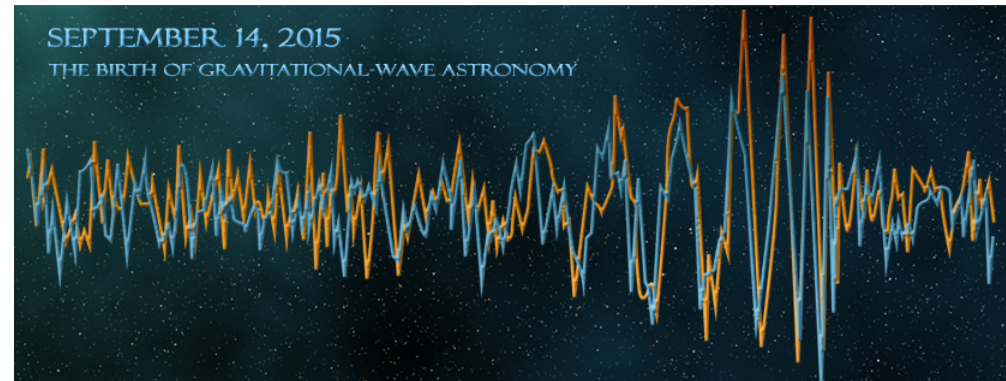


A l'aube d'une nouvelle **astronomie** : la **découverte des ondes gravitationnelles**

06 Février 2017, UTT – Troyes

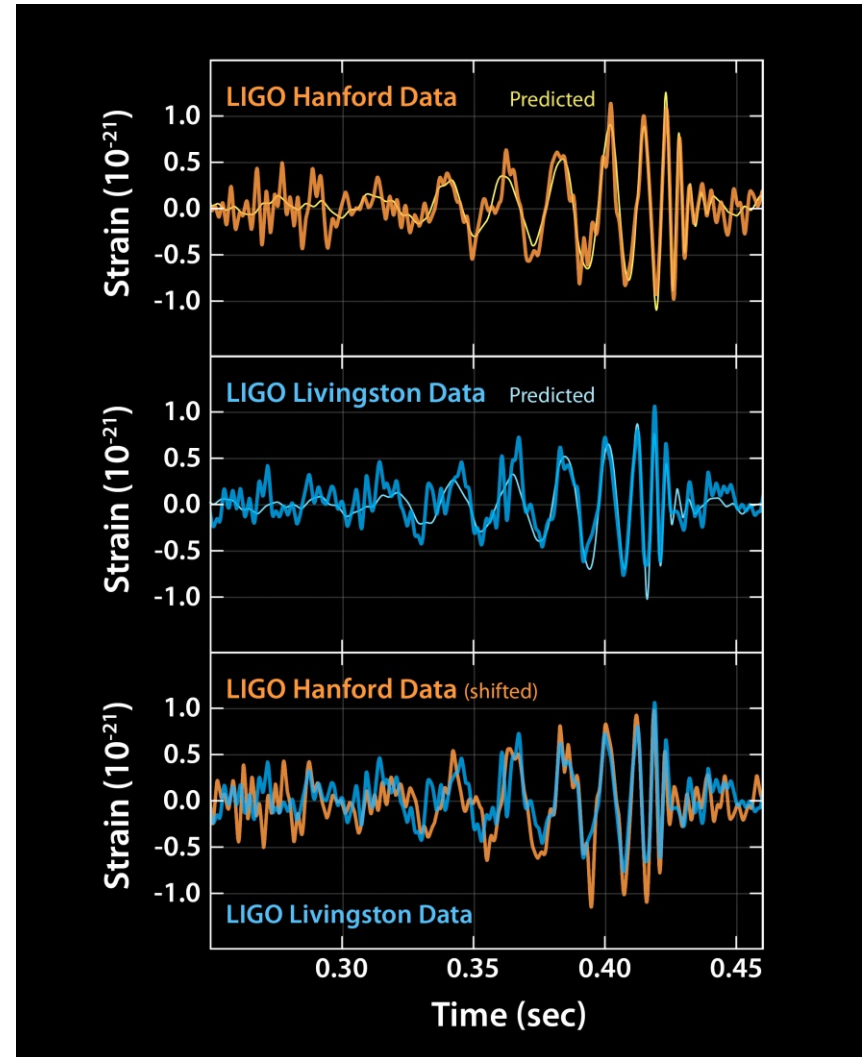
Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3 & Université Paris-Sud)
European Gravitational Observatory (CNRS & INFN Consortium)



Plan

- Premiers contacts avec le **détecteur Virgo**
- La **découverte** en bref : **GW150914**
- La saga des **ondes gravitationnelles**
- **Comment les détecter ?**
 - **Interféromètres géants suspendus**
- **L'événement GW150914**
- **Et maintenant ?**
 - Une **nouvelle fenêtre sur l'Univers**



Merci à tous mes collègues du groupe Virgo du LAL et des collaborations Virgo ou LIGO, auxquels j'ai emprunté des idées et du matériel pour cette présentation **2**

Le détecteur Virgo

Premier contact : Virgo vu du ciel



Une T.G.I.R.

Très Grande Infrastructure de Recherche

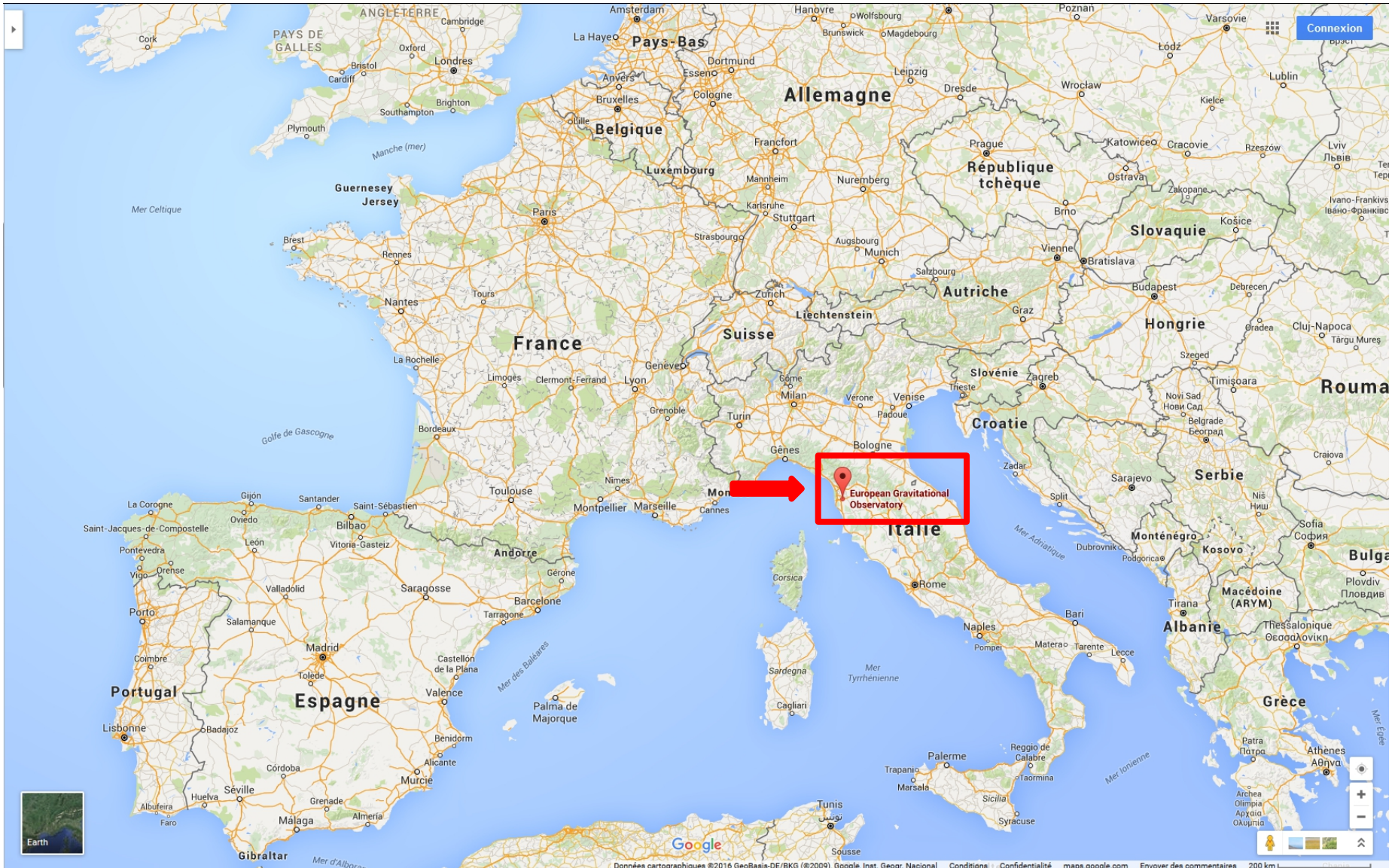
Tour de Pise

Zoom

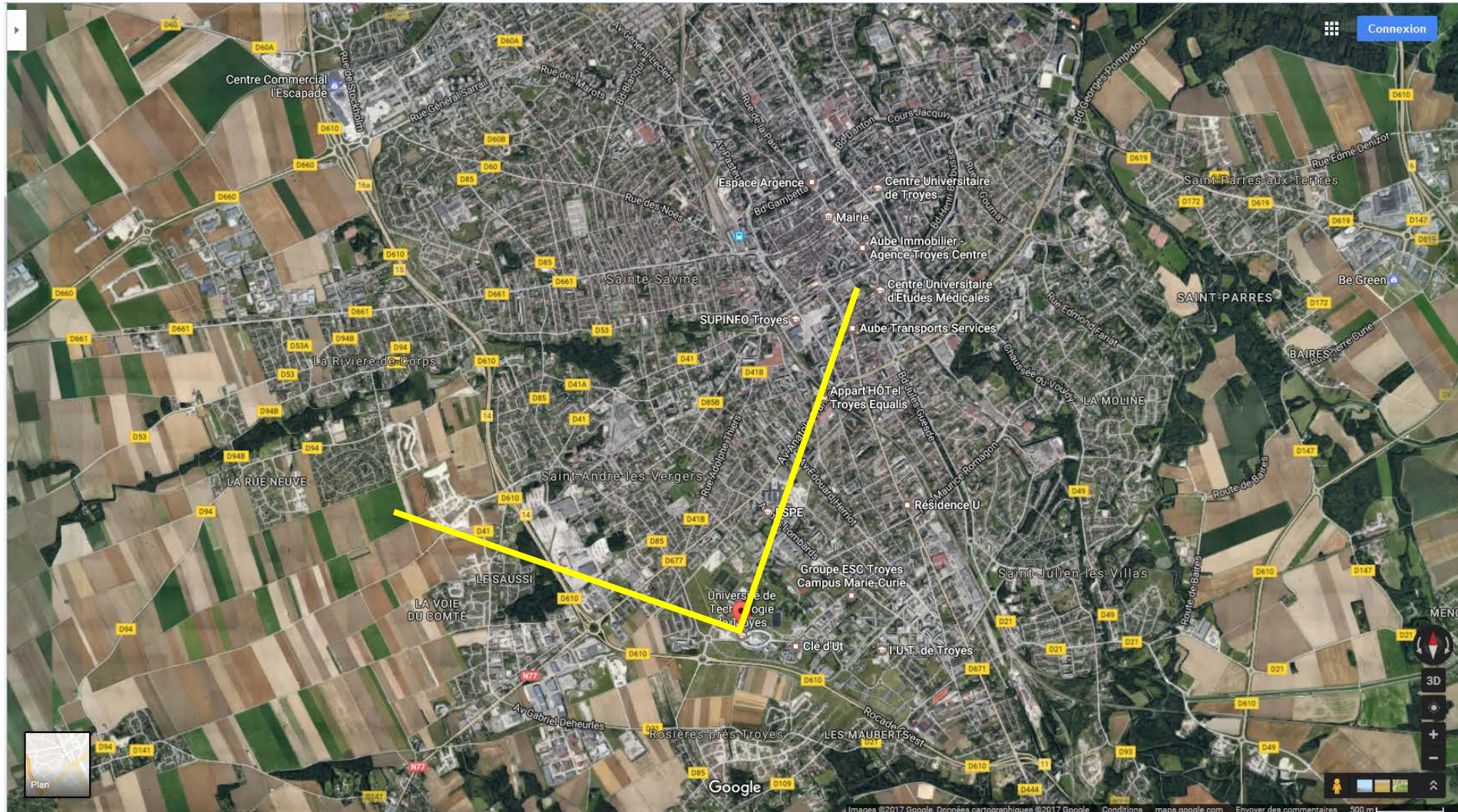
Aéroport de Pise
Longueur du tarmac : 3 km

Virgo

Où est Virgo ?



Virgo à Troyes ?



La Collaboration Virgo

• 6 pays européens



• 21 laboratoires

• ~300 membres environ (LIGO : ~750)

• Virgo a été construit par 11 laboratoires du **CNRS** (France) et de l'**INFN** (Italie)

▪ Budget : ~150 M€

▪ Des équipes des **Pays-Bas**, de **Pologne**, de la **Hongrie** et de l'**Espagne** ont rejoint le projet ensuite

• Budget pour **Advanced Virgo** : ~20 M€

▪ Plus des contributions en nature de NIKHEF

• Le consortium **EGO** (European Gravitational Observatory) gère le site de Virgo à Cascina.

