

# Lycée Roland Garros – Le Tampon, La Réunion

**Mercredi 09 novembre 2022**

**Nicolas Arnaud** ([nicolas.arnaud@ijclab.in2p3.fr](mailto:nicolas.arnaud@ijclab.in2p3.fr))

Laboratoire de Physique des Deux Infinis Irène Joliot-Curie (Université Paris-Saclay & CNRS/IN2P3)  
European Gravitational Observatory (CNRS, INFN & NIKHEF Consortium)



# Je me présente ...

- **Premier voyage à La Réunion**
  - Dans l'hémisphère sud en fait
- 48 ans, **chercheur CNRS** en « physique des deux infinis » depuis 2003
  - **Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3)**
  - Laboratoire d'origine : **IJCLab** (Orsay, près de Paris)
    - Issu de la fusion en 2020 de cinq laboratoires – dont le **LAL**
  - **Détaché à EGO**, laboratoire d'accueil du **détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo**
    - J'habite actuellement à **Florence** en **Italie**
- **Études**
  - **Filière scientifique au lycée** (« **bac C** » en 1992)
  - **Classes préparatoires** (1992-1995)
  - **École Nationale des Ponts et Chaussées** (« **École des Ponts ParisTech** », 1995-1999)
    - 1997-1998 : **année de césure**, **stage d'un an** au **LAL** (groupe **Virgo**, Orsay)
    - **Master 2** (DEA) à la place de la troisième année d'école
  - **Thèse** au **LAL** dans l'expérience **Virgo** (1999-2002)
- **Post-doc** (CDD chercheur) au **CERN** dans l'expérience **LHCb** (2002-2003)
- Recrutement au **CNRS** comme **chargé de recherche** (1<sup>er</sup> octobre 2003)

# Du lycée à « Ponts Paris Tech »

- Lycée Hélène Boucher à Paris

- Bac mention AB



- Classes préparatoires au lycée Marcelin Berthelot à Saint Maur

- M', 5/2

- École Nationale des Ponts et Chaussées

- Nom de marque : « École des Ponts Paris Tech »

- Fondée en 1747

- Déménagement : quartier latin → Champs-sur-Marne



# Les premières années LAL

- Printemps 1997 : préparation du « **stage long** »
  - Normalement une **passerelle vers l'entreprise**
    - Pour moi : **orientation vers la recherche publique**
      - ◆ Filière « **IMI** » : **Ingénierie Mathématique et Informatique**
        - Un **unique** module de « **physique moderne** » : **statistique et quantique**
  - **Candidatures spontanées** envoyées par **courrier postal**
    - ◆ Labos astro/cosmo/particules/spatial de la région parisienne
      - **Une seule réponse** :
        - le groupe **Virgo** du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (**LAL**) à Orsay
  - **Vrai/faux entretien**
    - ◆ Invité par chercheur V
      - Chercheur H présent « par hasard » : mon futur encadrant en fait !
- **Début d'une longue histoire ... qui se poursuit 24 ans plus tard !**



# Les premières années LAL

→ Tout s'enchaîne naturellement ... mais non sans quelques **difficultés** !

- Stage long

- Master 2

- Thèse



## Rapport de Stage long

Nicolas ARNAUD ('99L)  
EI Collège I.M.I  
École Nationale des Ponts et Chaussées

Détection d'ondes gravitationnelles par le détecteur VIRGO:  
Application aux signaux impulsifs  
Coïncidences avec d'autres interféromètres

*Tuteur : Patrice Hello  
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS)  
groupe VIRGO, Bâtiment 208, Université Paris Sud*

1er Septembre 1997 - 31 Août 1998

1



## Rapport de Stage de DEA

Nicolas ARNAUD  
DEA de Physique Théorique de l'École Normale Supérieure  
École Nationale des Ponts et Chaussées

Le Contrôle Global de l'expérience VIRGO

*Tuteur : Fabien Cavalier  
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire IN2P3/CNRS/UPS/  
groupe VIRGO, Bâtiment 208, Université Paris Sud  
B.P. 34, 91898 Orsay Cedex*

18 Janvier 1999 - 26 Février 1999

1

ORSAY  
n° d'ordre :

LAL 02-09  
Mars 2002

UNIVERSITÉ DE PARIS SUD  
CENTRE D'ORSAY

THÈSE présentée

pour obtenir

Le GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ PARIS XI ORSAY

Spécialité : Physique Théorique

par

Nicolas ARNAUD

*Contrôle Global de la partie centrale du détecteur  
d'ondes gravitationnelles Virgo*

*Recherche de signaux impulsifs :  
application aux coïncidences entre interféromètres*

Soutenue le 18 Mars 2002 devant la Commission d'examen

MM. François RICHARD	Président
Bruno ALLEN	Rapporteur
Fabien CAVALIER	Invité
Thibault DAMOUR	
Michel DAVIER	Directeur de Thèse
Adalberto GLAZOTTO	
Jean-Pierre THIBAUD	Rapporteur

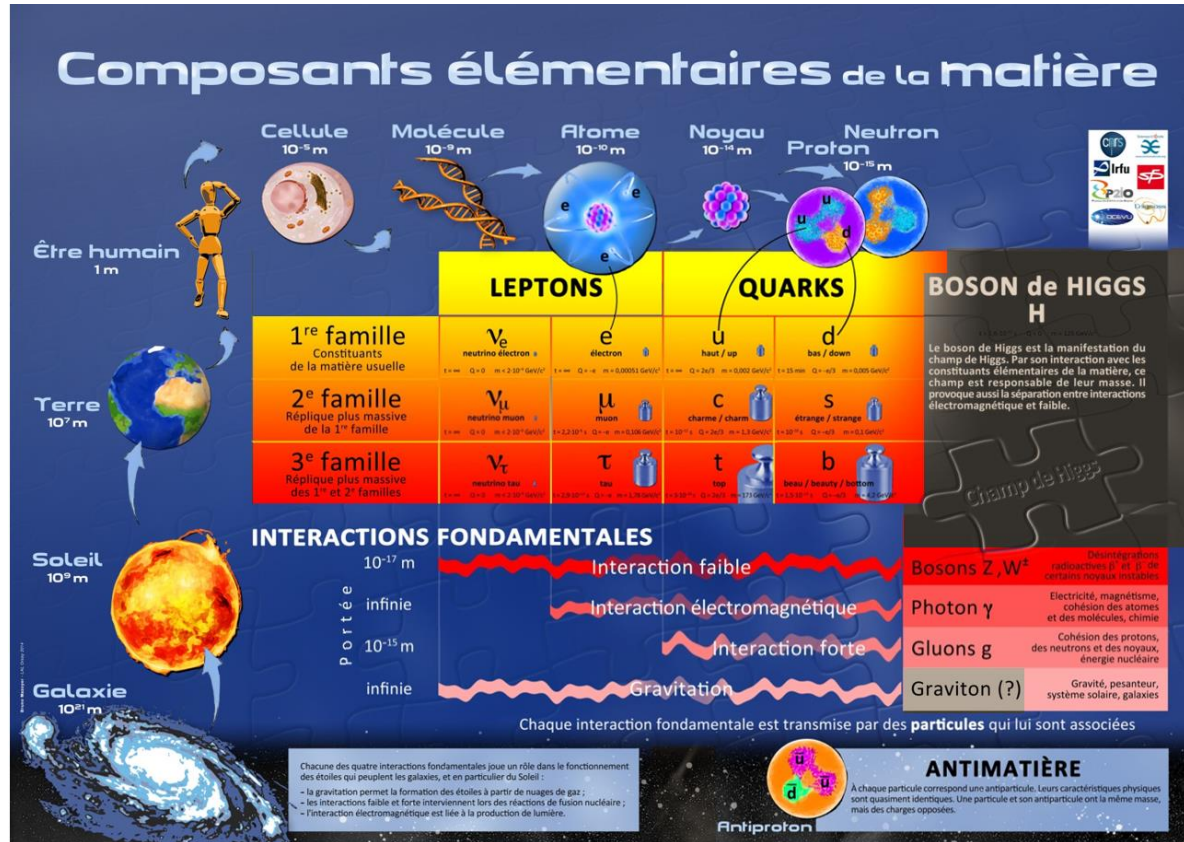
→ Classé sur **liste complémentaire** au concours CNRS 2002

- **Encouragement à re-candidater l'année suivante**

- ♦ Poste de fellow au **CERN** – choix de l'expérience **LHCb**

# LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- Physique des particules
  - Constituants élémentaires de la matière et leurs interactions fondamentales



- Automne 2002
  - -6 ans avant le (vrai-faux) démarrage du collisionneur LHC du CERN
  - -10 ans avant la découverte du boson de Brout-Englert-Higgs (BEH) au LHC

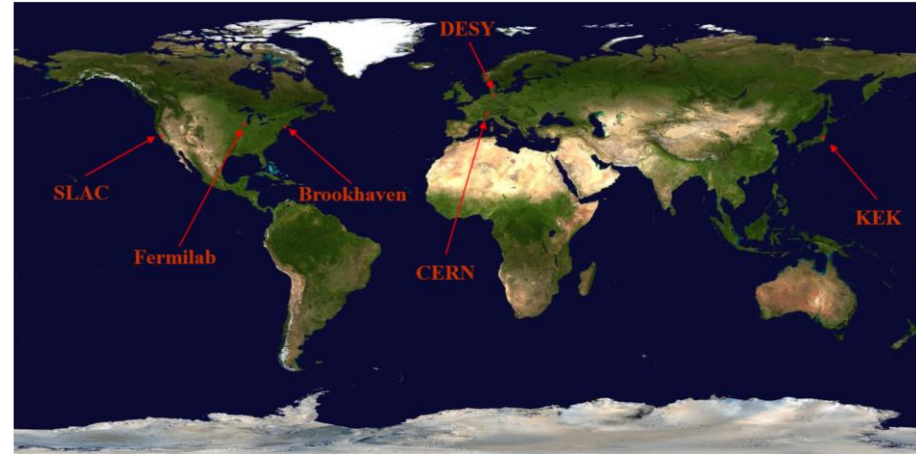
# LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- Carte des grands laboratoires du domaine
  - **CERN**, **SLAC**, etc.

