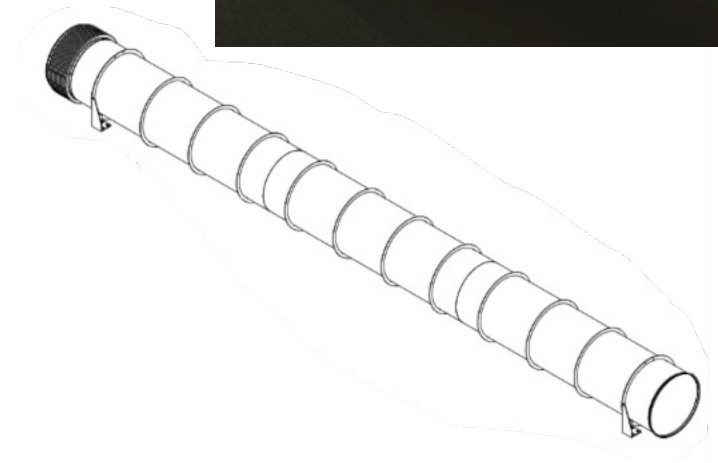
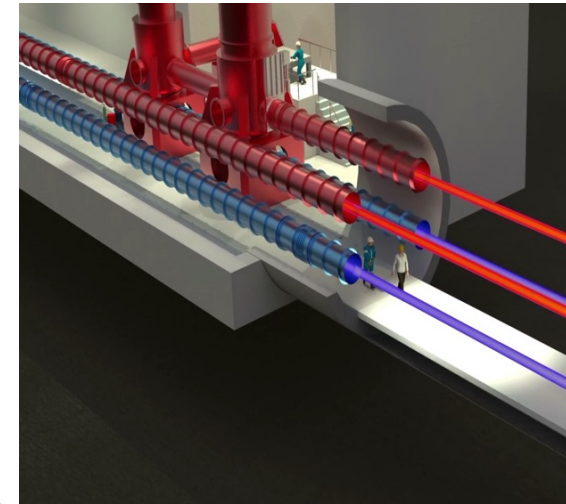


Développement conjoint avec le CERN impliquant Einstein Telescope et Cosmic Explorer (Projet US)

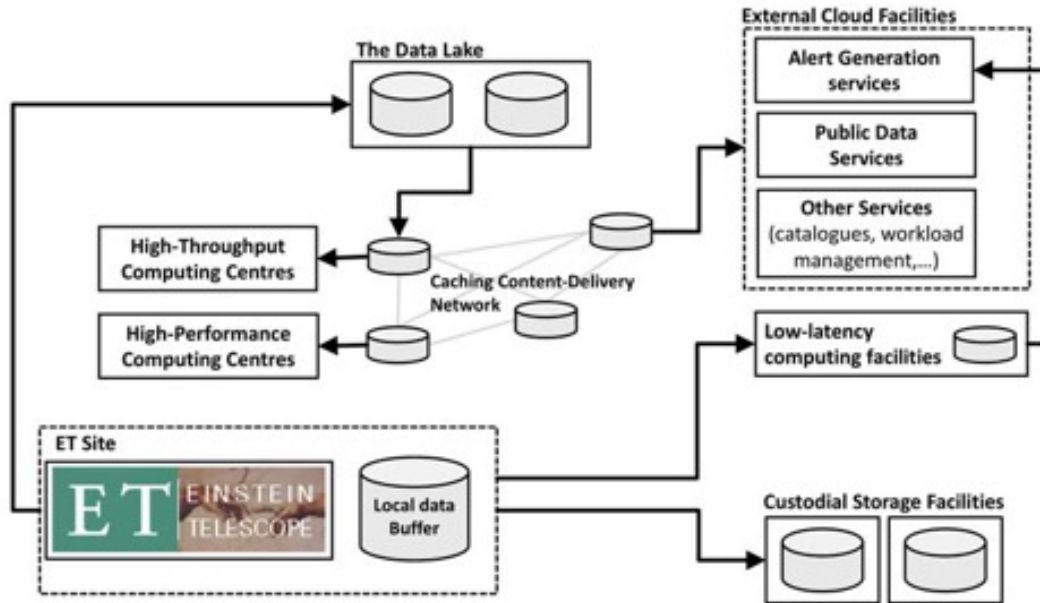
En supposant une approche à la Virgo et ~ 3 ans pour la production:

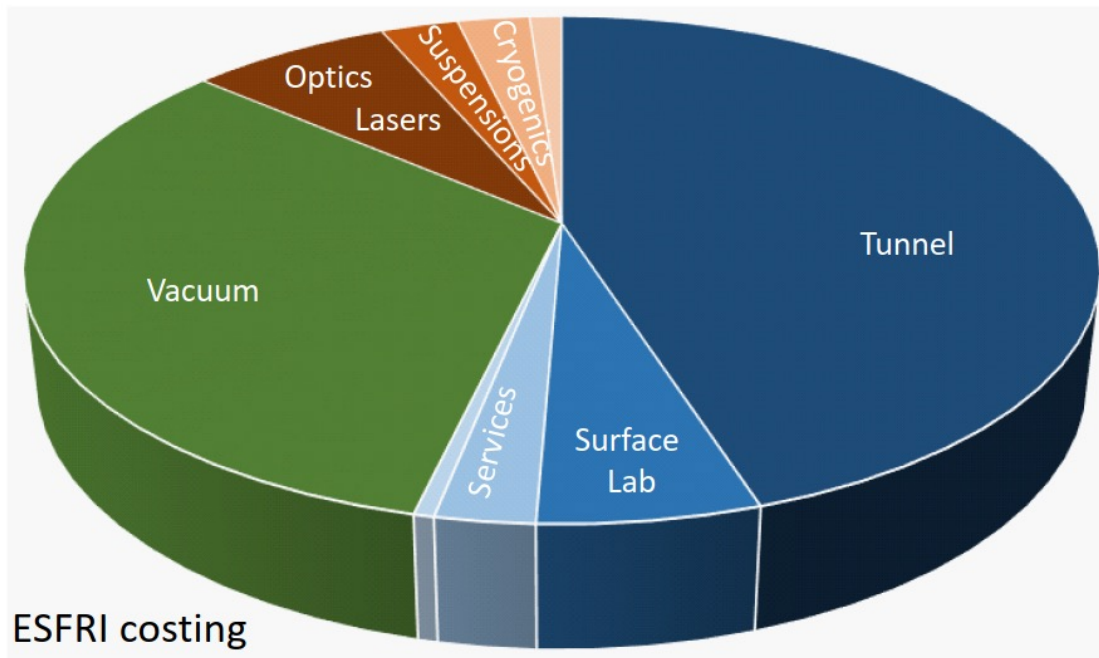
- 13000 t d'acier brut
- 8000 modules de 15 m de long (y compris le soufflet de dilatation thermique)
- Production de 8 modules/jour (y compris les contrôles de fuite et de contrôle qualité poussés)
- 240 stations de pompage (5000 l/s efficace, ionique, getter, turbo moléculaire auxiliaire)
- 720 vannes (250 mm)
- ajouter des brides tous les 250 m ?
- Vannes 48/72 (diamètre 1 m)
- 10 fours (chacun pour 4 modules à la fois) fonctionnant environ 3 ans 24h/24 et 7j/7 pour la cuisson à l'air
- 4 systèmes de nettoyage

En extrapolant les coûts de Virgo à ET: 560 M€



ET utilisera une **infrastructure informatique distribuée en Europe**, basée en grande partie sur les infrastructures existantes comme le **CC-IN2P3** en France (ET = $\sim 10\%$ d'une exp. LHC au CERN).
Utilisation croissante de calcul parallèle haute performance (HPC) vs calcul HTC.
Utilisation des outils et services développés dans le cadre de ***l'European Open Science Cloud*** et des projets Européens comme ESCAPE pour la **physique multi-messagers**





Tunnel	781 M€
Surface Lab	98 M€
Underground Services	44 M€
Direction	9 M€
	932 M€
Vacuum Systems	566 M€
	566 M€
Optics & Lasers	125 M€
Suspensions	48 M€
Cryogenics	45 M€
Installation	20 M€
	238 M€

Einstein Telescope est un projet très ambitieux nécessitant:

- ❖ Le développement de nouvelles technologies
- ❖ Une grande collaboration scientifique structurée et organisée
- ❖ Des partenariats solides entre les acteurs de la recherche académique et du secteur industriel pour:
 - Des programmes amonts de R&D
 - La construction de l'infrastructure et des instruments

<https://et-france.in2p3.fr>