Il fournit infrastructures et ressources pour la construction et le fonctionnement du détecteur

APC Paris
ARTEMIS Nice
EGO Cascina
INFN Firenze-Urbino
INFN Genova
INFN Napoli
INFN Perugia
INFN Pisa
INFN Roma La Sapienza
INFN Roma Tor Vergata
INFN Padova
INFN TIFPA
LAL Orsay – ESPCI Paris
LAPP Annecy
LKB Paris
LMA Lyon
NIKHEF Amsterdam
POLGRAW
RADBOUD Uni. Nijmegen
RMKI Budapest
Valence University

Un bref historique

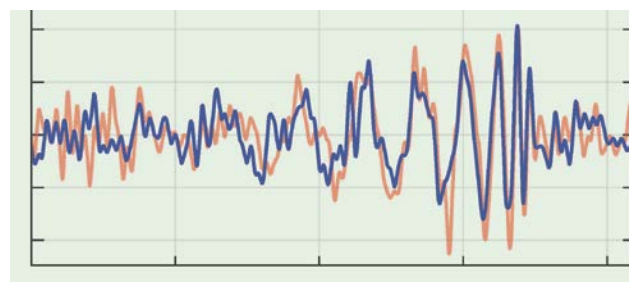
- **Années 1980** : Collaboration entre **Alain Brillet** (CNRS, Orsay, lasers) et **Adalberto Giazotto** (INFN, Pise, suspensions)
- **1989** : **Proposal**
- **27 juin 1994** : **Approbation du projet** par le CNRS et l'INFN
- **Mai 1997** : **Design report** final
- **2003** : **Fin de la construction**
- **2007-2010** : **Prises de données** Virgo puis Virgo+
- **2011-2016** : **Passage de « Virgo » à « Virgo Avancé »**
- **2015** : **observation** par les détecteurs **LIGO Avancés** de **deux ondes gravitationnelles**
→ **2016** : **annonces des découvertes** par les collaborations **LIGO** et **Virgo**
- **2017** : **Première prise de données** de « **Virgo Avancé** »

La découverte en bref : GW150914

14 septembre 2015, 11:51 heure de Paris

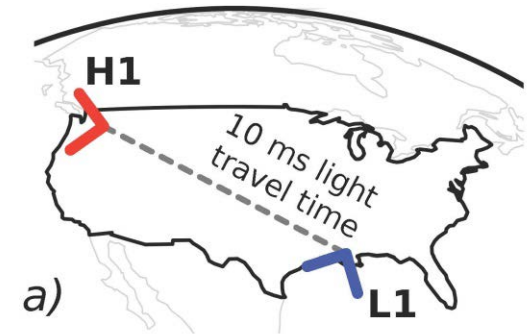
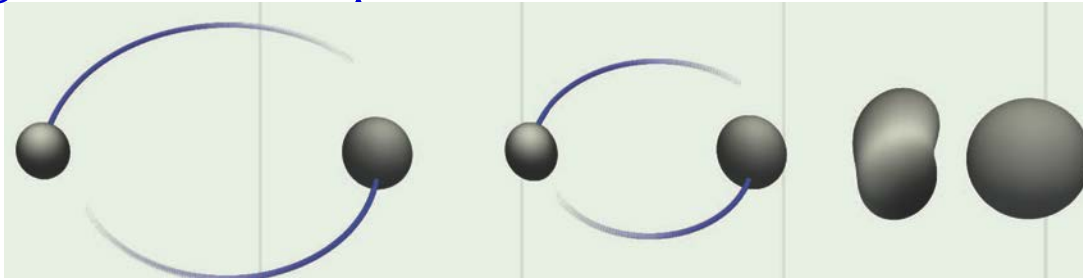
- **Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle**

- **Très court** (< 1 s)
- **Très fort**
 - Par rapport au bruit de mesure
 - Très faible dans l'absolu



Evénement baptisé **GW150914**

- **Signature attendue pour la « fusion » de deux trous noirs**



LIGO Hanford

Etat de Washington, USA



LIGO Livingston Louisiane, USA

11 février 2016, 16:30 heure de Paris



« *Ladies and gentlemen,
we have detected
gravitational waves,
we did it.* »

David Reitze,
directeur des
observatoires LIGO

- **Conférences de presse simultanées** à Washington, Cascina (site de Virgo, Italie), Paris, Amsterdam, etc.
- **Article scientifique** (en anglais) publié en ligne
 - **Signé par les deux collaborations LIGO et Virgo**
 - <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- **Mise en ligne de nombreux articles associés détaillant la découverte**
 - Liste complète : <https://www.ligo.caltech.edu/page/detection-companion-papers>

Et entre ces deux dates ?

- 5 mois d'analyses poussées auxquelles ont participé des centaines de scientifiques
 - Des réponses précises à apporter à de nombreuses questions
 - Tout en gardant secrète la découverte potentielle
 - Chaque vérification aurait pu l'invalider complètement
- L'événement a-t-il une origine « naturelle » ?
 - Pas un signal simulé artificiellement ni ... un piratage des observatoires LIGO !
 - Pas dû à une perturbation de l'environnement
- Les deux détecteurs fonctionnaient-ils normalement ?
 - Qualité et précision des mesures
 - Configuration des détecteurs « gelée » pendant plusieurs semaines
 - Pour accumuler suffisamment de données représentatives et, ainsi, quantifier la « réalité » du signal – vient-il vraiment du cosmos ?
- Quels résultats scientifiques déduire de cet unique événement (pour le moment) ?
- Ecriture de l'article annonçant la découverte et des articles détaillés associés
 - Découverte annoncée seulement après acceptation de cet article par PRL

La saga des ondes gravitationnelles

La mécanique céleste

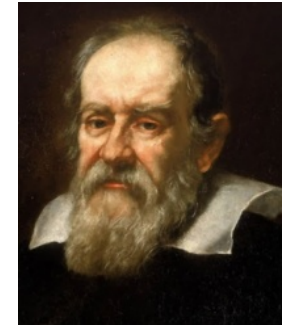
- Modèle **géocentrique** du système solaire (II^{ème} siècle de notre ère) de **Ptolémée**
 - La Terre est au centre
 - Tous les « astres voyageurs » orbitent autour d'elle **selon des empilements complexes de sphères**



- Première remise en cause sérieuse : le modèle **héliocentrique** de **Copernic** (1543)



- **Galilée** : observations en contradiction avec la théorie de **Ptolémée** (1610)



→ L'église catholique l'oblige à abjurer « l'erreur » de **Copernic**

- **Kepler** (1609-1619) : suppose un modèle héliocentrique & des orbites elliptiques

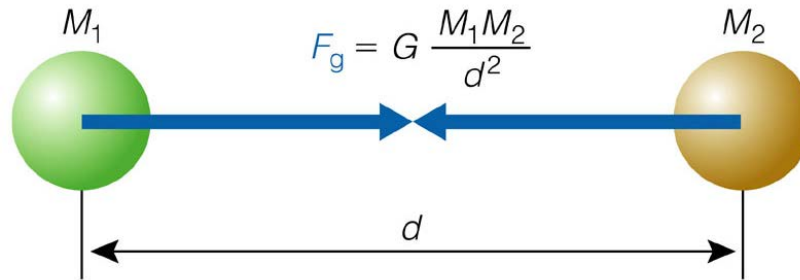
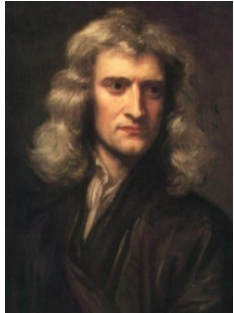
→ Il construit **trois** lois empiriques à partir desquelles il fait des prédictions confirmées par l'observation



Loi de la gravitation universelle

« Deux masses ponctuelles s'attirent selon une force dirigée le long de la ligne les reliant. La force est proportionnelle au produit des deux masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les séparent. »

- **Newton** (1687) :



- **Simple** et **élegante**
- Explique les lois de **Kepler**
- Remplace la multitude de sphères nécessaires pour conserver la validité du modèle de **Ptolémée**

Règne sur la mécanique pendant plus de deux siècles

Toujours très utilisée aujourd'hui !

- La **découverte de Neptune** (1846)
 - **Urbain Le Verrier** (calculs mathématiques)
 - **Gottfried Galle** (observations astronomiques)

Loi de la gravitation universelle

- Cas particulier : l'une des masses est très grande par rapport à l'autre : $M \gg m$
 - Exemples : mouvement de la Terre autour du Soleil
satellite en orbite terrestre→ Mouvement quasi-circulaire

- **Vitesse de satellisation**

- Mise en orbite autour du corps de masse M situé à une distance r
→ 7,9 km / s sur Terre

$$v_{\text{sat}} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- **Vitesse de libération**

- Vitesse à atteindre pour échapper à l'attraction du corps de masse M
→ 11,2 km / s pour la Terre
→ 42,1 km / s pour le Soleil
(orbite au niveau de la Terre)

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

- v_{sat} et v_{lib} sont indépendantes de la masse m et proportionnelles

Trous noirs ?

- **Rappel : vitesse de libération**

- Croit comme \sqrt{M}

- Plus le corps est massif, plus son attraction est forte

- Décroit comme $1/\sqrt{r}$

- Plus on est loin de ce corps et moins on sent son attraction

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

- **Vitesse limite : vitesse de la lumière dans le vide**

- Théorie de la relativité restreinte (Einstein, 1905)

- $c = 299\,792\,458 \text{ m / s}$

- **Peut-on avoir $v_{\text{lib}} = c$?**

- **Oui : M très grand et/ou r très petit**

- Possibilité explorée dès le 18^e siècle – théorie corpusculaire de la lumière

- John Mitchell (1783)

- Pierre-Simon de Laplace (1796)

- **De tels astres, s'ils existent, ont un champ gravitationnel si fort que même la lumière ne peut pas s'en échapper !**

- A l'époque : lumière \Leftrightarrow onde

- Problème mis de côté jusqu'à la théorie de la relativité générale (1915)

Rayon de Schwarzschild

- **Rayon de Schwarzschild R_s** (1916)
 - On part de $v_{\text{lib}} = c$ et on en déduit $R_s(M)$

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \text{ km} \left(\frac{M}{M_{\text{Soleil}}} \right)$$

- **Très petit pour les corps célestes « habituels »**
 - Planètes, étoiles

- **Compacité**

$$C = \frac{R_s}{\text{rayon}} \leq 1$$

| Objet | Terre | Soleil | Naine blanche | Etoile à neutrons | Trou noir |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------|-------------------|-----------|
| Compacité | $1,4 \cdot 10^{-9}$ | $4,3 \cdot 10^{-6}$ | 10^{-4} | 0.3 | 1 |

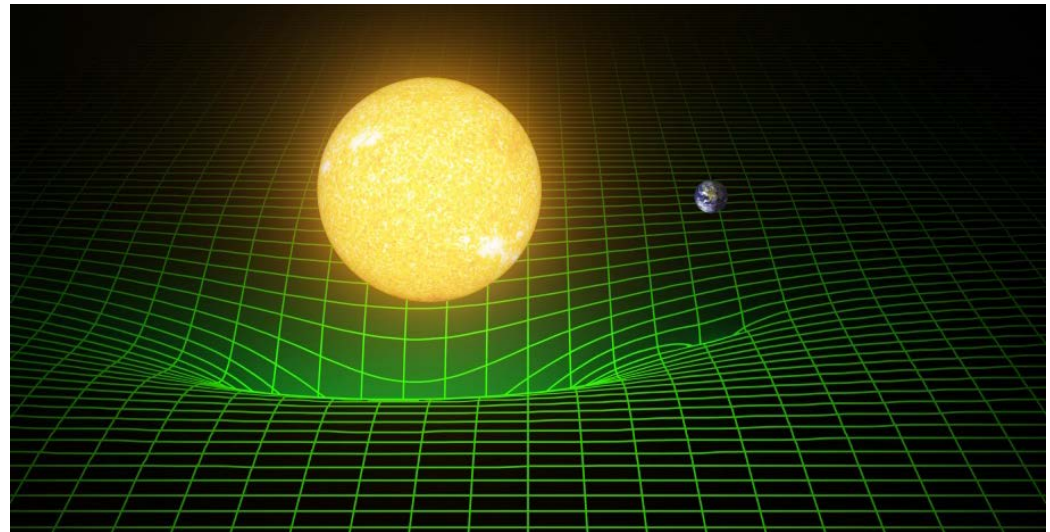
- **Attention : « compact » et « dense » sont deux choses différentes**
 - « Densité » d'un trou noir

$$\rho = \frac{\text{"Masse"}}{\text{"Volume"}} \approx 1,8 \times 10^{16} \text{ g/cm}^3 \left(\frac{M_{\text{Soleil}}}{M} \right)^2$$

Densité nucléaire :
 $\sim 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$

La Relativité générale

- Einstein 1915-1917
 - Grossman, Hilbert
- « L'espace-temps dit à la matière comment se déplacer ; la matière dit à l'espace-temps comment se courber. »
- John Archibald Wheeler (1990)



Gravitation ↔ Courbure de l'espace-temps
Courbure de l'espace temps ↔ Densité d'énergie

- **Généralisation** de la théorie de la gravitation universelle de Newton
 - **Explication de phénomènes** dont la mécanique newtonienne ne rendait pas compte : avance du périhélie de Mercure, etc.
 - **Prédiction de nouveaux effets** : expansion de l'Univers, trous noirs, lentille gravitationnelle, etc.
- **Jamais mise en échec depuis**
 - **A la base du Modèle Standard cosmologique** – Friedman, Lemaître, etc.
 - Une **application** : le **système GPS**

Les ondes gravitationnelles

- 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 dans le vide
- Pas d'émission d'ondes gravitationnelles (OG) si la source est axisymétrique
 - Une « bonne » source doit avoir une distribution de masse asymétrique
- L'amplitude h d'une OG est sans dimension
 - Décroît comme l'inverse de la distance à la source d
 - Les détecteurs d'OG sont directement sensibles à l'amplitude ($h \propto 1/d$) et pas à l'intensité ($h^2 \propto 1/d^2$)
 - Conséquence importante dans la suite pour estimer le « volume d'Univers » auquel un détecteur donné est sensible : $V \propto d^3$
- Gain d'un facteur 2 (10) en distance \Leftrightarrow Volume d'Univers observable augmenté par un facteur 8 (1000)

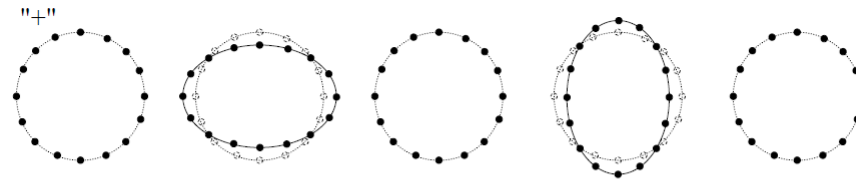
Les ondes gravitationnelles existent-elles ?