→ **Années 1960-80** : **changement d'échelle**

- **Expériences de plus en plus grosses** :  
construites dans un seul laboratoire,

par la mise en commun de moyens aux échelles nationales puis internationales



- 1949 : idées de **coopération scientifique à l'échelle européenne**
  - **Réconciliation par la science** après la seconde guerre mondiale

• **Dans quel domaine ?**

- Physique nucléaire ↔ enjeux militaires
- **Physique des particules** :  
recherche fondamentale, « neutre »

• **29 septembre 1954** : création de  
**l'Organisation Européenne  
pour la Recherche Nucléaire**

- Acronyme conservé  
(car déjà habituel) : **CERN**

## Ils ont été à l'origine du CERN en France



Raoul Dautry  
(1880-1951)  
Ingénieur et  
homme politique



Lew Kowarski  
(1907-1979)



Louis de Broglie  
(1892-1987)



Francis Perrin  
(1901-1992)



François de Rose  
(1910-2014)  
Diplomate

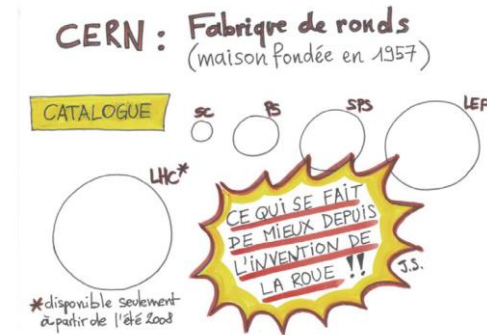


Pierre Auger  
(1899-1993)

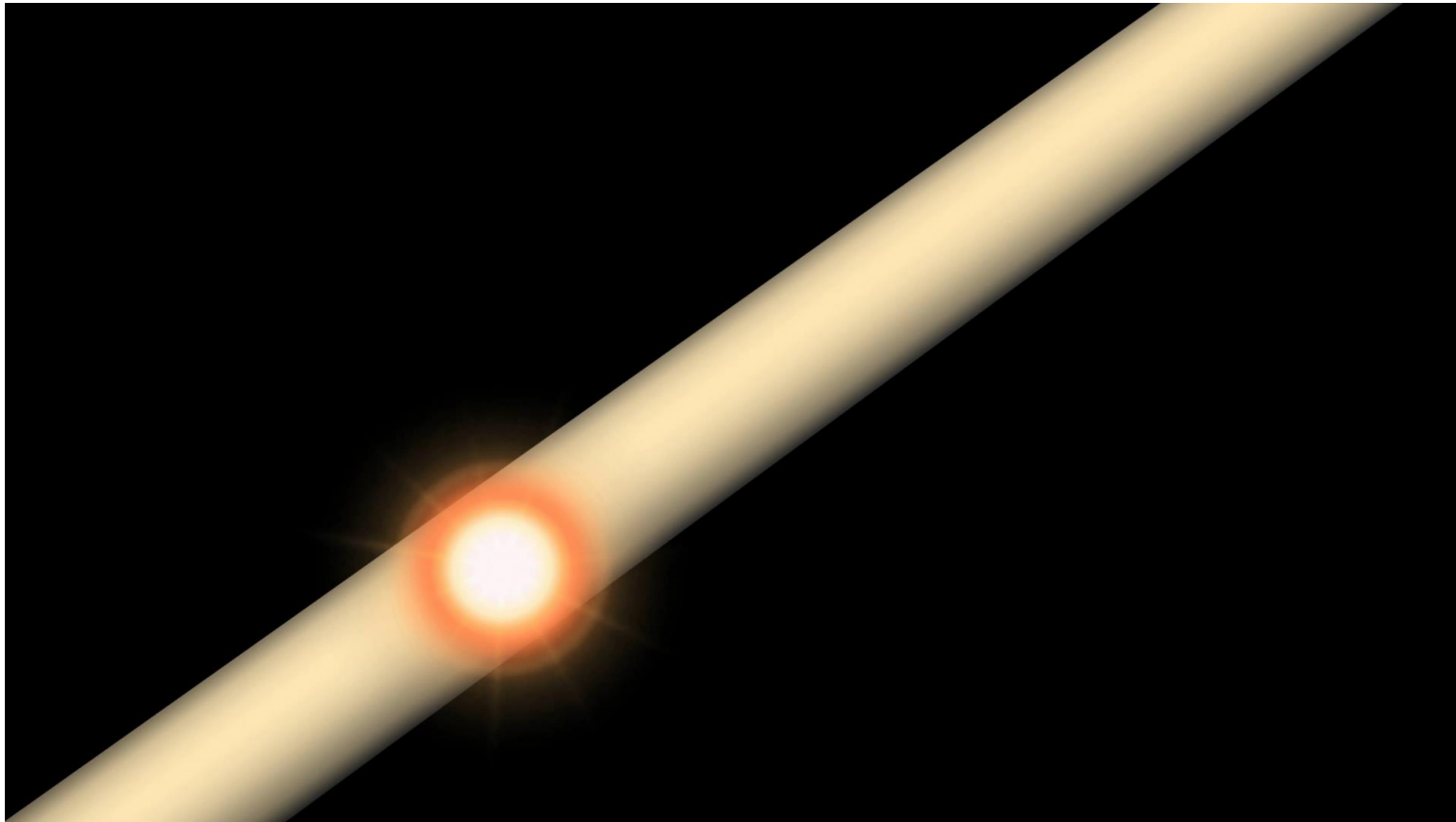
# LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- **Le complexe accélérateur du CERN**

- Une suite de machines construites depuis les années 1950
- Chaque accélérateur sert d'injecteur à la génération suivante



- **LHC : Large Hadron Collider** – collisionneur proton-proton à 6,8 TeV par faisceau



T: téra ( $10^{12}$ )  
eV: électron-volt

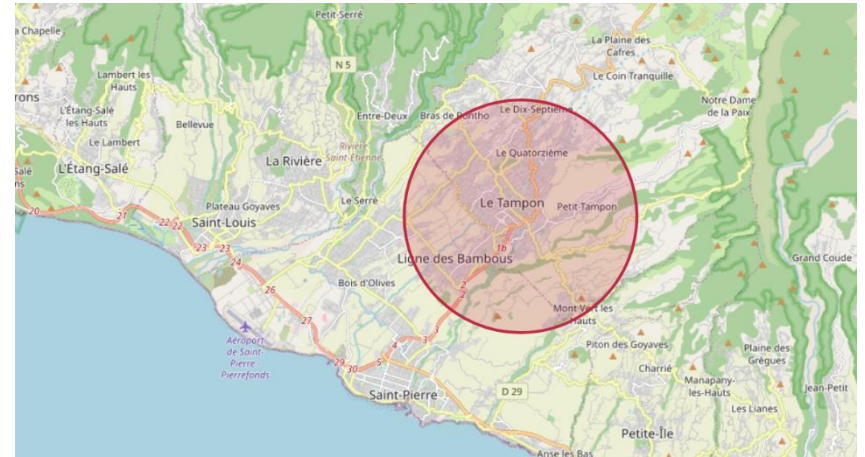
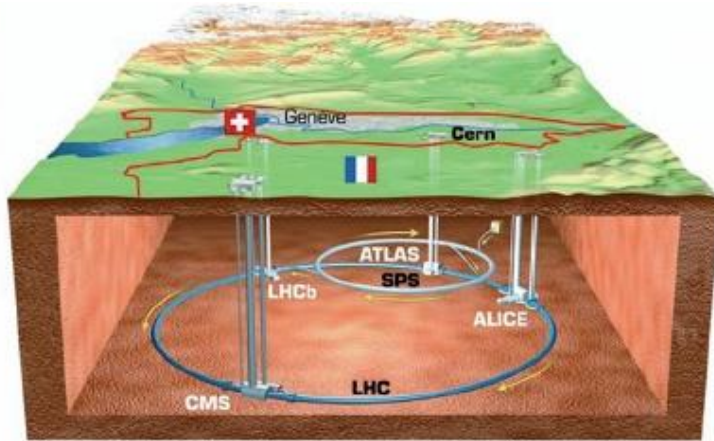
Masse d'un  
proton (p) :  
 $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$

1 TeV =  
1000 GeV



# LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- **LHC**
  - 27 km de circonférence
  - Protons : ~11250 tours / seconde, regroupés en ~2000 paquets de  $10^{11}$  p chacun
  - Collisions à 40 MHz dans les détecteurs géants : ALICE, ATLAS, CMS, LHCb



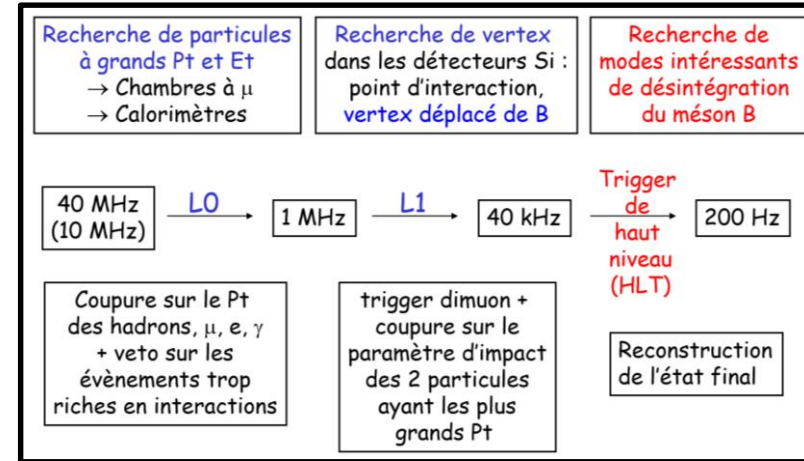
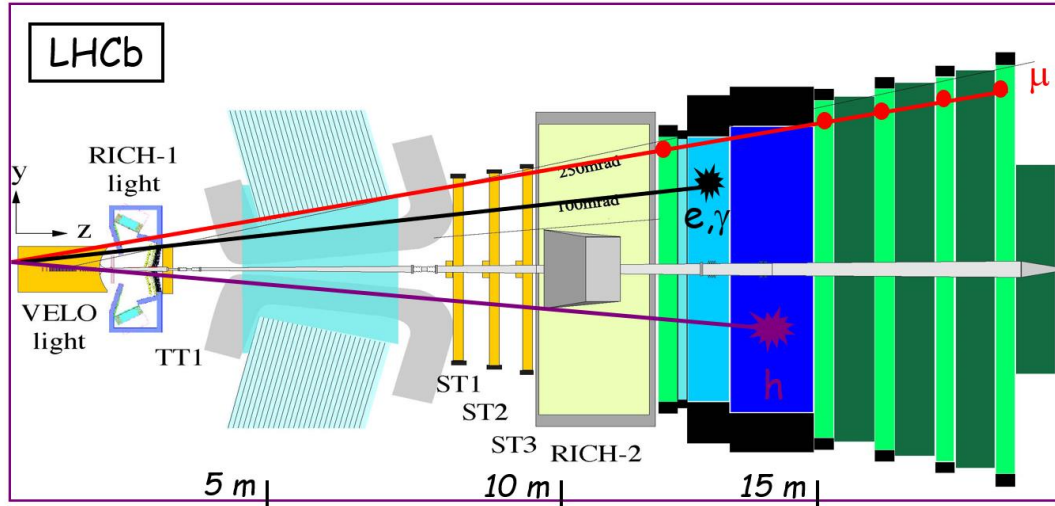
- Des cathédrales de métal et d'électronique !
  - Dimensions de plusieurs dizaines de mètres
  - Poids de plusieurs milliers de tonnes



- Des millions de canaux électroniques reçoivent des informations lors des collisions
  - Les particules déposent de l'énergie en traversant les différents détecteurs ; ces dépôts sont convertis en signaux électriques puis lus et enregistrés

# LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- Le spectromètre **LHCb**
  - Instrumenté dans une seule direction pour étudier une certaine gamme de particules

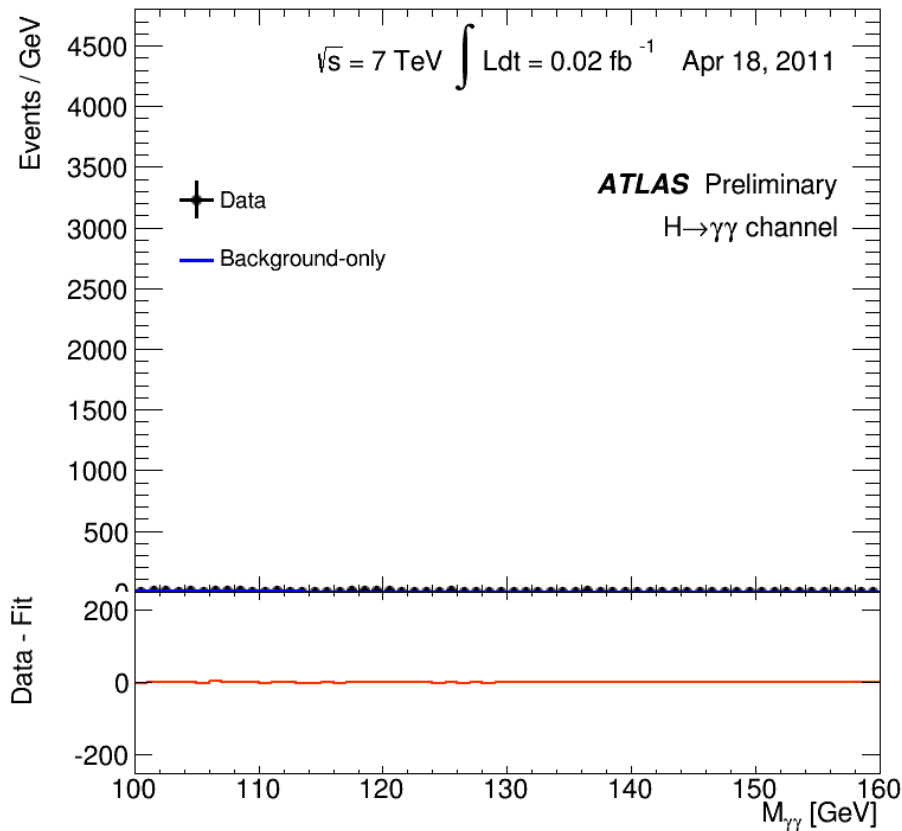


- Travail pendant un an sur le **système de tri des collisions** de LHCb
  - **Volume total de données** : ~ plusieurs Encyclopédia Universalis / seconde
    - Impossible de tout conserver
    - **Sélection en temps réel des événements** : drastique et performante
  - **Trois niveaux successifs** à l'époque
    - **De moins en moins d'événements** à chaque étape
    - **Accès à plus d'informations** et **plus de temps pour les traiter**
  - **Beaucoup de progrès depuis** – 20 ans après !

} **Affinage**  
de la  
sélection

# LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

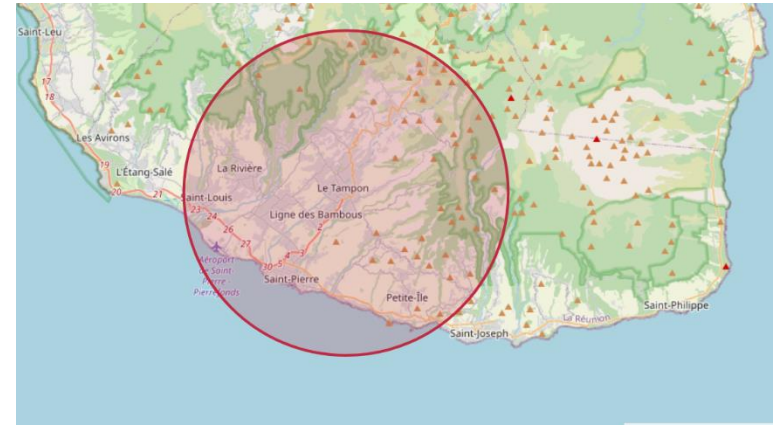
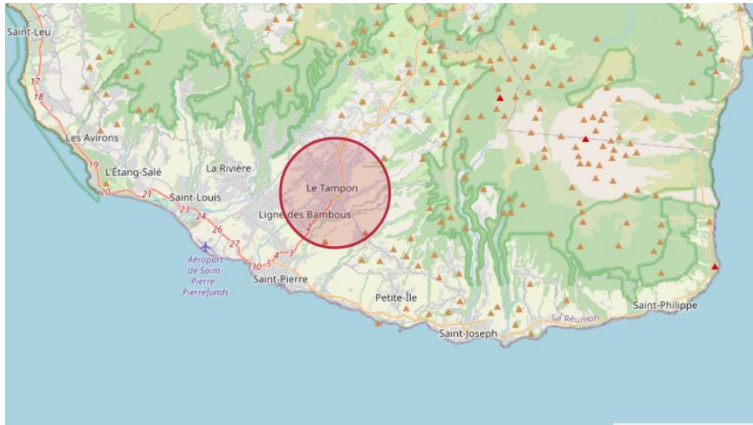
- Retour vers le futur : **4 juillet 2012**, annonce de la **découverte du boson BEH**  
→ Le **signal** sort peu à peu du **bruit de fond** ...



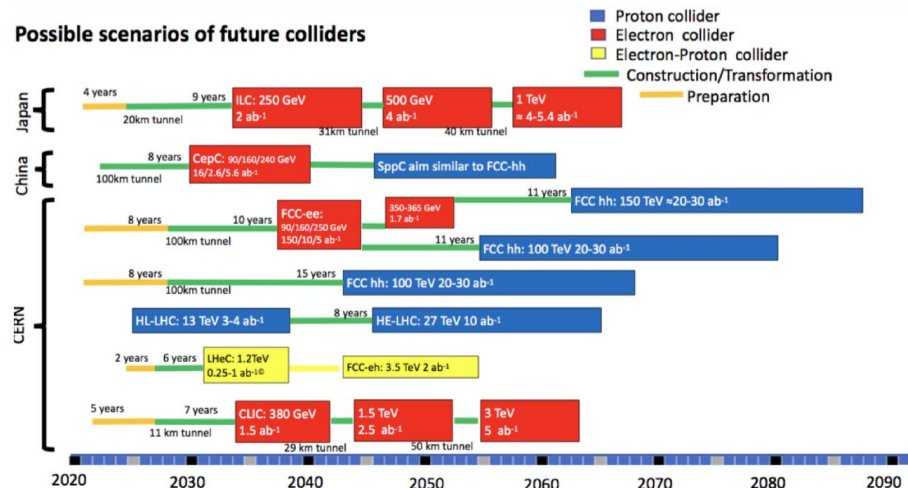
... à mesure que la quantité de données analysées augmente au cours du temps

# LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- Le futur se prépare aujourd'hui (et déjà hier en fait)
  - Études pour un futur collisionneur beaucoup plus grand / beaucoup plus puissant
- LHC
  - FCC [ordre de grandeur]



- Un exemple de planning à très, très, très long terme ...



# CNRS

- Reçu au concours 2003 du CNRS :  
6 postes pour ~90 candidats
    - Impossible de terminer mon fellow au CERN :  
poste à pourvoir immédiatement !
    - Décision (imposée) à prendre :  
mobilité thématique ou géographique  
→ Mon choix : rester au LAL mais  
passage sur l'expérience BaBar
      - ◆ Perspective : partir aux Etats-Unis  
au bout d'un an  
(après titularisation)
- Me voilà fonctionnaire de l'État Français ...

CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

EXTRAIT NO 002  
DE LA DECISION COLLECTIVE 2509987

DELEGATION ILE-DE-FRANCE SUD

AVENUE DE LA TERRASSE  
91190 GIF-SUR-YVETTE  
TEL.01-63-82-30-30

CHERCHEURS

LE DIRECTEUR GENERAL DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

-VU LA LOI NO 82-610 DU 15 JUILLET 1982 MODIFIEE  
-VU LA LOI NO 83-634 DU 13 JUILLET 1983 MODIFIEE  
-VU LA LOI NO 84-16 DU 11 JANVIER 1984 MODIFIEE  
-VU LE DECRET NO 94-874 DU 7 OCTOBRE 1994 MODIFIE  
-VU LE DECRET NO 83-1260 DU 30 DECEMBRE 1983 MODIFIE  
-VU LE DECRET NO 84-1185 DU 27 DECEMBRE 1984 MODIFIE  
-VU L'AVIS DE L'INSTANCE D'EVALUATION

DECIDE :

NOM : ARAUD - ARTICLE UNIQUE - PRENOM : NICOLAS NO-AGENT : 8010796

GRADE : CR2 ECHELON : 005 INDICE : 0544

POSTE NO : 210309 QUOTITE : 100

AFFECTE(E) A C8607 LAL SECTION : 03

DIRIGE(E) PAR MR D ALMAGNE

EST TITULARISE(E) A COMPTER DU 01/10/2004 AU TERME DE SON STAGE.

GRADE : CR2 ECHELON : 005 INDICE : 0544

AVEC UNE ANCIENNETE DE 01 AN 08 MOIS 00 JOURS

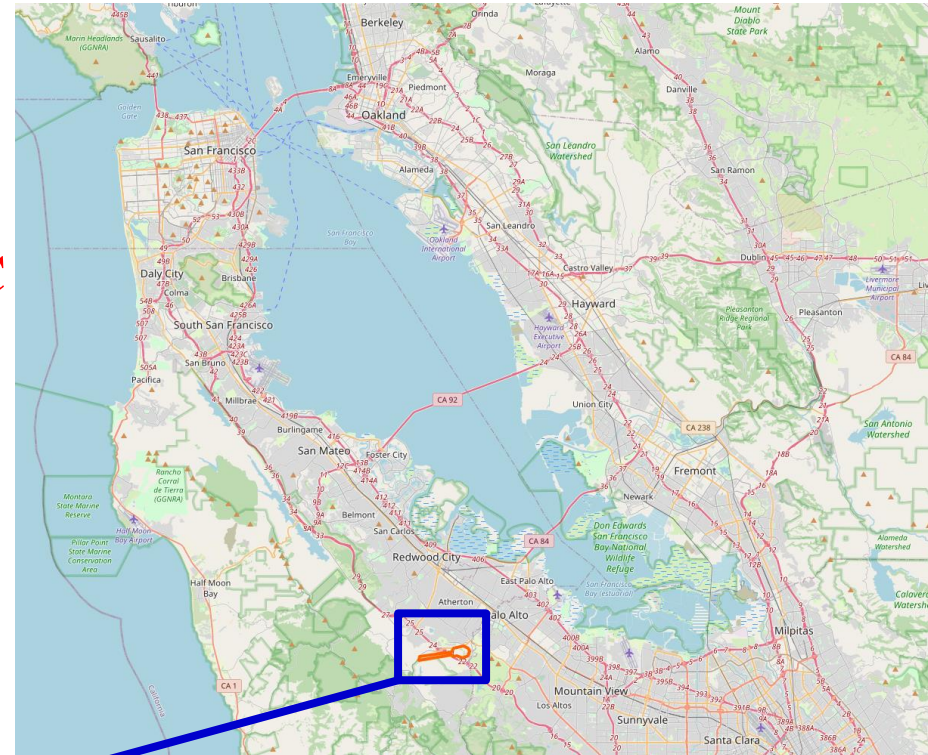
A GIF-SUR-YVETTE , LE 26/01/2005

POUR LE DIRECTEUR GENERAL DU C.N.R.S.  
ET PAR DELEGATION  
LE DELEGUE REGIONAL  
J.P. CARESSA

# Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

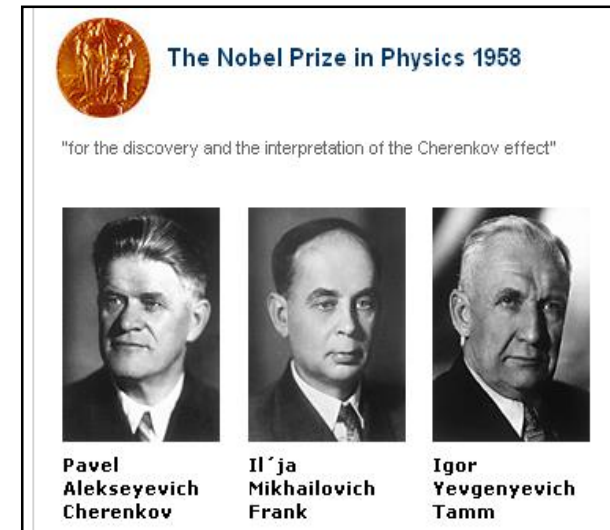


- **France** (CNRS + CEA) : responsable d'une partie du détecteur BaBar : le **DIRC**  
→ **Détaché sur place** (SLAC, près de l'Université Stanford, CA)  
**pour m'en occuper**
  - Hardware, software, performances, qualité des données, system manager
- SLAC National Accelerator Laboratory



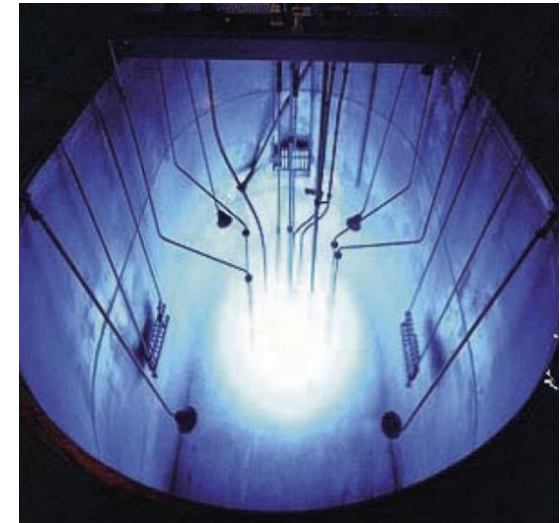
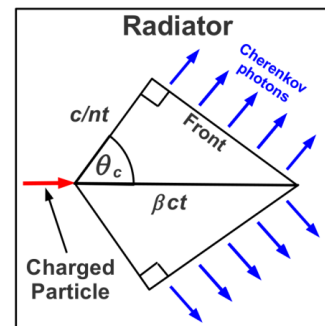
# Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

- **DIRC** : **D**etector of **I**nternally **R**elected Cherenkov light
- **Effet Cerenkov** : les **particules chargées** qui se déplacent **plus vite que la lumière** dans un **milieu diélectrique** ( $c/n$ ) **émettent des photons le long de leur trajectoire**.  
→ **Equivalent du passage du mur du son pour un avion**



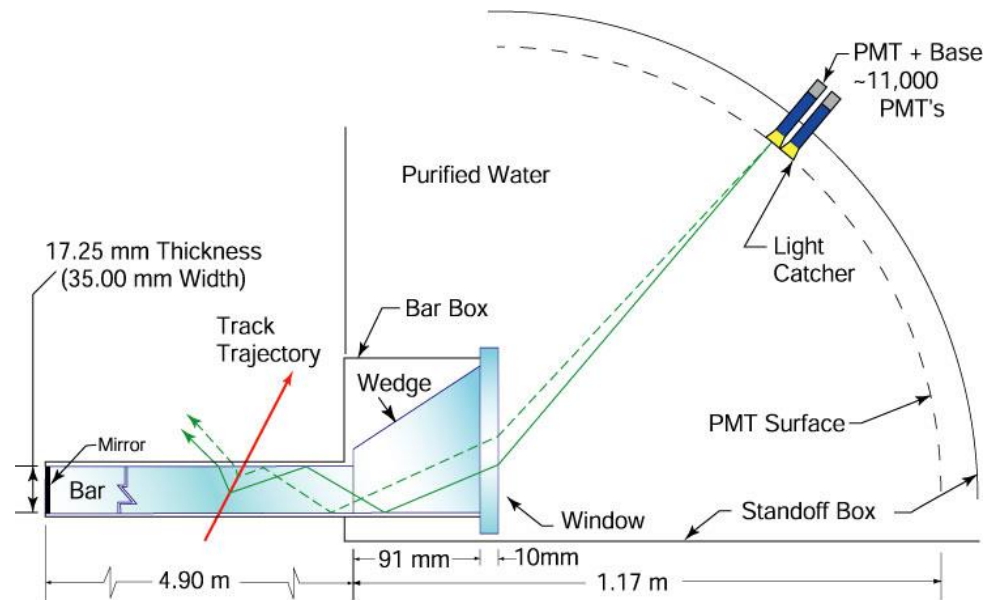
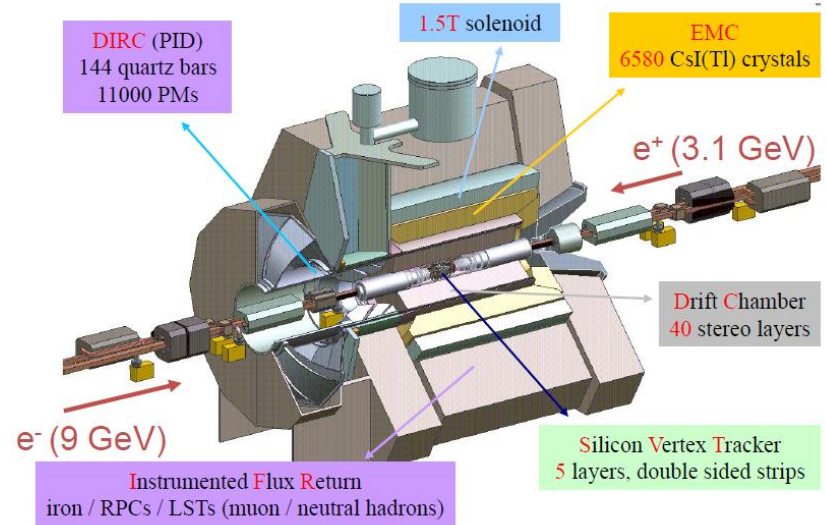
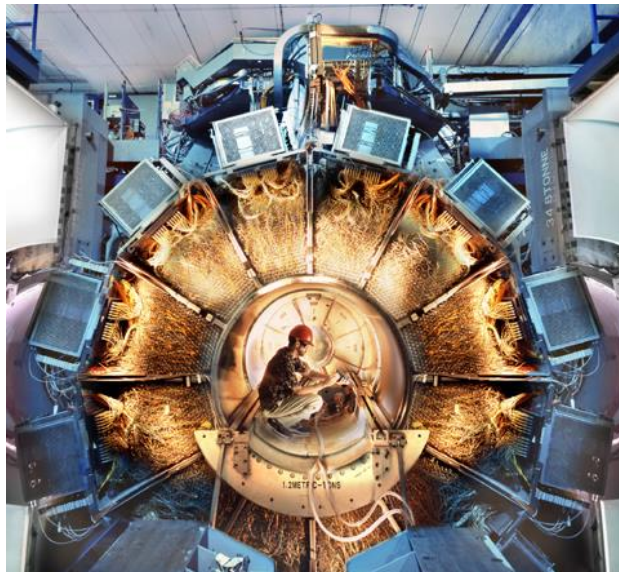
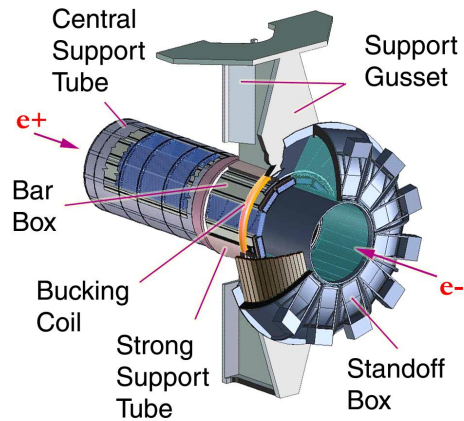
- **L'angle du cône dépend de la vitesse  $v$** , rapportée à celle de la lumière ( $\beta=v/c$ )
  - **Seuil** :  $\beta > 1/n$
- Utilisé pour **déterminer la masse** (et donc **la nature**) d'une particule
  - Mesures de **l'impulsion** (quantité de mouvement) et de la **vitesse**  
→ **Masse** → **Type de la particule**

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$



# Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

- **DIRC** : **D**etector of **I**nternally **R**elected **C**herenkov light

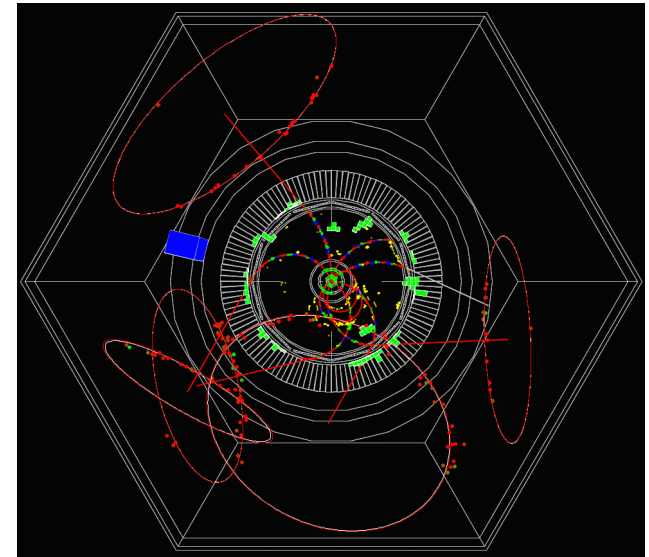
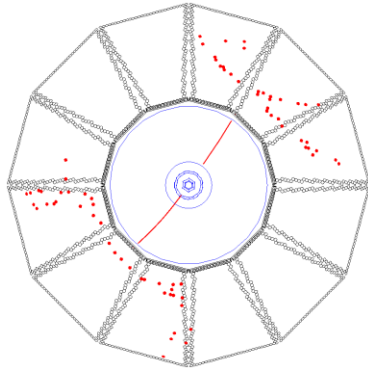