- Question résolue (positivement) depuis le 11 février 2016 !
 - Mais objet de nombreux débats scientifiques pendant un siècle
- Des décennies de controverse
 - Eddington, 1922: « *Les OGs se propagent à la vitesse de la pensée* »
 - Années 1950 : la relativité générale est un problème mathématique bien posé (Choquet-Buhat)
- Evidence indirecte de l'existence des OGs
 - Etude sur le long terme du système PSR B1913+16 – voir transparent suivant
 - Système binaire (deux astres) dans la Galaxie (23 000 années-lumière)
 - Deux étoiles à neutrons, dont l'une est un pulsar détecté depuis la Terre
- Système découvert par Hulse et Taylor en 1974
 - Découverte récompensée par le prix Nobel de physique 1993
- Un excellent laboratoire pour les études de la gravitation
 - En particulier les ondes gravitationnelles
 - Taylor & Weisberg, Damour

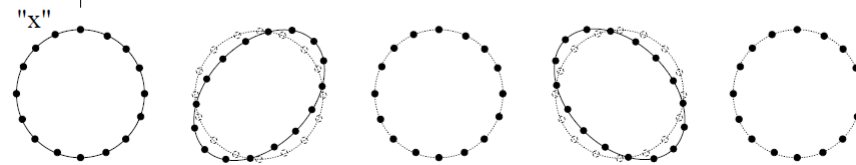
Effet d'une onde gravitationnelle

- Effet des deux polarisations sur un anneau de « masses test »
 - Variations opposées dans deux directions perpendiculaires

- Polarisation « + »

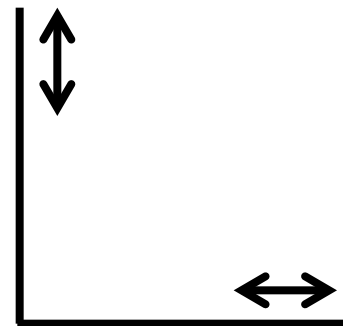


- Polarisation « × »



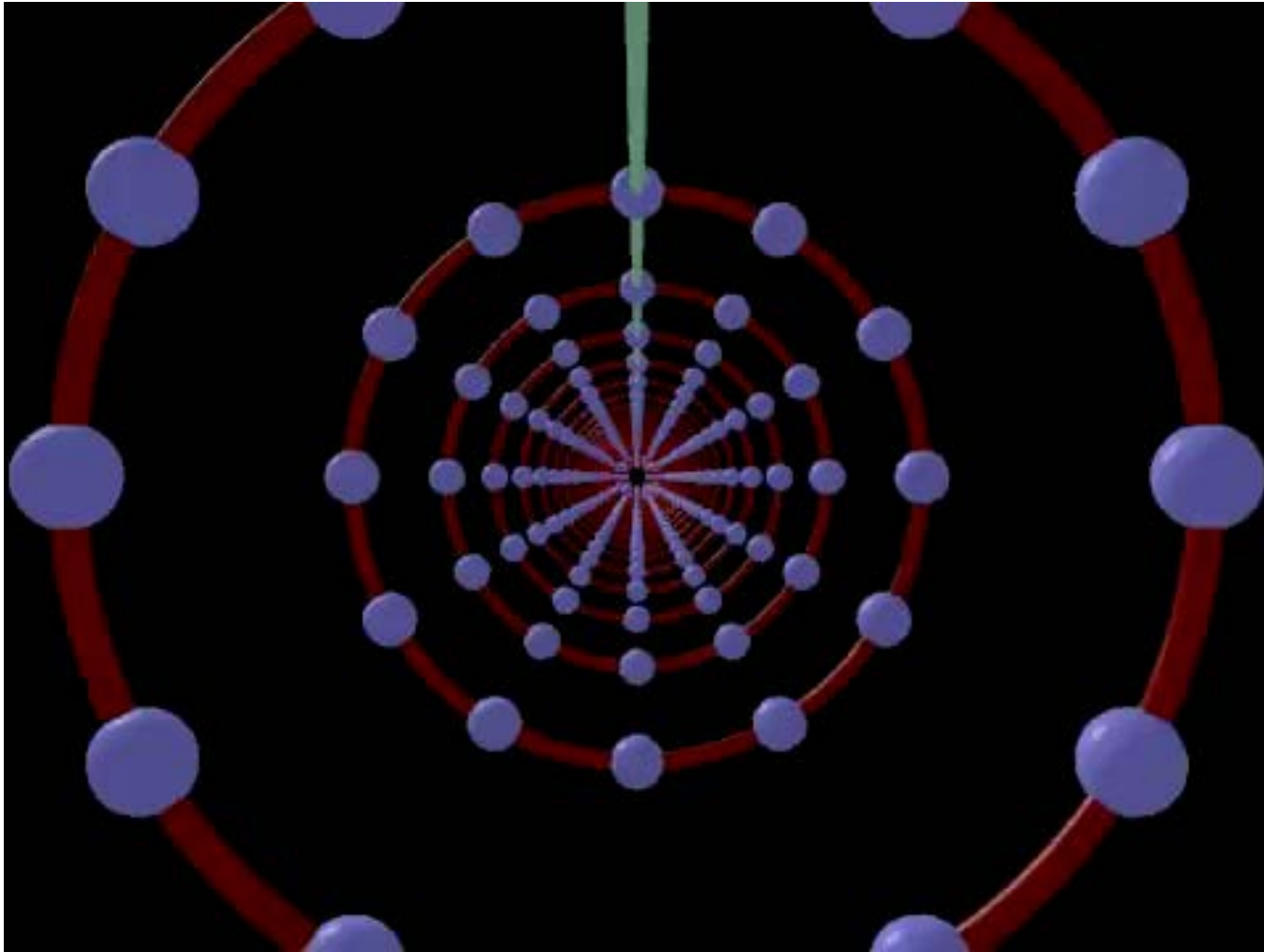
Une période

→ Idée : utiliser un détecteur capable de mesurer la différence entre deux longueurs à angle droit ...



Effet d'une onde gravitationnelle

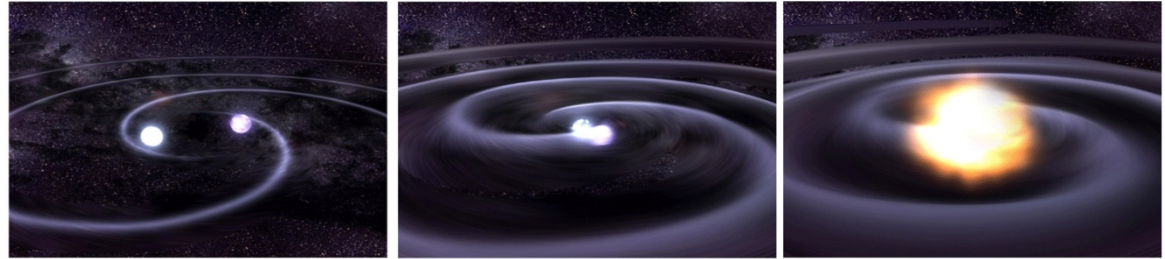
- En trois dimensions



Une grande variété de sources

- Classification en terme de

- Durée du signal
- Gamme de fréquence
- Forme d'onde : connue/inconnue
- Autres signaux émis simultanément ? Ondes électromagnétiques, neutrinos, etc.



- Coalescence d'un système binaire – « fusion » de deux astres compacts

- Les derniers instants de l'évolution d'un système comme PSR B1913+16
→ Les astres compacts se rapprochent à mesure qu'ils perdent de l'énergie (→ OG)
- Trois phases distinctes: « spirale », « fusion » et « désexcitation »
→ Modélisées par des calculs analytiques et des simulations numériques

- Sources transitoires (« bursts »)

- Effondrement de cœurs d'étoiles (supernovae)

- Sources permanentes

- Pulsars
- Fonds « stochastiques »

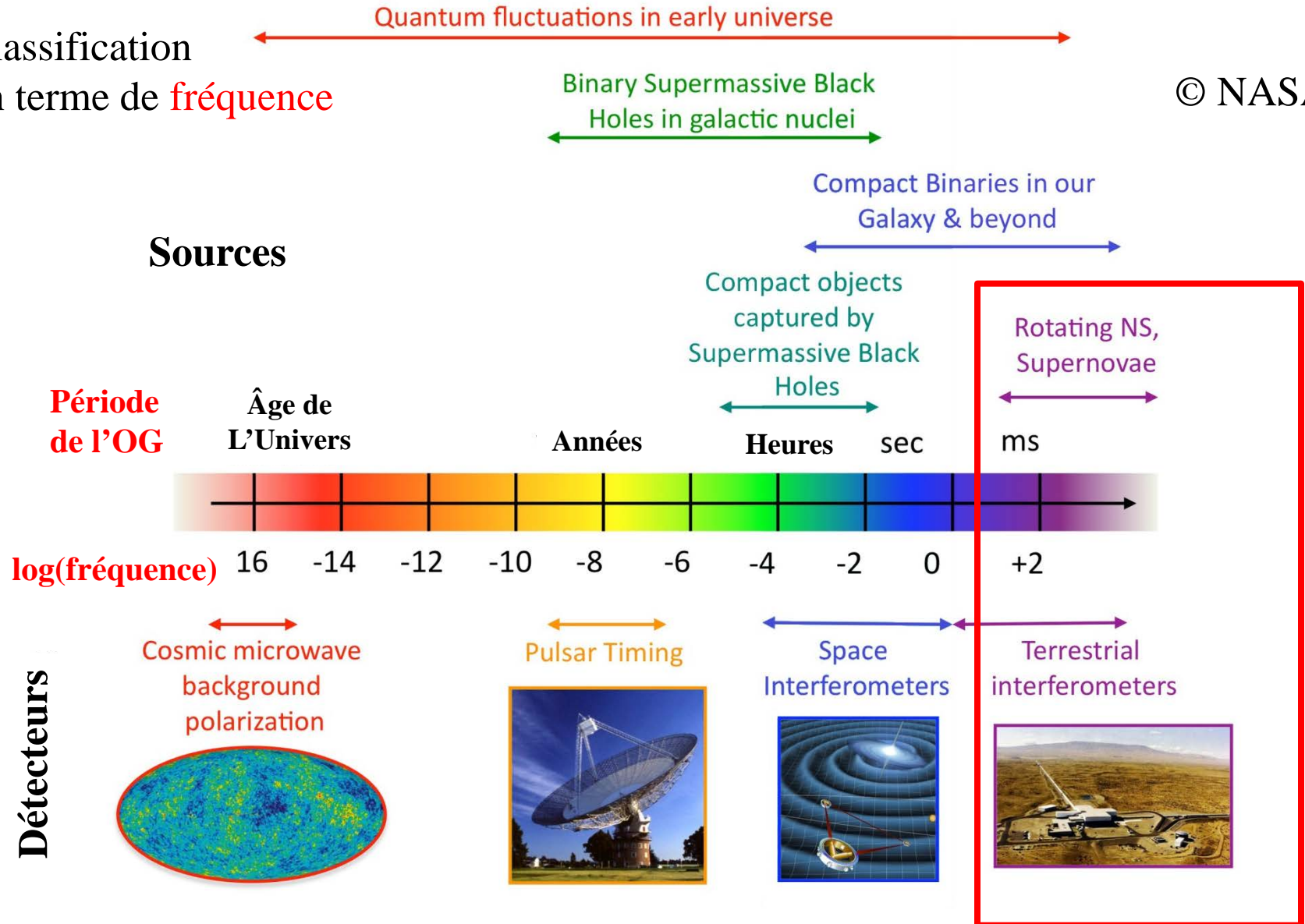


- Probablement beaucoup d'autres sources encore inconnues ...

Le spectre des ondes gravitationnelles

- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



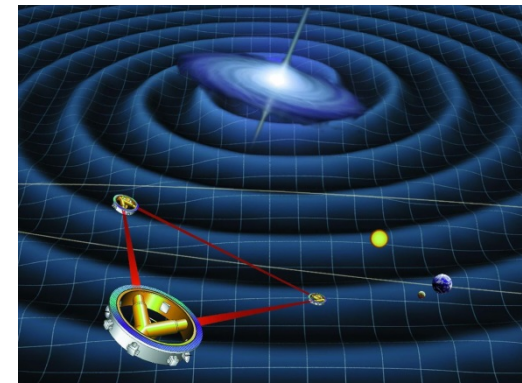
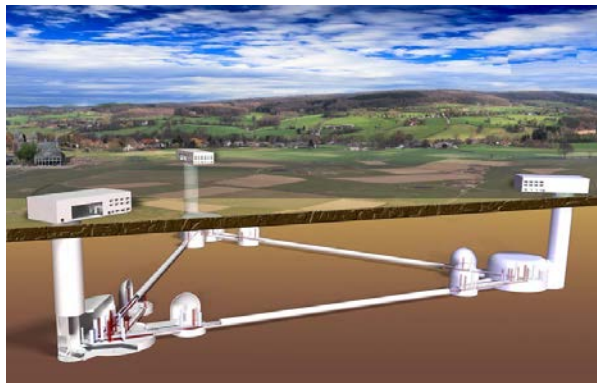
Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

- **Sur terre**

- **Barres résonantes** (**Joe Weber** : le pionnier de la recherche des OGs)
 - Bande passante étroite, sensibilité limitée : plus utilisées aujourd'hui
- **Détecteurs interférométriques** : **LIGO, Virgo**, etc. : détails à venir
 - **Démarrage des détecteurs de 2^{ème} génération** (« avancés »)
 - Etudes préliminaires pour la 3^{ème} génération de détecteurs (**Einstein Telescope**)
- **Chronométrage des pulsars** « **Pulsar Timing Array** » (<http://www.ipta4gw.org>)
 - Modulation des temps d'arrivée des signaux émis par des pulsars galactiques millisecondes due à des OGs très basses fréquences

- **Dans l'espace**

- Future mission **eLISA** (<https://www.elisascience.org>, lancement dans 10-15 ans)
- Technologies testées **récemment** (et avec **succès**) par la mission **LISA Pathfinder**