4 x 1.225 m  
Synthetic Fused Silica  
Bars glued end-to-end

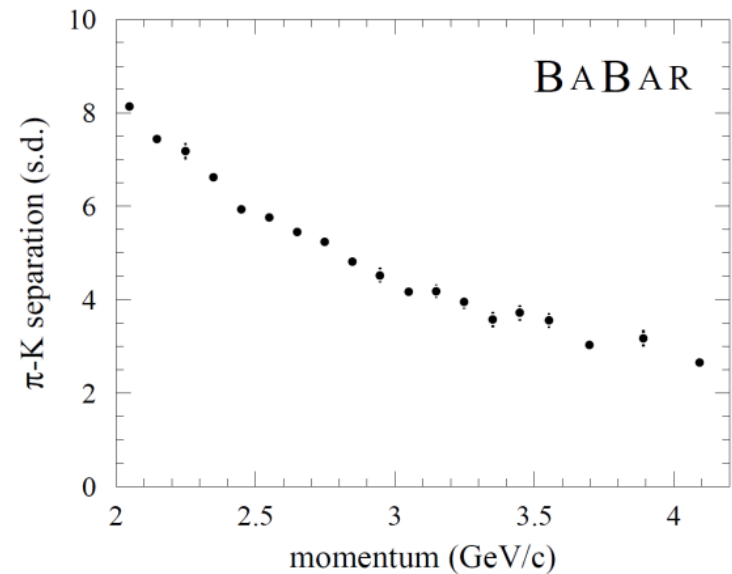
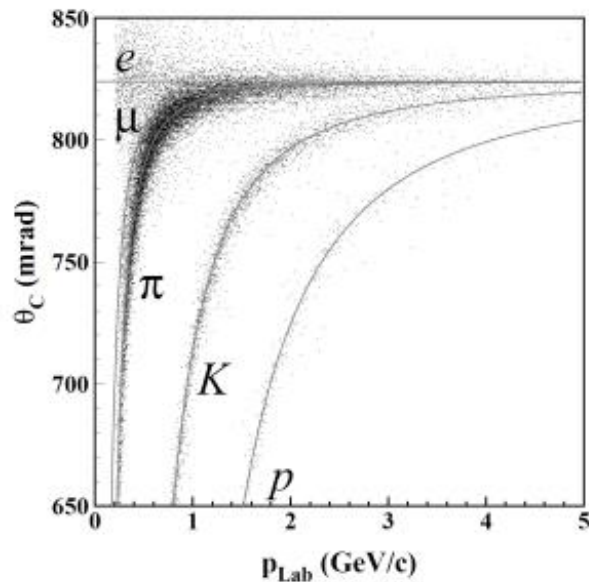


# Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

- **DIRC** : **D**etector of **I**nternally **R**elected **C**herenkov light

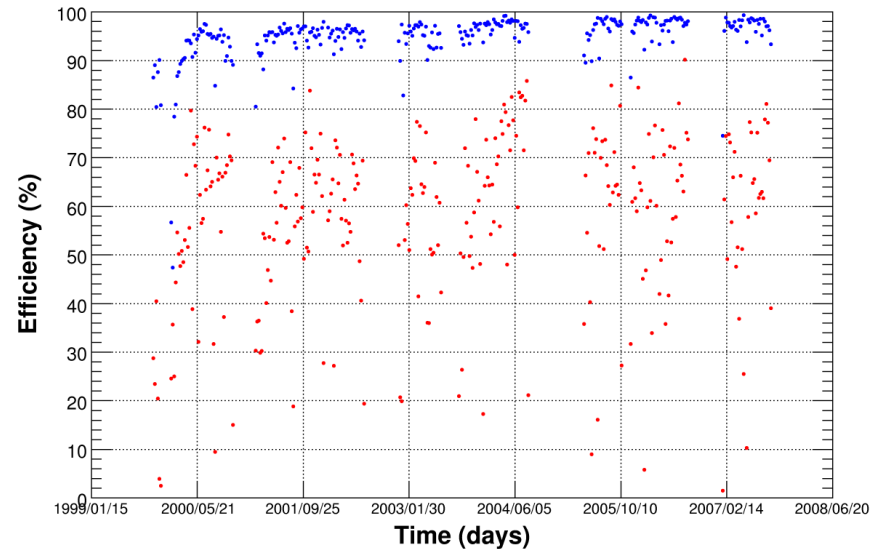
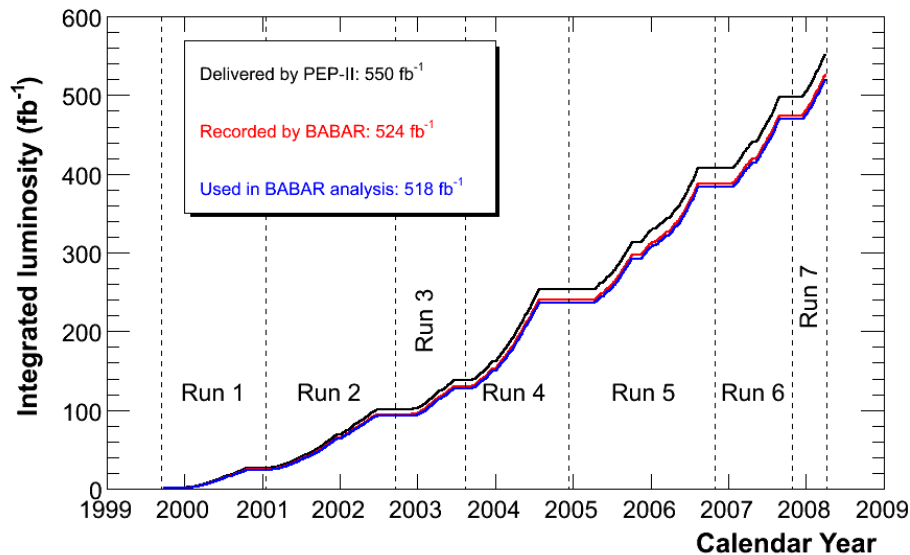


→ Principalement utilisé pour **séparer pions** ( $\pi$ ) et **kaons** (K)



# Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

- **BaBar** : « usine » de production de particules – **B-Factory**
  - Concurrence avec **Belle** au Japon (**KEK-B**)
- **Enregistrer le plus d'événements (intéressants) possible**
  - **Produire le plus de collisions possible** (accélérateur de SLAC moins performant)
  - **Maximiser le rendement du détecteur**
  - **Identifier au vol les événements les plus intéressants et les enregistrer**
  - **Contrôler la qualité des données** – brutes comme reconstruites
- **24h/24, 7 jours sur 7** : astreintes, organisation en « trois-huit »



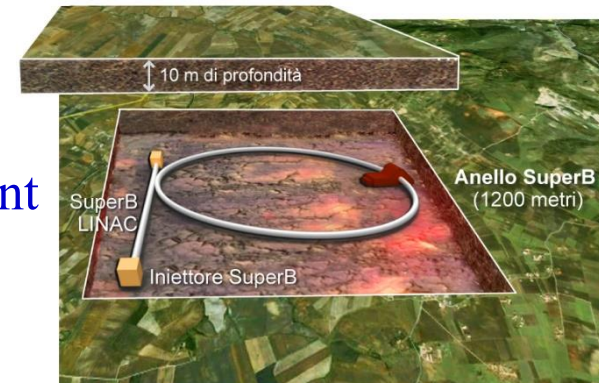
PEP-II: 55.28%

1999-Oct-22 → 2007-Sep-07

BaBar: 95.71%

# Le projet SuperB à Frascati (2009-2013)

- Projet de « **super-usine** » à particules
  - **100 fois plus de données que BaBar**, accumulées en quelques années
    - **Accélérateur** très **performant**
    - **Détecteur** capable de **tenir le choc** et de **suivre la cadence**
    - **Budget** à garder **sous contrôle**
      - ◆ **Le pays hôte est celui qui contribue (paye) le plus**
      - ◆ **Nouvel accélérateur / réutilisation de composants de BaBar pour le détecteur**
- Un nouveau projet de cette taille doit « **faire ses preuves** »
  - Au sein de la **communauté scientifique** : agréger des **chercheurs / labos / pays**
  - **Après des tutelles et des agences de financement**
  - **Qu'est-ce-qu'il apporte par rapport aux expériences existantes ou prévues ?**
- **Compétition** toujours **difficile**, souvent **âpre** et **longue**
  - Au final, **SuperB a « perdu »** cette bataille :  
**refus du pays hôte (l'Italie) de s'engager financièrement**
- Un **mal** pour un **bien**
  - **Refus** de devenir un « **projet zombie** »
  - **On fait son deuil et puis on passe à autre chose ...**



# Virgo acte II (2014 – actuellement)

- **Moins de deux ans avant la découverte des ondes gravitationnelles**
  - Mais personne ne le sait alors !

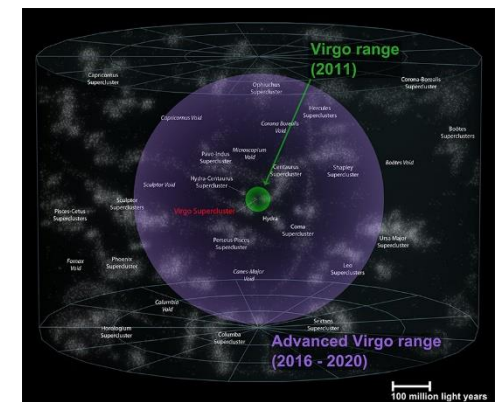
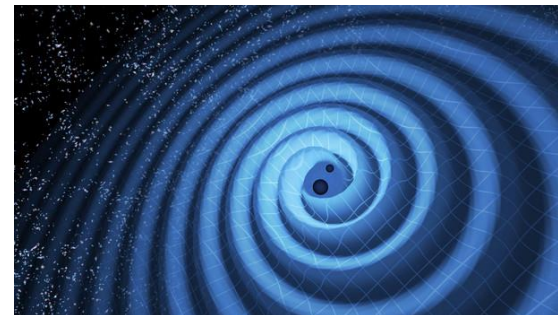
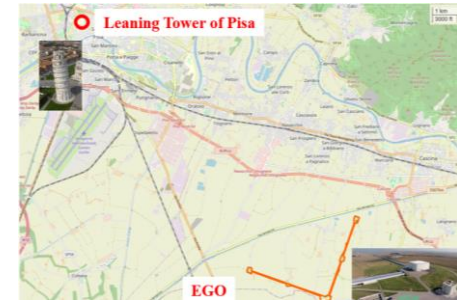
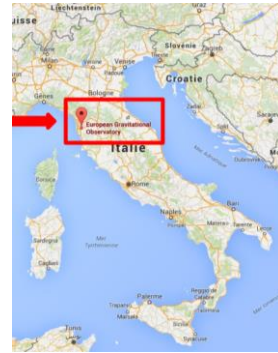
→ **Les temps longs de la recherche**

- ~50 ans pour le boson BEH / ~1 siècle pour les ondes gravitationnelles

<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>1916 : Prédications des OG (Einstein)</b></li><li>• <b>1957 : Conférence de Chapel Hill</b></li><li>• <b>1963 : Trous noirs de Kerr</b></li><li>• <b>1990's : développements théoriques pour la coalescence de systèmes binaires (Blanchet, Damour, Deruelle, Iyer, Will, Wiseman, etc.)</b></li><li>• <b>2000 : Idem pour le cas de systèmes binaires de 2 trous noirs (Buonanno, Damour)</b></li><li>• <b>2006 : simulations de la fusion de deux trous noirs (Baker, Lousto, Pretorius, etc.)</b></li></ul>	<p><i>Théorie</i></p> <p><i>Expérience</i></p> <p>(Bondi, Feynman, Pirani, etc.)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>1960's : premières barres de Weber</b></li><li>• <b>1970 : premier prototype d'ITF (Forward)</b></li><li>• <b>1972 : Etudes de faisabilité détaillées (Weiss)</b></li><li>• <b>1974 : PSRB 1913+16 (Hulse &amp; Taylor)</b></li><li>• <b>Années 1980 : Prototypes (~10 m de long) (Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)</b></li><li>• <b>Fin des années 1980 : projets Virgo &amp; LIGO</b></li><li>• <b>Années 1990 : LIGO et Virgo financés</b></li><li>• <b>2005-2011 : premières prises de données</b></li><li>• <b>2007 : accord Virgo-LIGO – partage des données, analyses et publications communes</b></li><li>• <b>2012 : financement des détecteurs avancés</b></li><li>• <b>2015 : démarrage de LIGO avancé</b></li><li>• <b>2017 : démarrage de Virgo avancé</b></li><li>• <b>À suivre ...</b></li></ul> <p>} Premières découvertes !</p>
---	--

# Virgo acte II (2014 – actuellement)

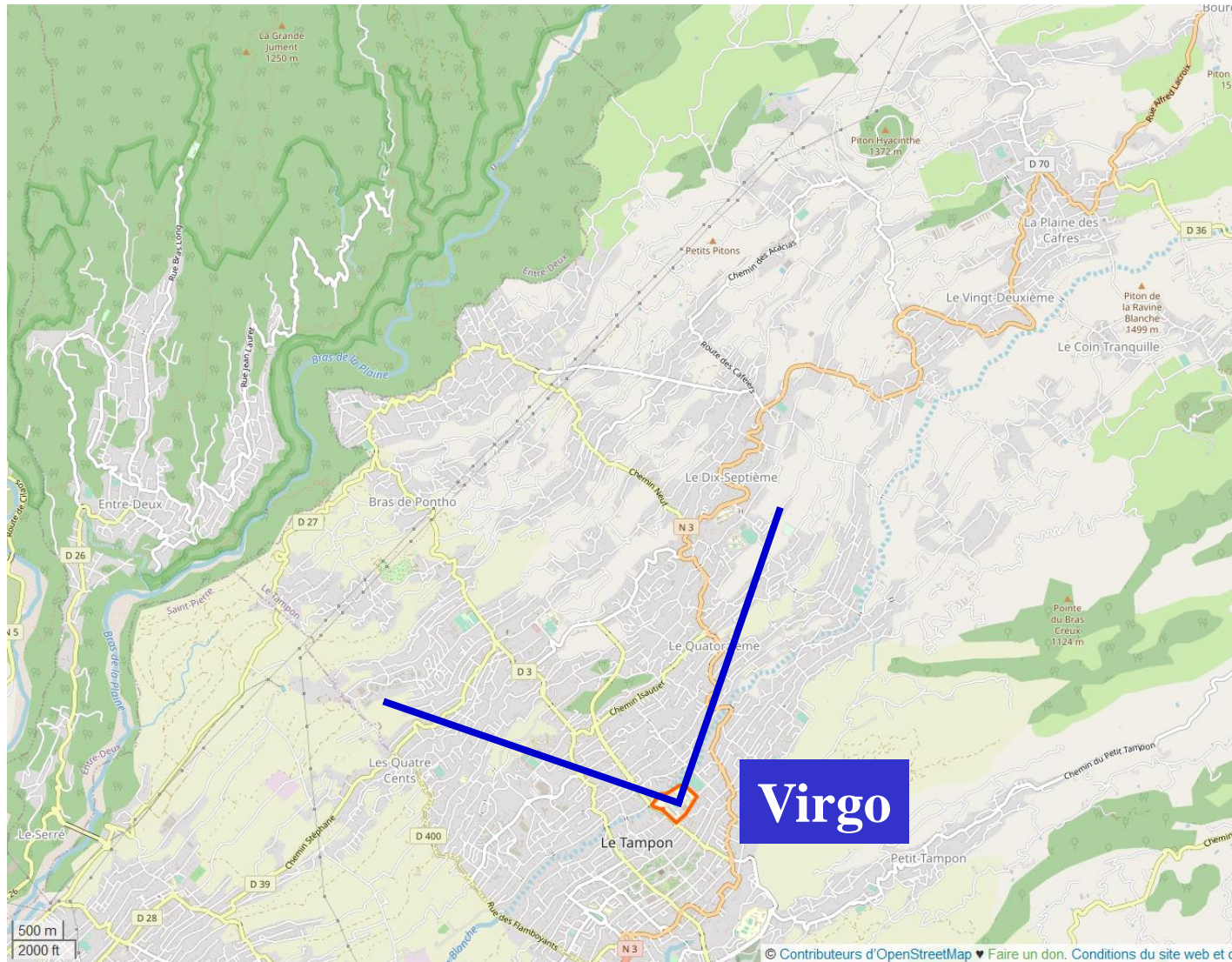
- **Détachement sur site** prévu pour la rentrée 2015
  - Repoussée d'un an suite à des problèmes familiaux  
→ Installation à **Florence** à l'été 2016 – depuis six ans
- **Les ondes gravitationnelles (OGs) : une des premières prédictions de la relativité générale (1916)**
  - Les masses accélérées induisent des perturbations de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière en s'atténuant comme l'inverse de la distance
- **Faiblesse de la gravitation**
  - Rigidité de l'espace-temps  
→ Si toute masse accélérée émet des OGs, aucune source terrestre n'en émet assez pour être détectable
- **Sources : phénomènes violents dans le cosmos**
  - Rares dans la région d'Univers observable  
→ Voir (un peu) plus loin donne potentiellement accès à (beaucoup) plus de sources





# Virgo acte II (2014 – actuellement)

- **Virgo** au lycée Roland Garros



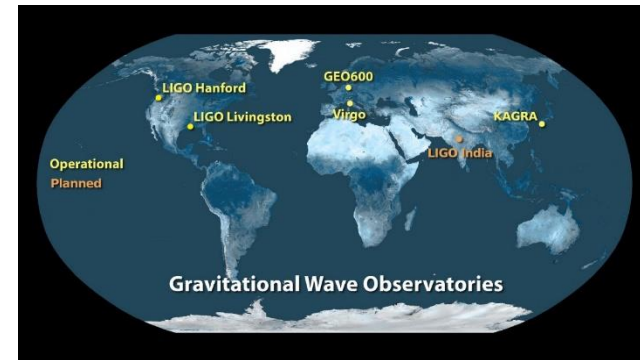
# Virgo acte II (2014 – actuellement)

- L'union fait la force : le **réseau de détecteurs LIGO-Virgo-KAGRA**



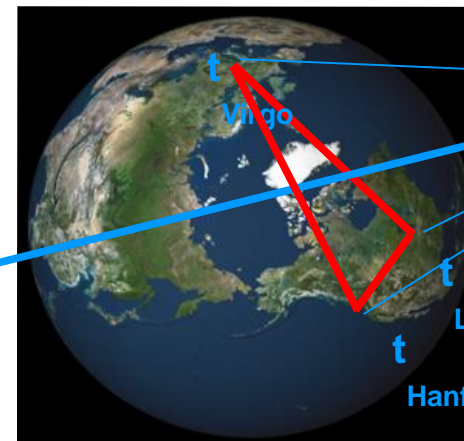
→ Permet de **mieux séparer les vrais signaux d'OGs** (a priori présents dans plusieurs détecteurs) **des bruits** (a priori limités à un instrument particulier)

→ **Triangulation** : estimation de la position de la source



- **Chaque collaboration** est responsable de son détecteur et de la prise de données
- **Toutes les données** sont mises en commun et analysées de manière conjointe
- **Résultats publiés** au nom du réseau entier
- **Données publiques** après une « période d'exclusivité »

★ **GHOST**



**SOURCE**

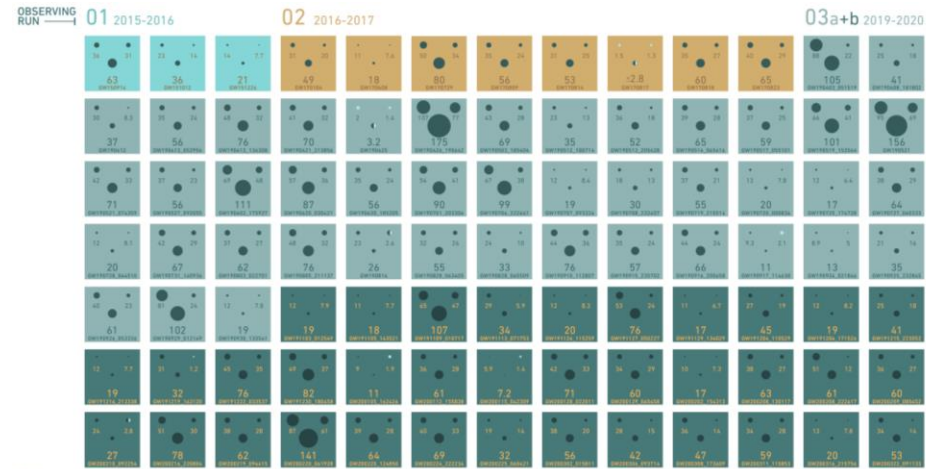
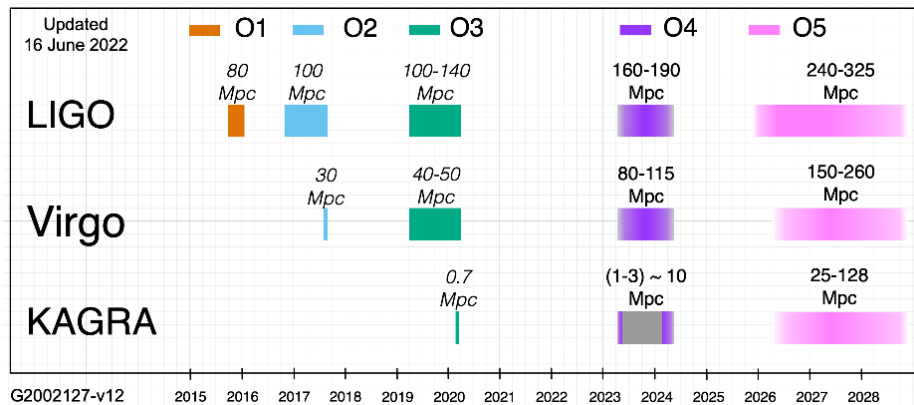
IFO Pair	$\Delta t$ max (ms)
V-H	27.20
V-L	26.39
H-L	10.00