Détecter les ondes gravitationnelles

1916-2016: un siècle de progrès

- **1916 : Prédiction des OG (Einstein)**

1957 : Conférence de Chapel Hill

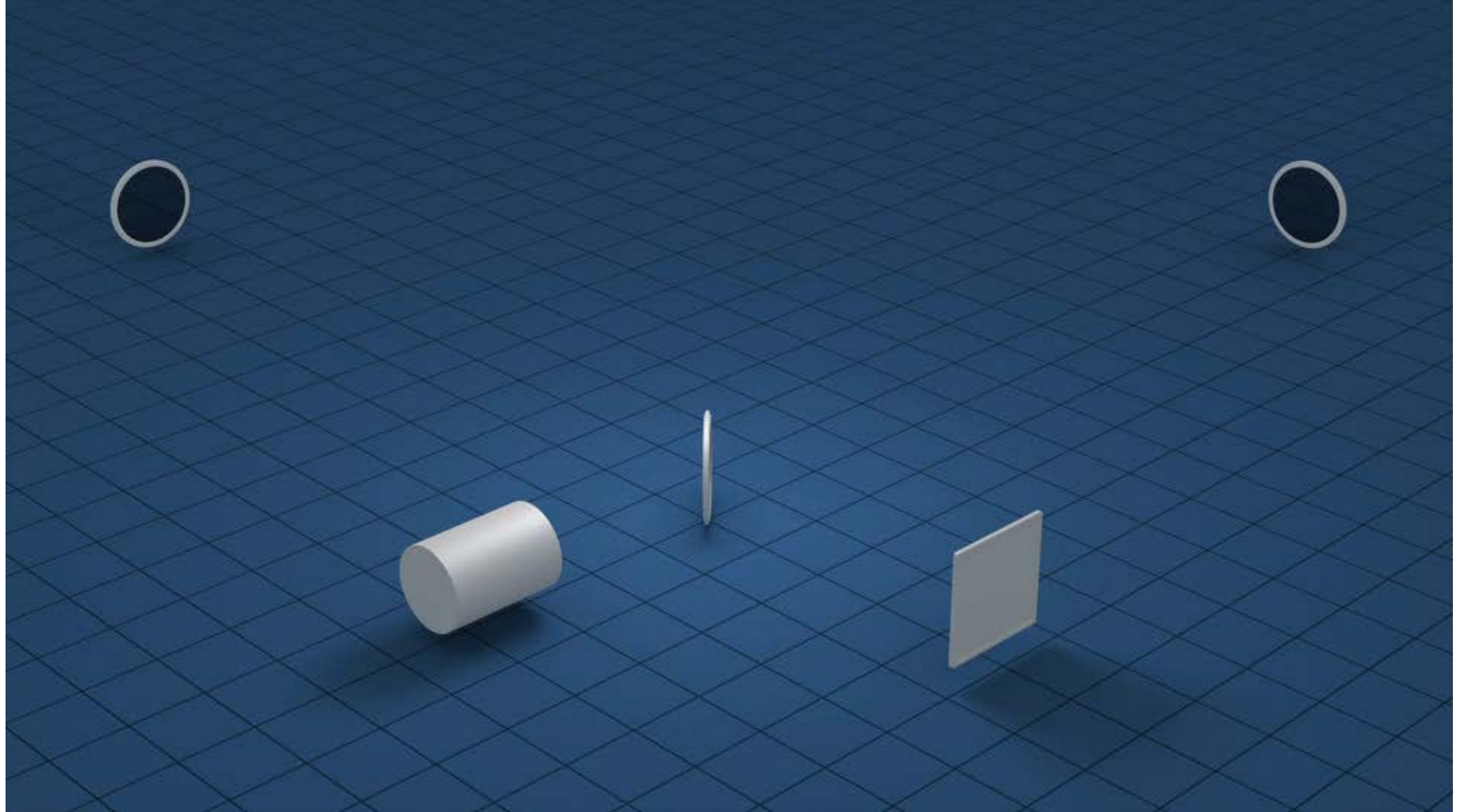
- **1963 : Trous noirs de Kerr**

- **1990's : développements théoriques pour la coalescence de systèmes binaires (Blanchet, Damour, Deruelle, Iyer, Will, Wiseman, etc.)**
- **2000 : Idem pour le cas de systèmes binaires de 2 trous noirs (Buonanno, Damour)**
- **2006 : simulations de la fusion de deux trous noirs (Baker, Lousto, Pretorius, etc.)**

(Bondi, Feynman, Pirani, etc.)

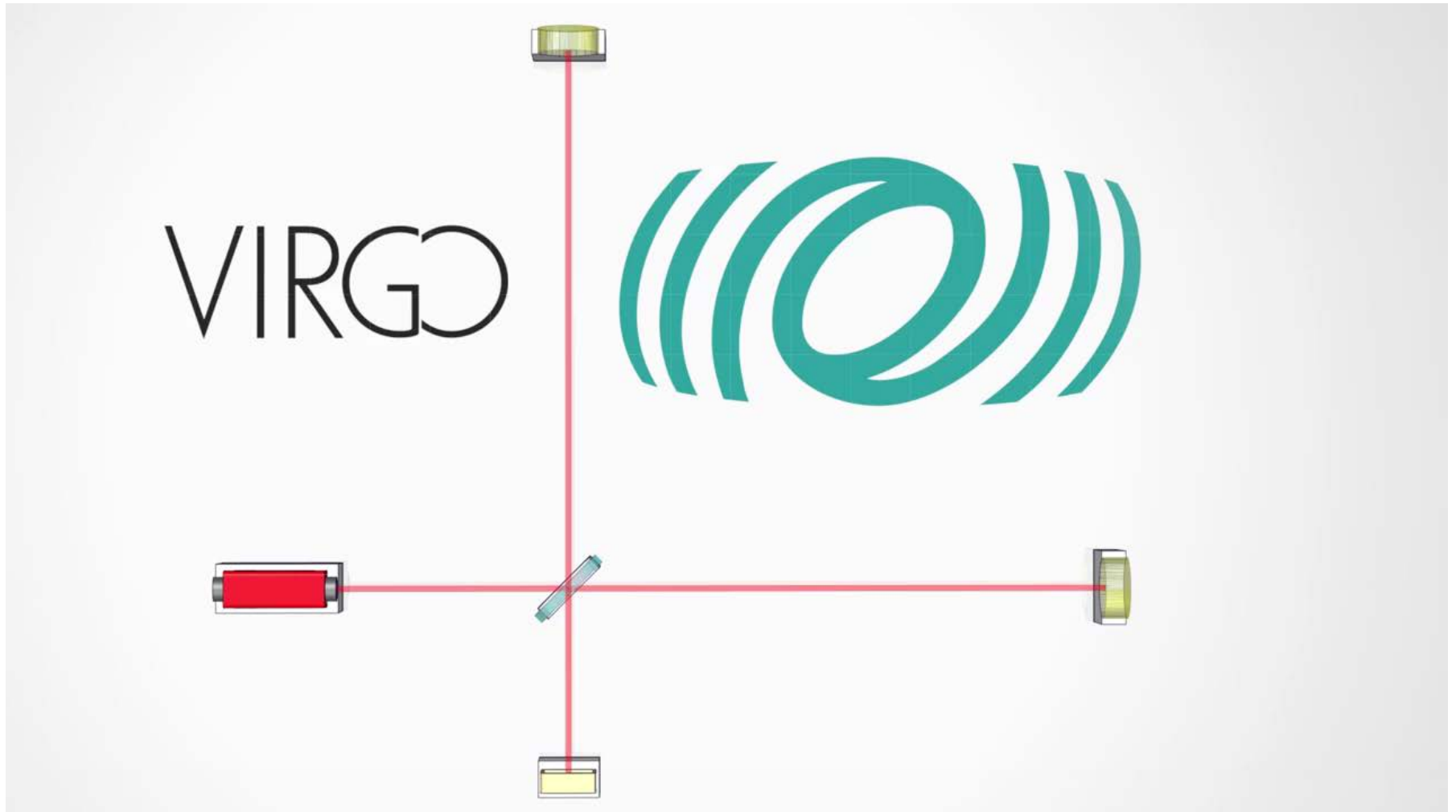
- **1960's : premières barres de Weber**
- **1970 : premier prototype d'ITF (Forward)**
- **1972 : Etudes de faisabilité détaillées (Weiss)**
- **1974 : PSRB 1913+16 (Hulse & Taylor)**
- **Années 1980 : Prototypes (~10 m de long) (Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)**
- **Fin des années 1980 : projets Virgo & LIGO**
- **Années 1990 : LIGO et Virgo financés**
- **2005-2011 : premières prises de données**
- **2007 : accord Virgo-LIGO – partage des données, analyses et publications communes**
- **2012 : financement des détecteurs avancés**
- **2015 : démarrage de LIGO avancé**

Principe de fonctionnement



Un détecteur réel : Virgo avancé

- <https://www.youtube.com/watch?v=6raomYII9P4>, © Marco Kraan, Nikhef (Pays-Bas)



Bruits et sensibilité

- **Bruit** : toute perturbation parasite (quelle que soit son origine) qui pollue le signal en sortie de l'ITF et donc impacte la détection d'une OG potentielle
- **Le niveau de bruit de l'ITF varie en fonction de la fréquence**
 - On peut détecter une OG de fréquence f donnée si son amplitude h est « plus forte » que le niveau de bruit à cette même fréquence
- **Les ITFs sont des détecteurs sensibles dans une large gamme de fréquences**
 - La fréquence d'une OG peut varier de manière importante au cours du temps
→ Même si le signal est court !
 - **L'évolution précise de cette fréquence au cours du temps est caractéristique pour certains des signaux attendus** – en particulier celui détecté lors de **GW150914** !
- **Des sources de bruits très variées**
 - **Bruits fondamentaux**
→ Impossibles à éviter ; la conception de l'ITF vise à les minimiser
 - **Bruits instrumentaux**
→ Pour chaque bruit : identifier sa cause, y mettre fin ou l'atténuer
 - **Bruits environnementaux**
→ Isoler au mieux l'ITF ; surveiller l'environnement

Courbe de sensibilité

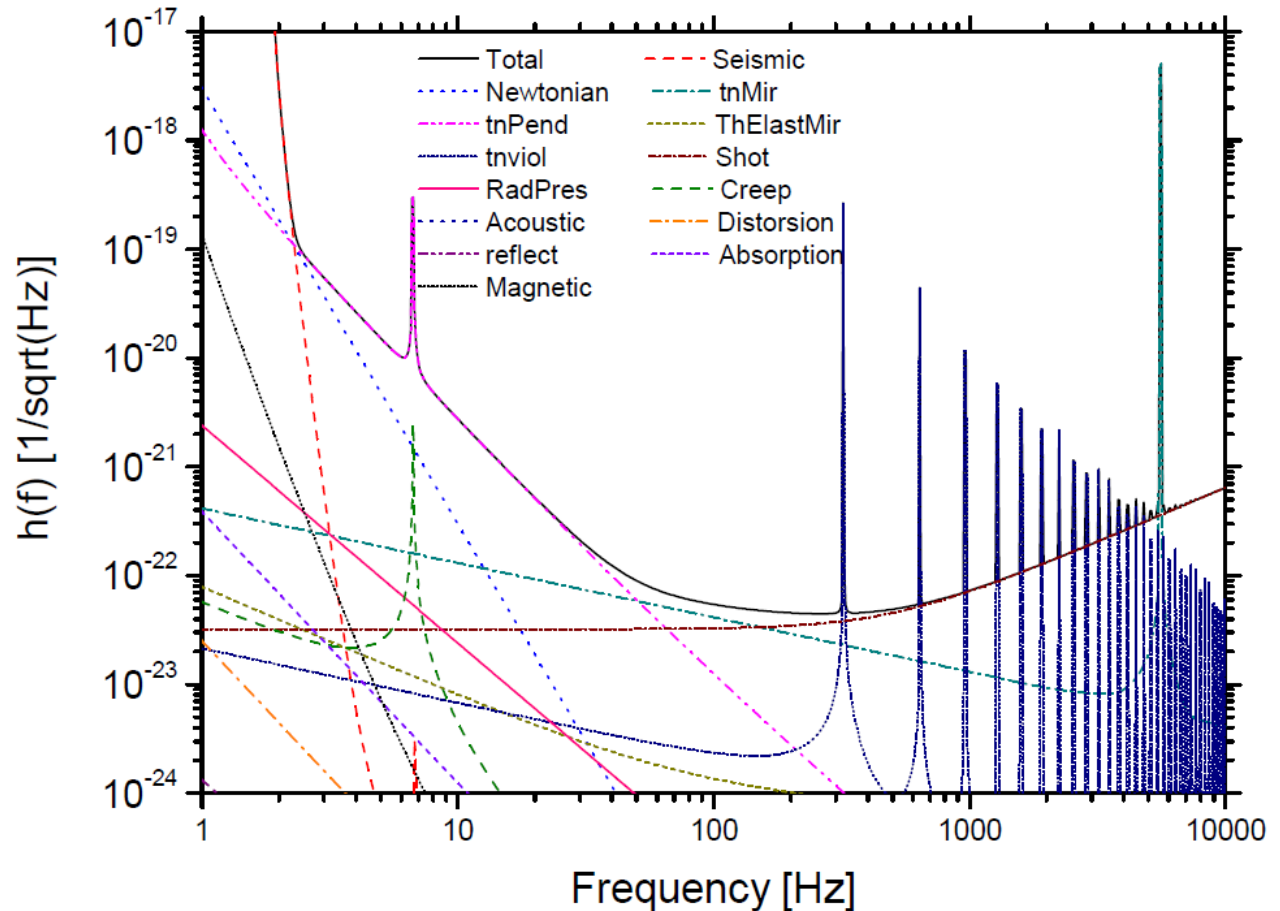
- Exemple: la courbe de sensibilité « de design » du détecteur Virgo initial

- Echelle log-log

- Fréquence d'échantillonnage : 20 kHz

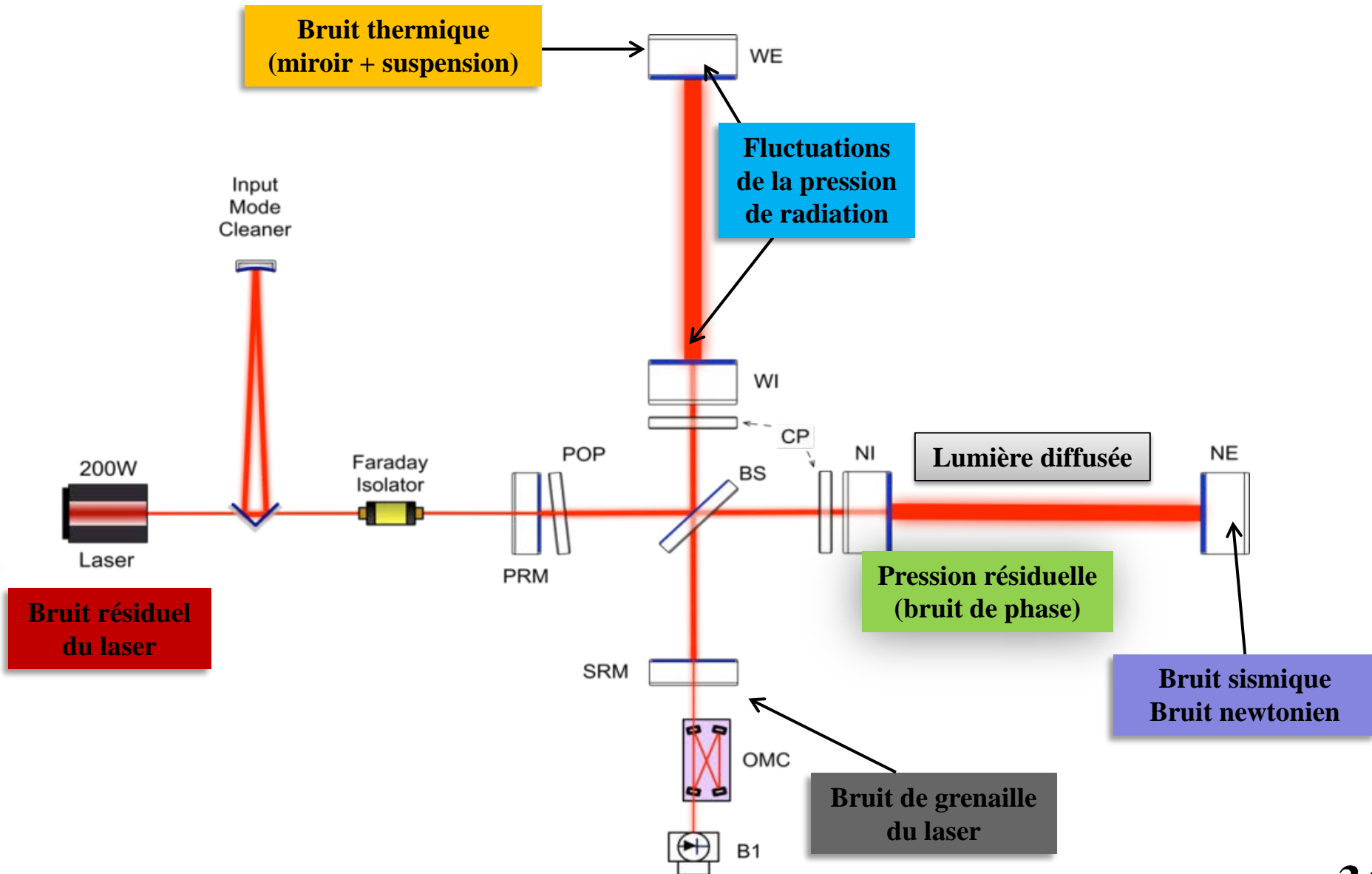
- Courbe noire : somme quadratique de tous les bruits
 - La courbe de sensibilité

- Densité spectrale d'amplitude (ASD)
 - Unité : $1/\sqrt{\text{Hz}}$



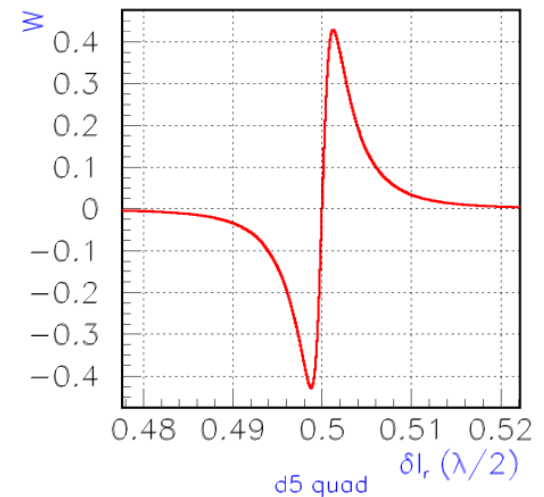
Bruit dans la bande de fréquence $[f_{\min}; f_{\max}]$: $\sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \text{ASD}^2(f) df}$

Les principaux bruits du détecteur



Contrôler l'interféromètre

- **Sensibilité** \Leftrightarrow maintenir l'ITF à son point de fonctionnement
 - Cavités optiques de stockage en résonance
+ interféromètre sur la frange noire
 - Contrôle des longueurs des cavités au niveau de 10^{-12} m
 - Contrôle de l'alignement des cavités au niveau de 10^{-9} rad
- Un problème très complexe
 - Décomposé en plusieurs étapes successives
Mouvement libre des miroirs \rightarrow Contrôle local \rightarrow Contrôle global
 - Utilisation de « signaux d'erreur » pour mesurer l'écart à la configuration de référence du détecteur
 \rightarrow Calcul et application de corrections
(positions, angles) au niveau des miroirs
 - **Boucles de contrôle** : de quelques Hz à quelques kHz
 - **Limitations** : bande passante des contrôles et performances des actuateurs qui appliquent les corrections calculées aux suspensions des miroirs



De la 1^{ère} à la 2^{nde} génération de détecteurs

- But : améliorer d'un facteur 10 la sensibilité des détecteurs
 - Augmentation d'un facteur 1000 du volume d'Univers observable !
 - Augmentation significative des taux d'événements attendus
 - A grande échelle, l'Univers est isotrope et uniforme
- Pour y parvenir : des améliorations très variées
 - Augmentation de la puissance du laser
 - Miroirs deux fois plus lourds
 - Augmenter la taille du faisceau incident sur ces grands miroirs
 - Suspensions spéciales pour les miroirs
 - Amélioration du niveau de vide dans les tubes des bras kilométriques
 - Vapeur d'eau piégée par des trappes cryogéniques aux extrémités des bras
 - Instrumentation et bancs optiques sous vide
- LIGO Avancé (aLIGO) financé ~un an avant Virgo Avancé (AdV)
 - Crise financière en 2008-2010...
 - Première prise de données « d'observation » aLIGO en septembre 2015
 - Mise à jour d'AdV toujours en cours
 - Démarrage du détecteur en 2017 ...

Un réseau de détecteurs

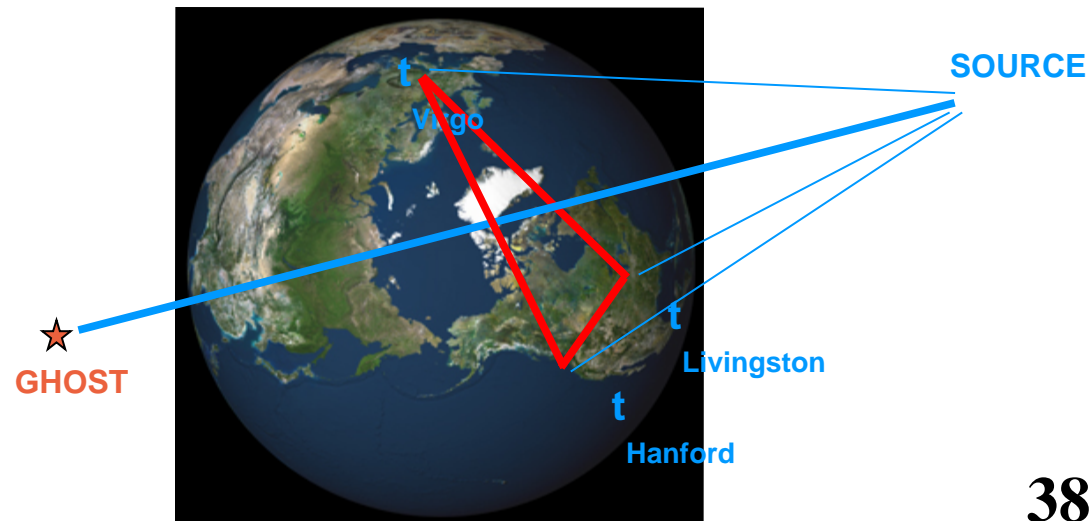
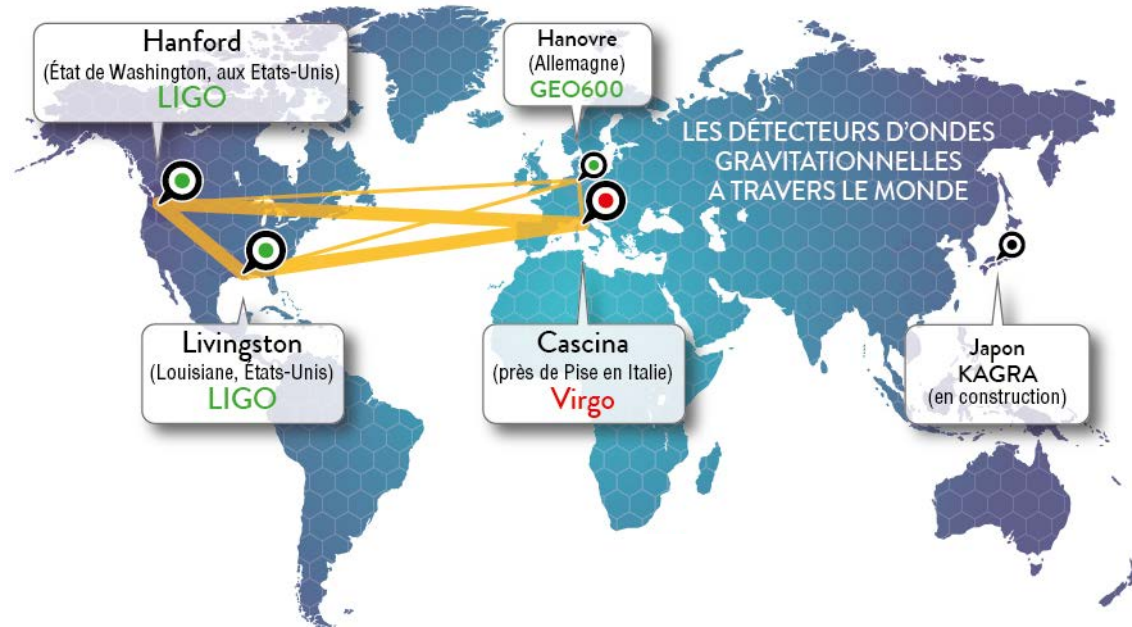


Un réseau de détecteurs

- Un seul ITF ne suffit pas pour détecter les OGs
 - Difficile de séparer un signal de tous les bruits
 - Fausses détections annoncées dans le passé (barres) ...

→ Solution : utiliser un réseau d'interféromètres

- Accords de collaboration entre les différents projets
 - Partage des données, analyses et publications communes
- ITF : détecteurs non directionnels
- Triple coïncidence nécessaire pour reconstruire la position de la source dans le ciel