- [Gravitational Wave Open Science Center](#)

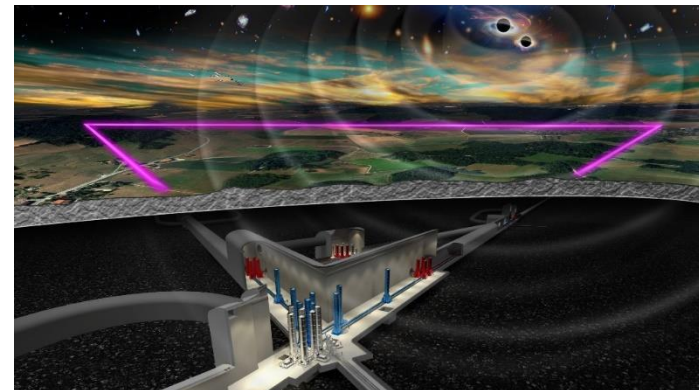


# Virgo acte II (2014 – actuellement)

- **Alternance** de périodes de prise de données et d'arrêts pour améliorations
  - **Détection de ~90 signaux** entre septembre 2015 et mars 2020
  - **Phase d'amélioration depuis**
    - Ralentie par la pandémie de covid-19
  - **Démarrage d'une nouvelle prise de données au printemps 2023**
    - <https://observing.docs.ligo.org/plan>



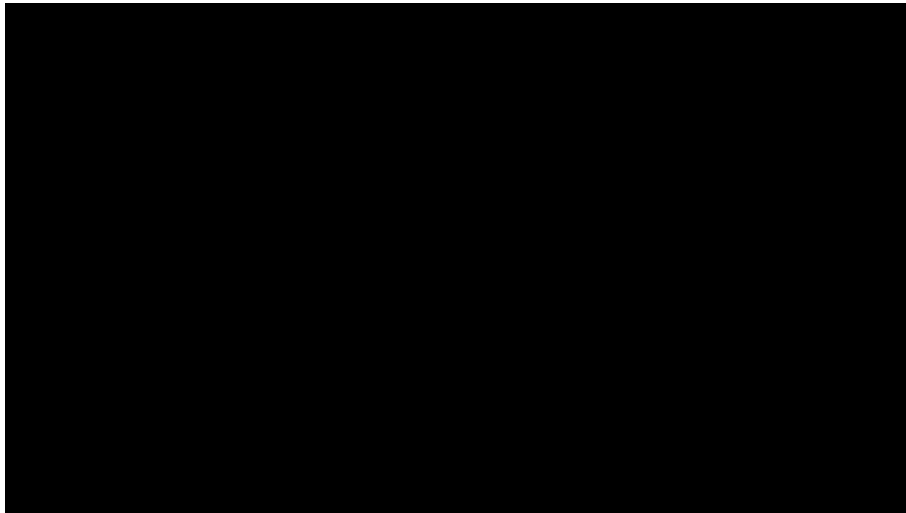
- **Objectif à moyen-long terme** : pousser les infrastructures existantes à leurs limites
- **Objectif à plus (très) long terme** : des détecteurs de troisième génération
  - En Europe : le **Einstein Telescope (ET)**



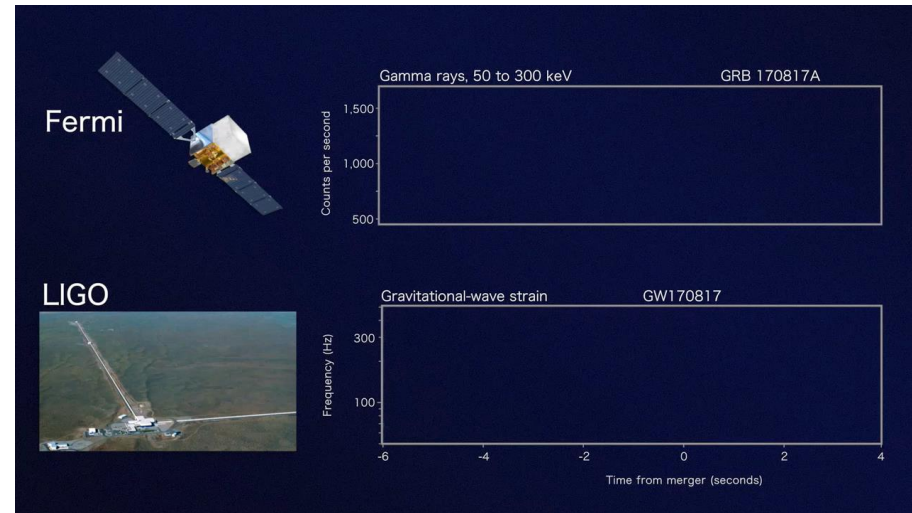
# Virgo acte II (2014 – actuellement)

- **Une détection historique** : GW170817

- Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine, très lointaine ...



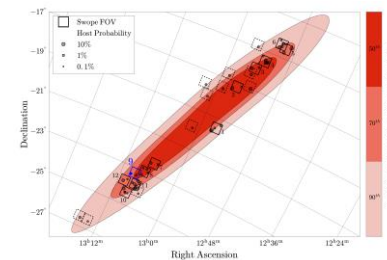
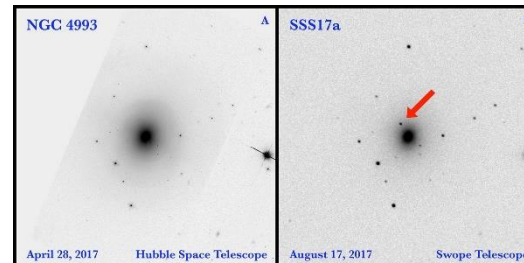
- Le **17 août 2017, 14h41 heure de Paris** sur Terre et en orbite ...



- **19h55** : localisation LIGO-Virgo

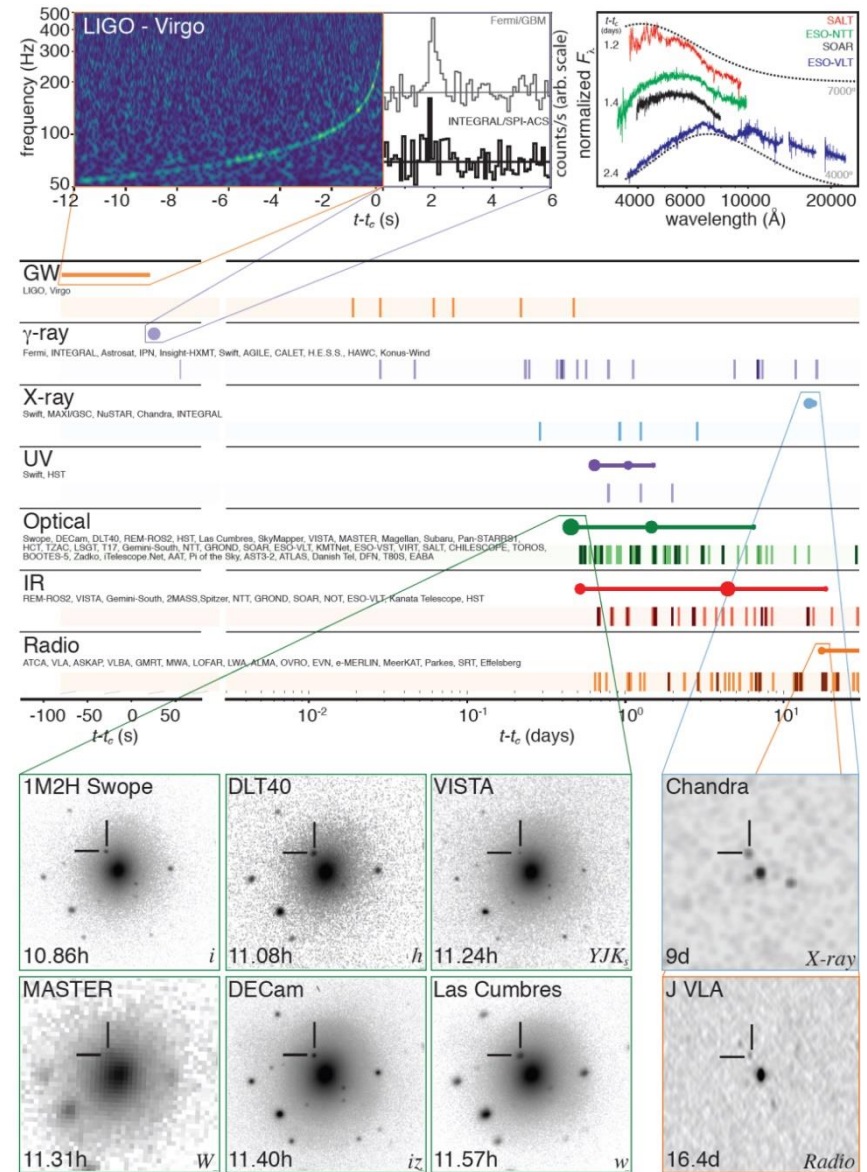
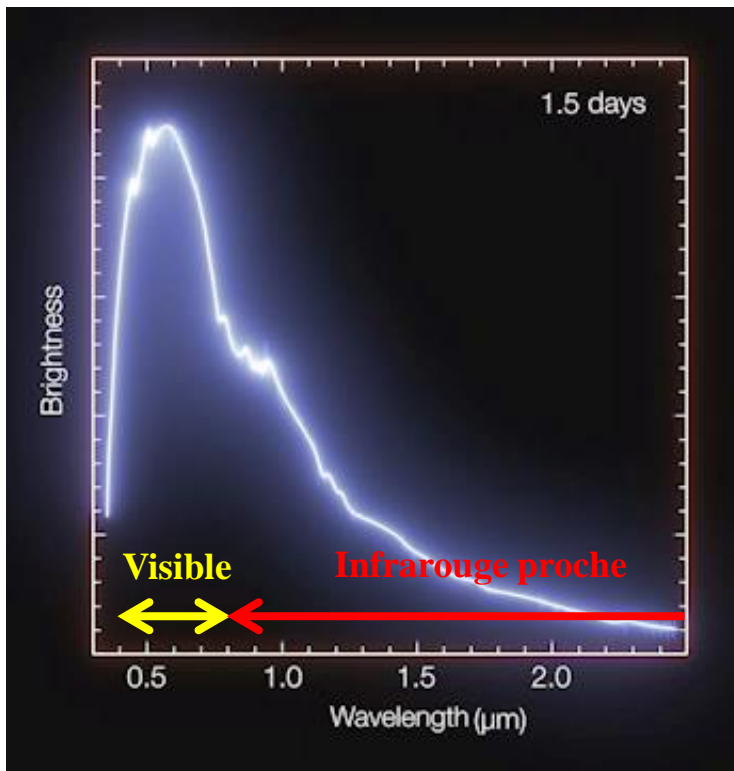