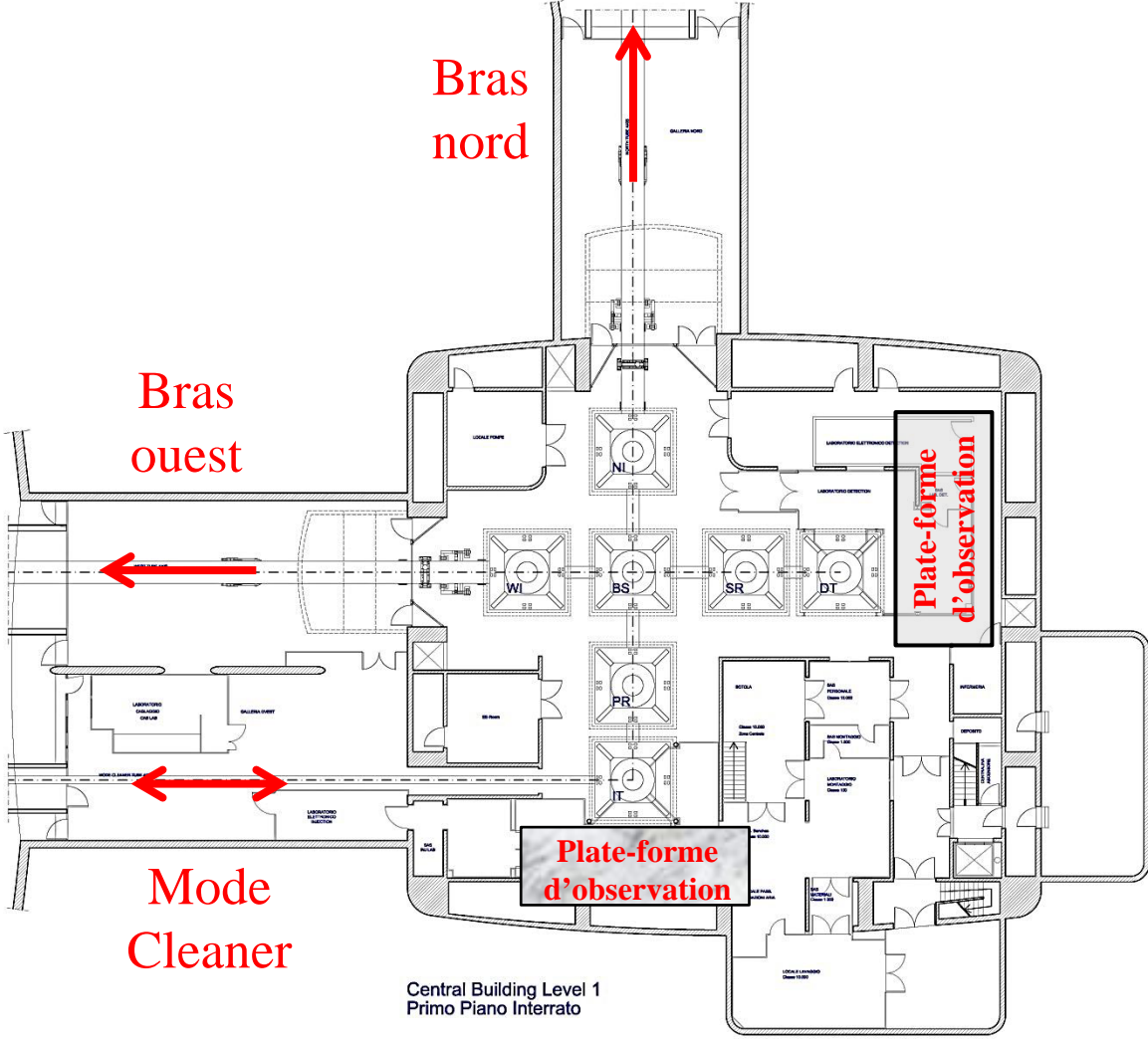


Visite « virtuelle » de Virgo

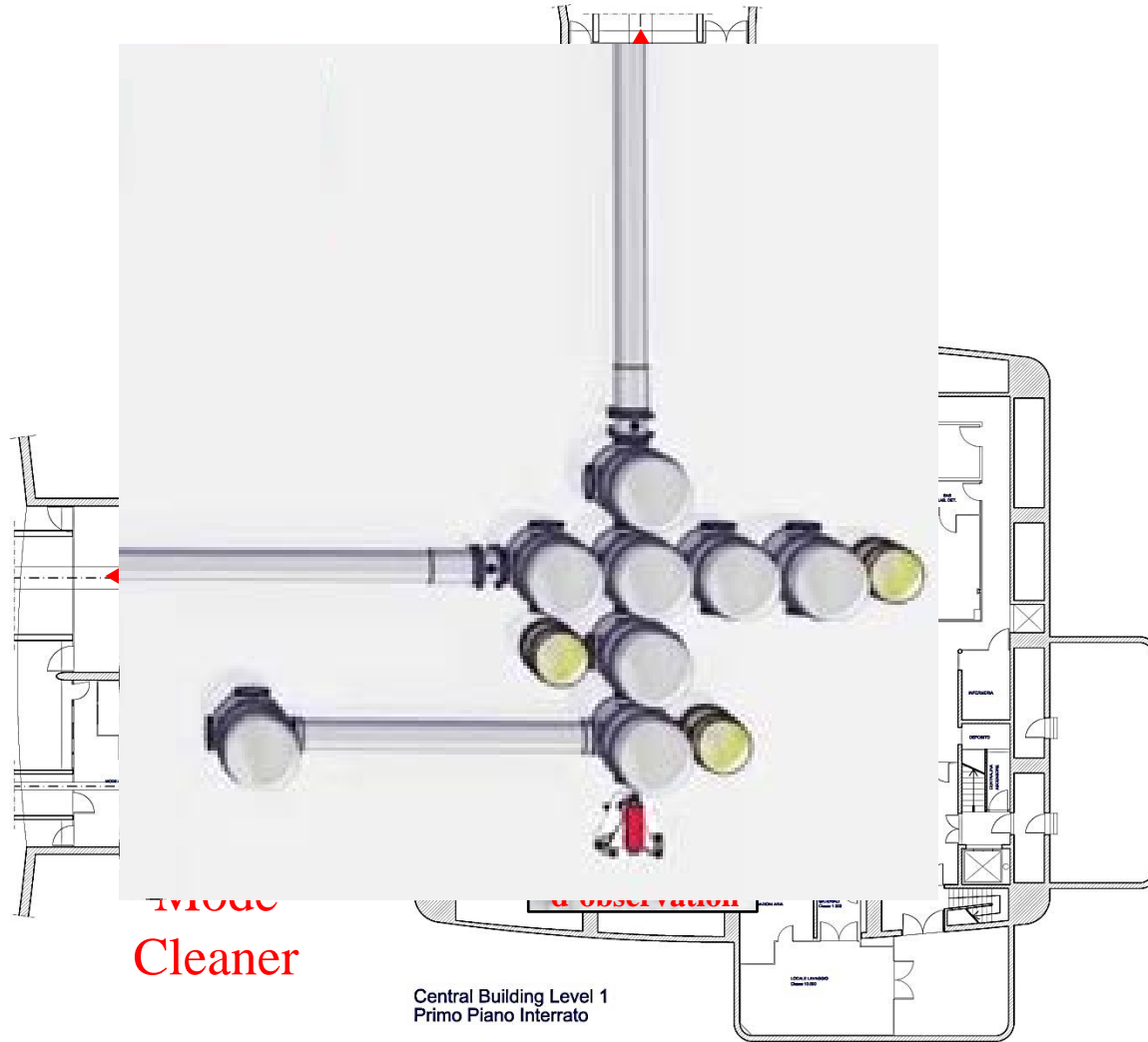
Aperçu de la salle de contrôle



Le Bâtiment central



Le Bâtiment central



Cleaner

Central Building Level 1
Primo Piano Interrato

Vue de l'intérieur d'un bras

- Vue similaire depuis le bâtiment de mi-bras ouest que vous visiterez tout à l'heure

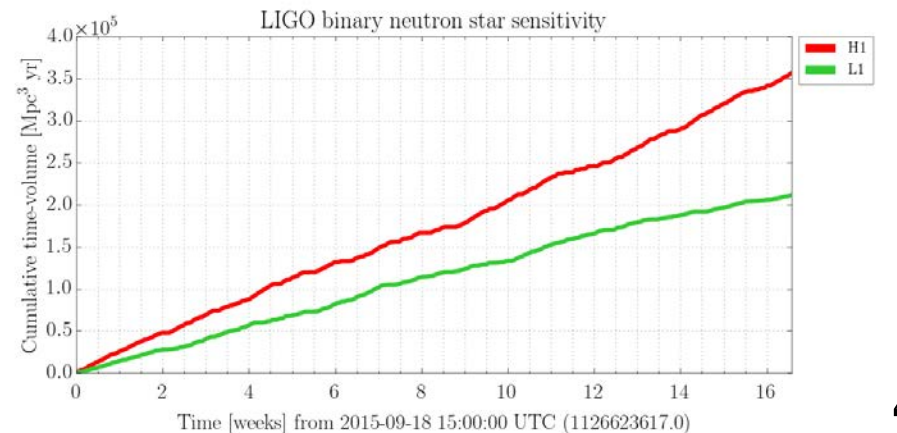
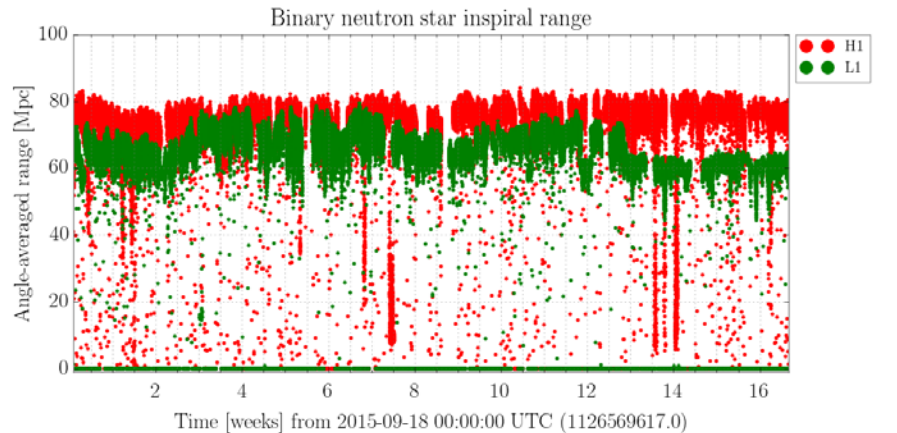
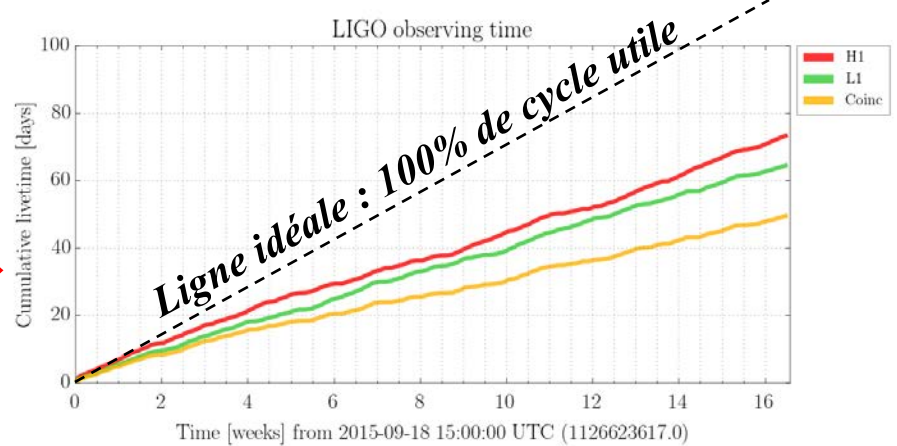


Premières détections

Prise de données « 01 »

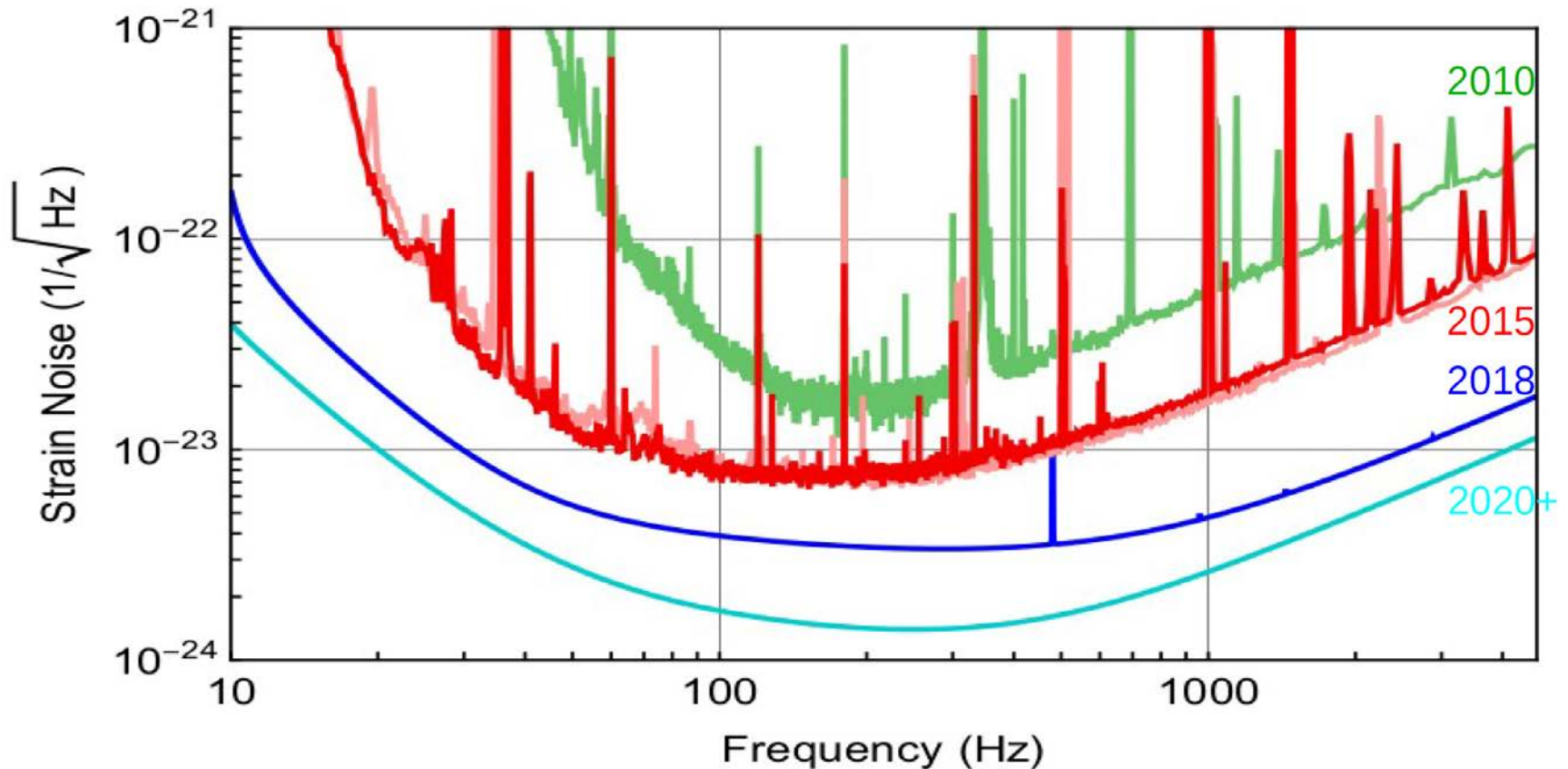
Prise de données O1

- O1: « prise de données d'Observation 1 »
- Septembre 2015 – Janvier 2016
 - GW150914 enregistré quelques jours avant le démarrage officiel d'O1
- Sans conséquence : les deux ITFs étaient en fonctionnement nominal
- Graphiques résumant O1
 - Temps d'observation détecteur simple + coïncidence
 - Distance de détection d'un système double d'étoiles à neutrons « horizon »
 - Reflète la sensibilité de l'ITF
 - Sensibilité pour cette même source temps d'observation \times volume observé
 - Taux d'événements



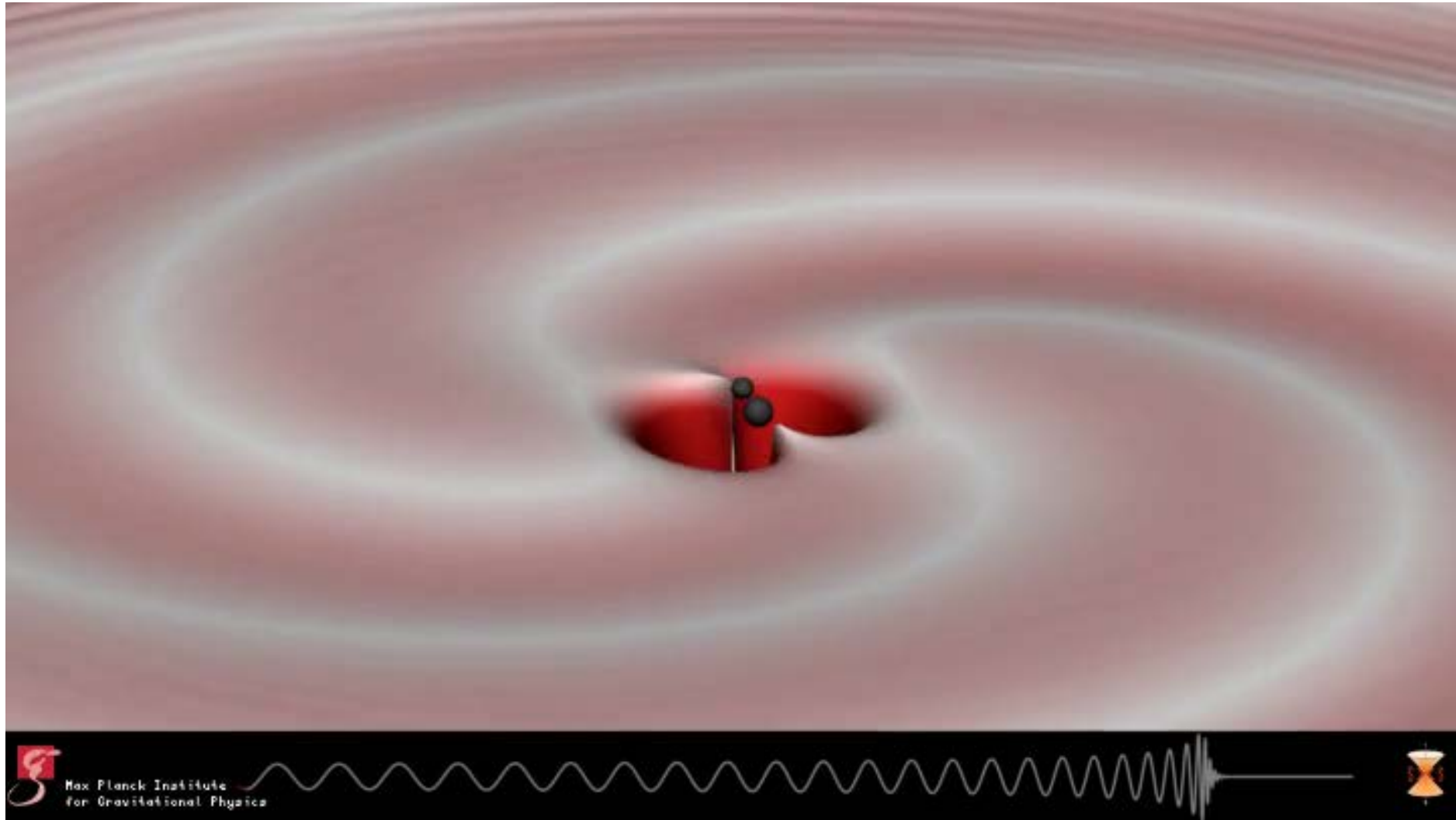
Une sensibilité record

- Sensibilité très largement améliorée
 - Amélioration d'un facteur 3-4 sur une large gamme de fréquence
→ Facteur 30-60 au niveau du volume d'Univers observé
- Gain impressionnant à basse fréquence – où se situe le signal GW150914



L'événement GW150914

Simulation de la fusion des deux trous noirs



Que s'est-il passé juste après GW150914 ?

- 14/09 2015, 11h51 : **événement enregistré** – Livingston, puis 7 ms plus tard à Hanford
- 3 minutes plus tard : **événement repéré**, messages automatiques envoyés
 - Suivi temps réel important pour la recherche éventuelle de contreparties
- 1 heure plus tard : **premiers échanges d'e-mails** dans les collaborations LIGO et Virgo

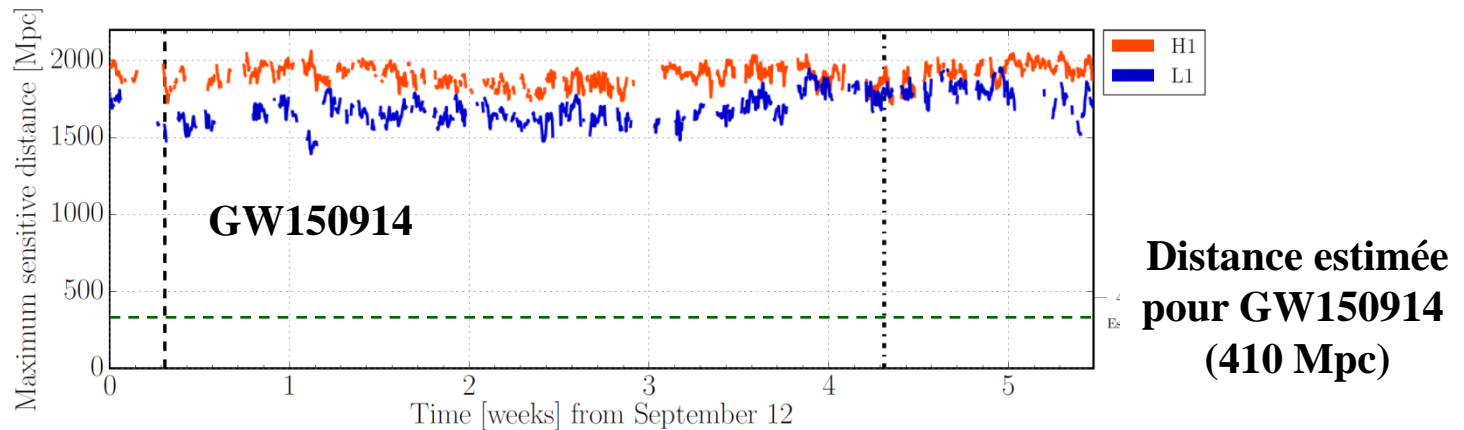
From Marco Drago★
Subject [CBC] Very interesting event on ER8

Hi all,
cWB has put on gracedb a very interesting event in the last hour.
<https://gracedb.ligo.org/events/view/G184098>

- 20 minutes plus tard : **pas de signal artificiel injecté**
 - Confirmation officielle à 17h59 le même jour
- 10 minutes plus tard : une **possible fusion de deux trous noirs**
- 25 minutes plus tard : **qualité des données bonne** a priori
- 15 minutes plus tard : **premières estimations des paramètres du signal**
 - Taux de fausses alarmes $< 1 / 300$ ans : **un événement significatif !**
- 2 jours plus tard (16/09, 14h39) : alerte envoyée aux télescopes partenaires

La qualité des données

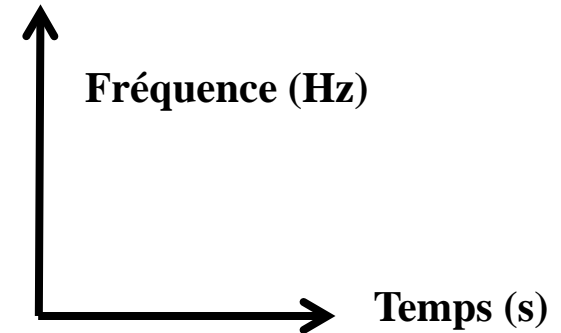
- Peu après que GW150914 a été identifié comme un événement prometteur, il a été décidé de « figer » le détecteur pour accumuler des données dans cette configuration
- ~40 jours (jusqu'à fin octobre) correspondant à 16 jours de données en coïncidence
→ Performances constantes sur cette période



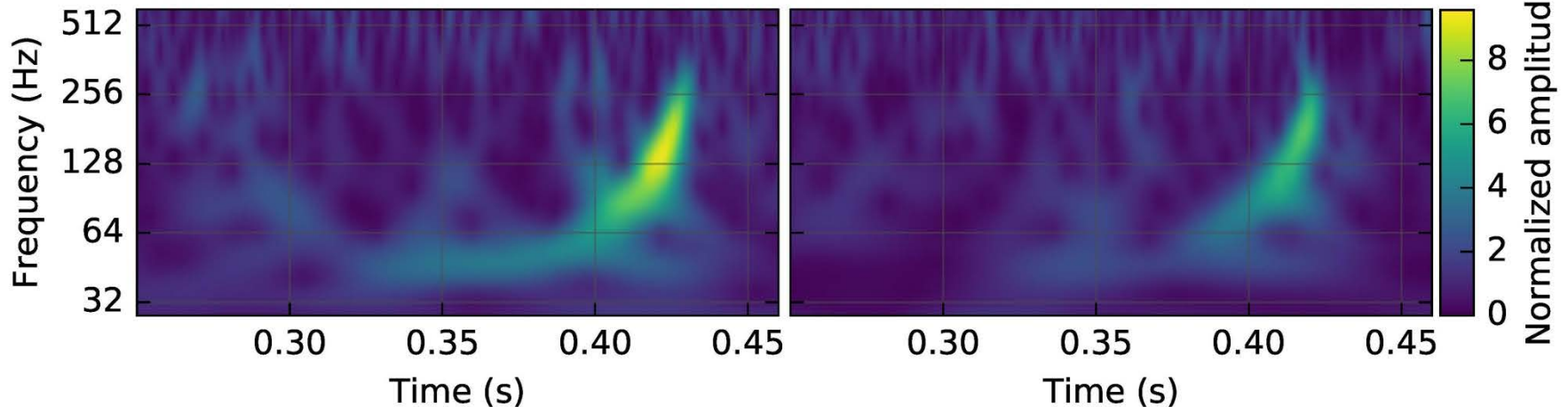
- Des milliers de senseurs surveillent l'état de l'ITF ainsi que l'environnement
 - Identification de couplages avec le canal « ondes gravitationnelles » $h(t)$
 - Estime l'amplitude de la perturbation pour produire un signal comme GW150914
 - Sans oublier la forme très particulière de ce signal
 - Etudes très détaillées – à la fois pour les bruits corrélés et non-corrélés (entre ITFs)
 - Identification (et rejet) des périodes où la qualité des données est mauvaise
- Conclusion claire : rien à signaler de ce côté, tout est normal !

Recherche de signaux transitoires

- Recherche d'excès d'énergie – par rapport au bruit – dans les diagrammes temps-fréquence
 - Utilisation d'ondelettes



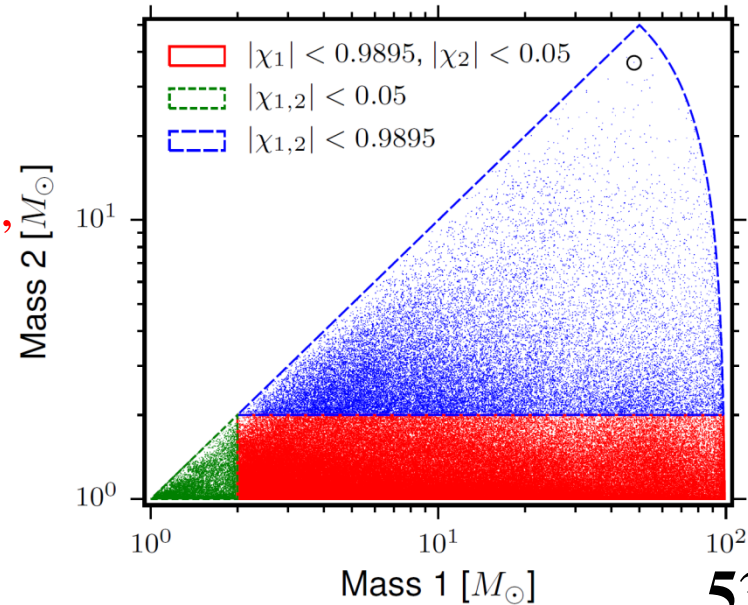
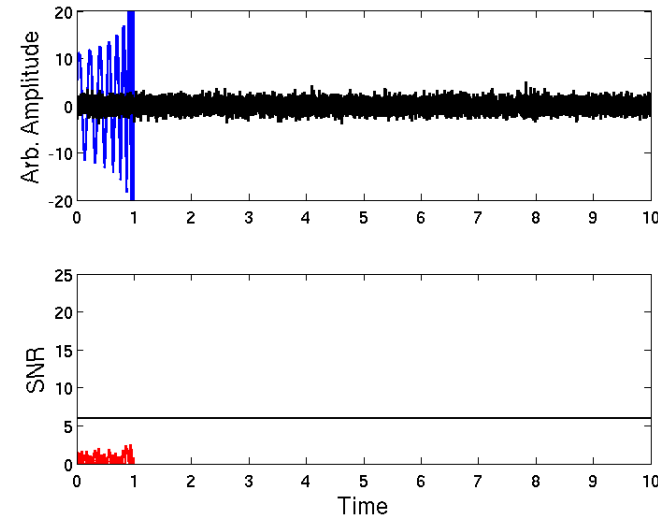
Le signal GW150914 est suffisamment fort pour être visible « à l'œil »



- L'excès doit être cohérent (et coïncident) entre les deux interféromètres
- Efficacité similaire à celle des recherches par filtrage adapté pour les systèmes binaires de trous noirs
 - Fonctionnement en temps réel pour O1 !

Filtrage adapté ...

- ... ou la manière **optimale** de **chercher un signal connu**
 - Même **faible** – en particulier : **invisible à l'œil nu** !
- On « **compare** » (opération **mathématique**) les données avec un « **calque** » qui correspond au signal cherché. **Si les données contiennent un signal qui « ressemble » beaucoup au calque, l'algorithme le fait « ressortir ».**
- En fait des (centaines de) milliers de calques
 - Correspondant chacun à des jeux de paramètres (inconnus) différents
 - Calcul analytique + simulations numériques
 - **Espace des paramètres, « pavé » par des calques, efficaces chacun dans une petite région**
 - Voir exemple ci-contre
 - chaque point correspond à un calque
- **Recherche de signaux forts dans les deux ITFs, coïncidents en temps et « ressemblants »**



Estimation du « bruit de fond »

- GW150914 n'est donc pas dû à un problème au niveau de l'interféromètre, ni à une perturbation de l'environnement (corrélée ou pas entre les ITFs)
→ Peut-il être dû à des fluctuations « normales » du bruit de mesure ?
 - Utilisation d'outils mathématiques pour répondre à cette question

- (Seulement) 16 jours de données en coïncidence

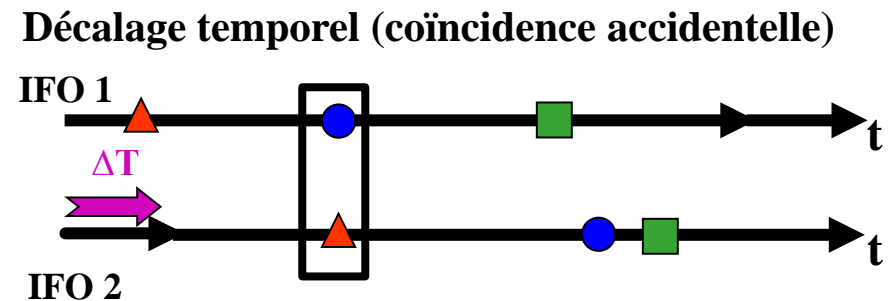
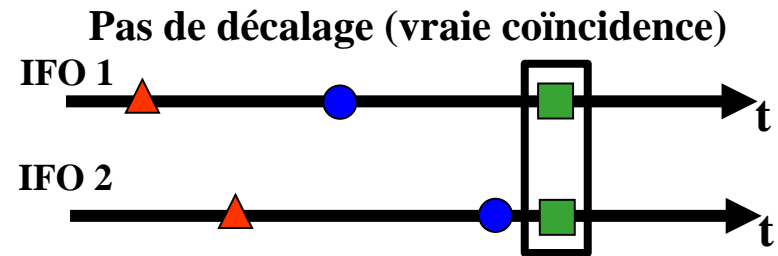
→ Méthode des « décalages temporels » pour générer un lot de données plus conséquent

- Comment ? Rappel : pour une vraie OG, les signaux sont décalés de 10 ms au plus entre les deux ITFs

- Trajet de la lumière sur 3000 km

- En décalant les données d'un ITF d'un temps (bien) plus long, on obtient un nouveau jeu de données dans lequel les coïncidences sont dues au bruit

- 16 jours de données en coïncidence → des milliers d'années de « données » dites de bruit de fond