- **01h33** le 18/08 : télescope SWOPE



# Virgo acte II (2014 – actuellement)

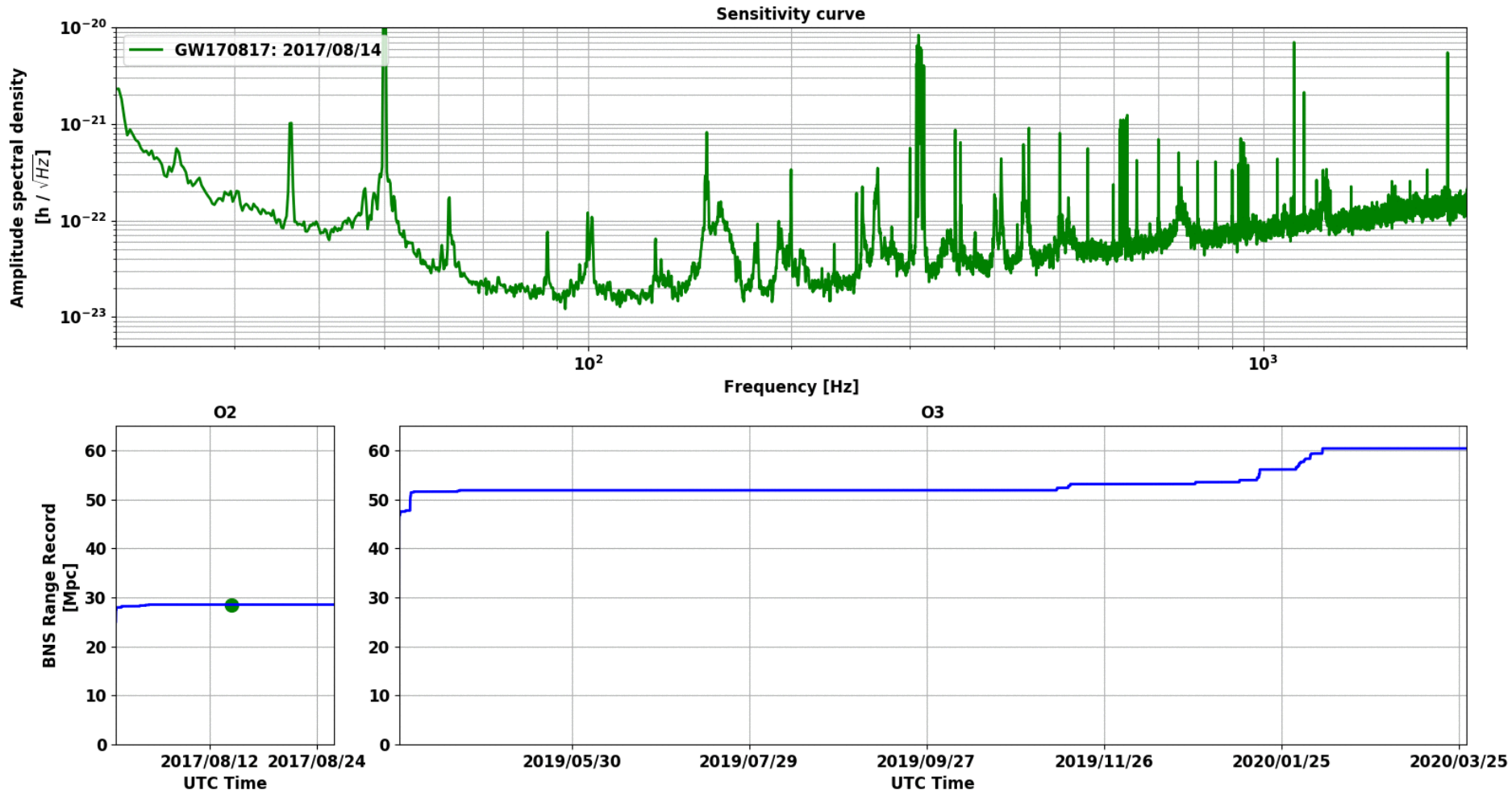
- Astronomie multi-messagers
  - Ondes gravitationnelles, sursauts gamma, l'ensemble du spectre électromagnétique



# Virgo acte II (2014 – actuellement)

- Amélioration des performances du détecteur Virgo en 2017-2020

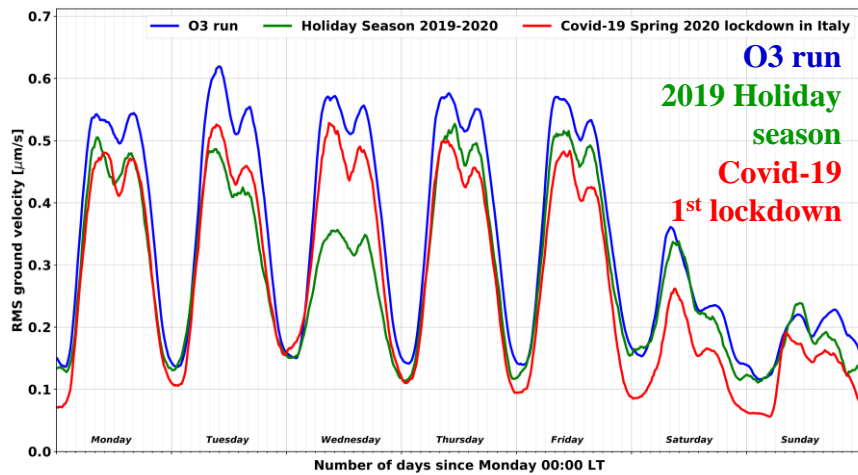
Advanced Virgo sensitivity improvement during O3 and comparison with O2



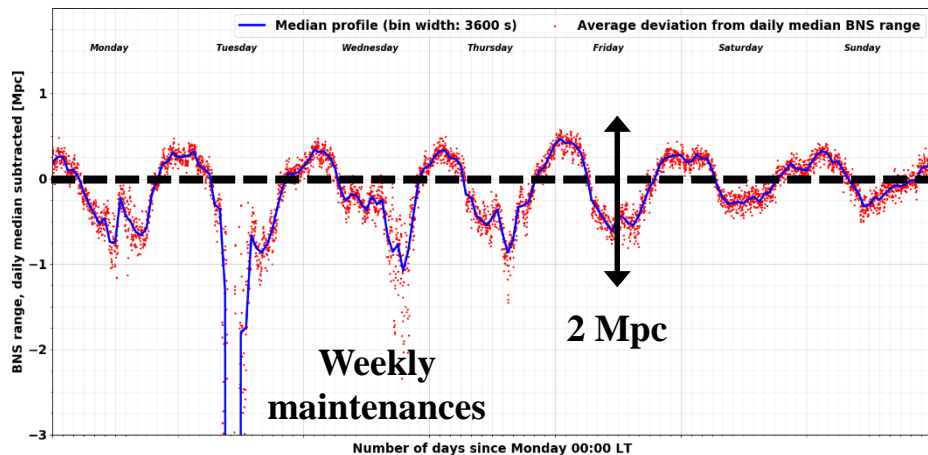
# Virgo acte II (2014 – actuellement)

- Impacts du bruit sismique

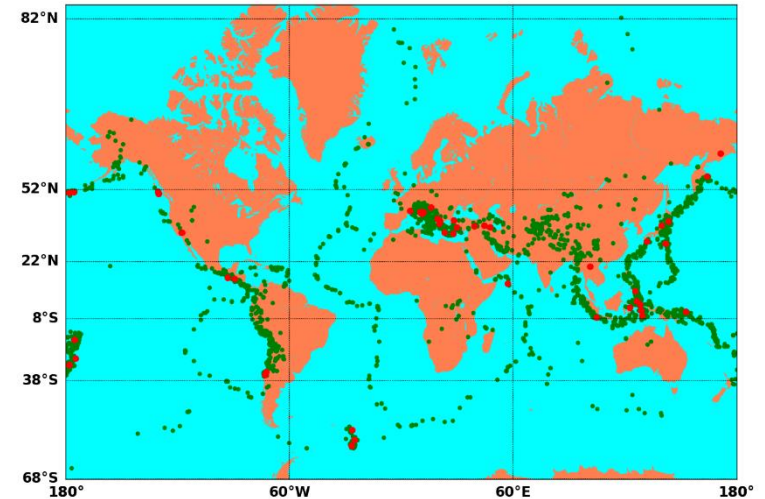
- Composante anthropogénique



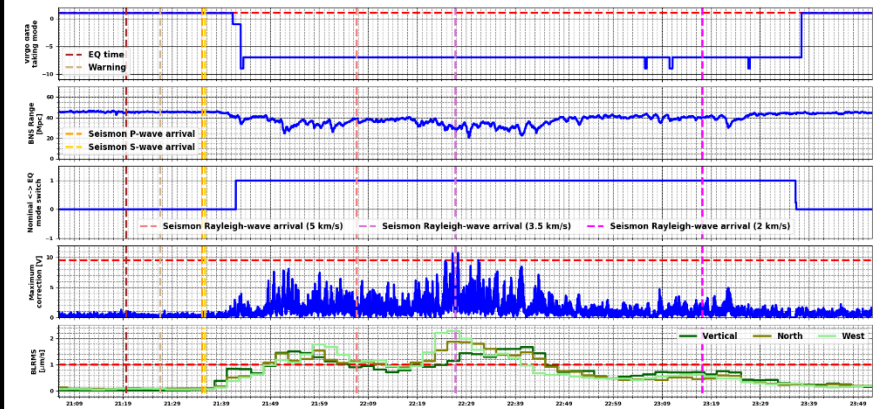
- Estimation de la sensibilité



- Tremblements de terre



- Survivre à un fort séisme



# Conclusions

- Un parcours de presque 25 ans en recherche fondamentale publique
  - La mi-temps est passée ...
  - Espérons qu'il reste encore quelques bonnes années !
- De (petites) pierres à un grand édifice
- Une grande diversité de métiers et d'activités
  - Il y en a pour tous les goûts !
- Du travail pour les générations futures
  - Pourquoi pas vous ?
- Un élément supplémentaire à prendre en compte
  - Développement durable, économie, frugalité
- Valable dans absolument tous les domaines
  - ♦ Chacun doit apporter sa (petite) pierre à ce (grand) édifice