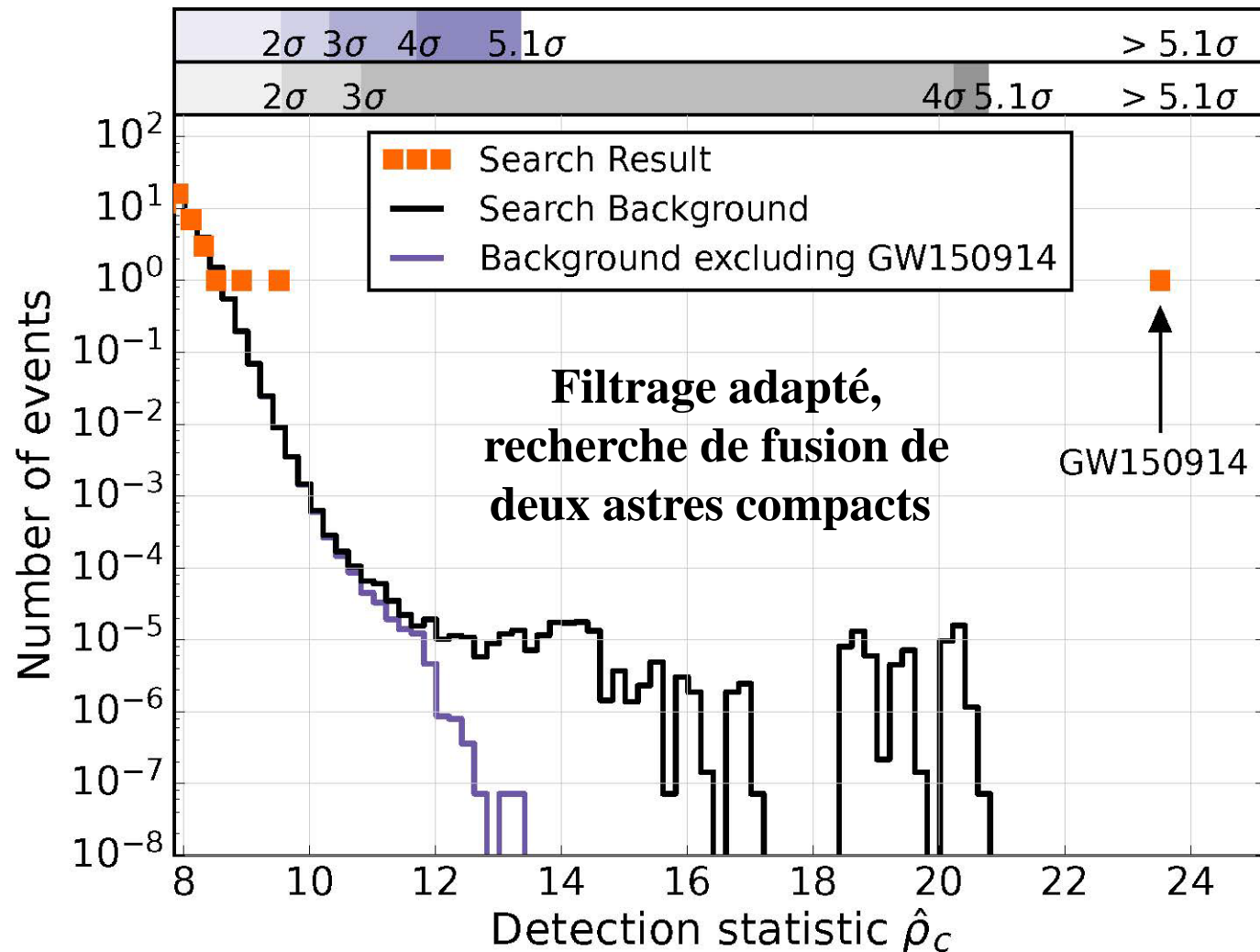
Mesurer la « réalité » du signal

- Axe des x : quantité utilisée pour classer les événements

- Plus cette valeur est grande et plus l'événement est significatif

- **GW150914** : l'événement le plus fort dans les deux ITFs

- **Nombre d'événements observés**

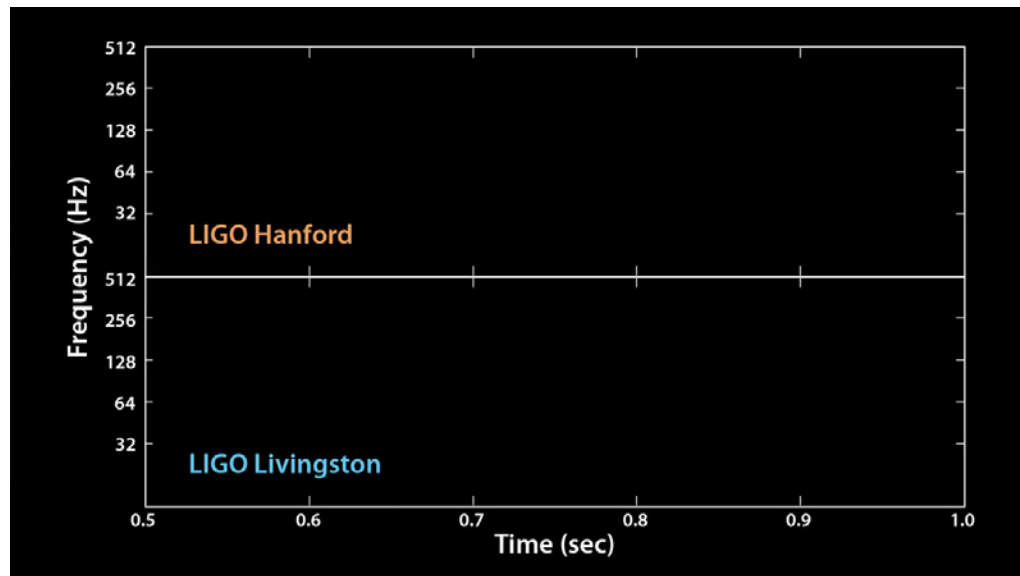


- Lignes continues : 2 estimations du bruit de fond

- SNR ~ 23.6 ; taux de fausse alarme < 1 événement / 203 000 ans
Probabilité de fausse alarme $< 2 \times 10^{-7}$ ($> 5,1 \sigma$)

Le « gazouillis » de GW150914

- GW150914 n'est pas un signal audible mais son contenu en fréquence correspond à la gamme de fréquence à laquelle l'oreille humaine est sensible
→ **Conversion de la forme d'onde en son**
- Signal répété huit fois
 - Vrai signal : deux fois
 - Signal déplacé à des fréquences plus élevées : deux fois
→ Signal plus audible
 - Vrai signal : deux fois
 - Signal déplacé à des fréquences plus élevées : deux fois



La Terre « secouée » par GW150914

- L'effet présenté est évidemment très très très exagéré
 - Mais l'animation donne une bonne idée de l'évolution temporelle du signal



Scale of Effect Vastly Exaggerated

Au fait, pourquoi deux trous noirs ?

- **Résultat des analyses !**
 - Le meilleur calque correspond à la fusion de deux trous noirs
 - Il reproduit très bien le signal mesuré

- Deux objets massifs et compacts en orbite l'un autour de l'autre à 75 Hz (la moitié de la fréquence de l'OG), donc à une vitesse relativiste et qui se rapprochent très près avant de fusionner

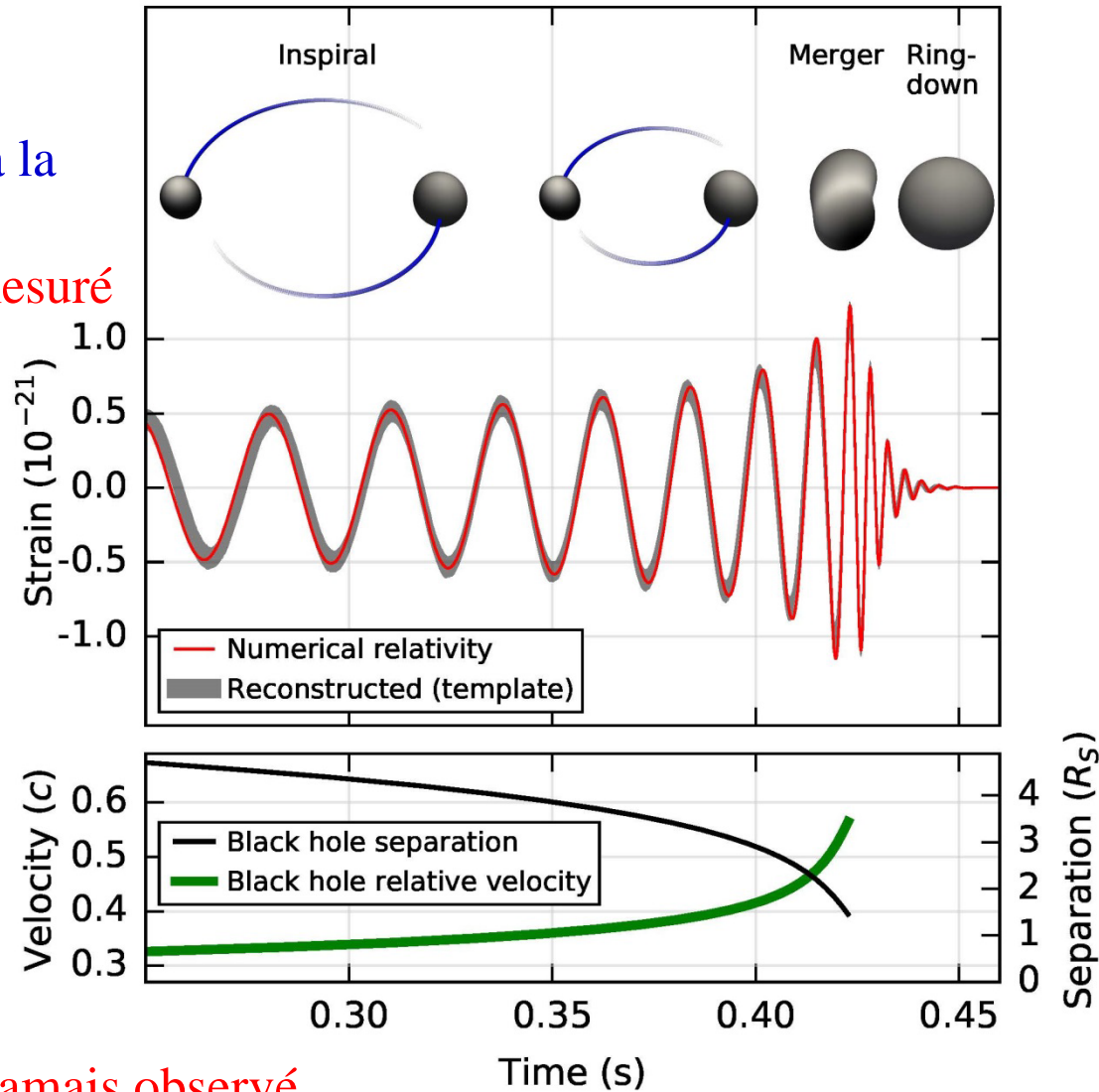
→ A peine quelques R_S !

- Seuls des trous noirs peuvent correspondre à ces observations

- $\sim 3 M_{\text{Soleil}}$ rayonnées en OG

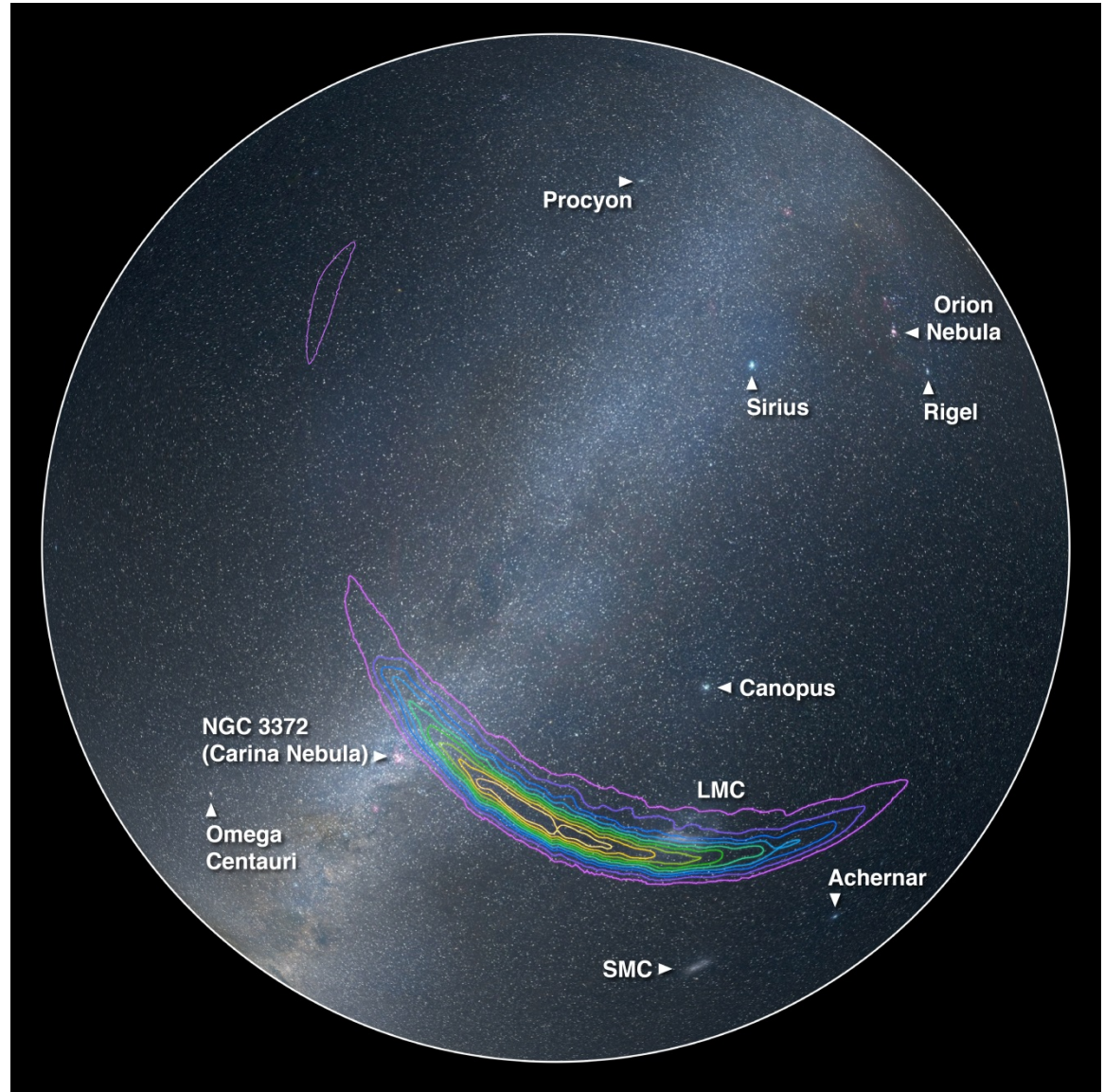
- L'événement le plus énergétique jamais observé

- Plus que tous les sursauts gamma détectés jusqu'à aujourd'hui
- Puissance crête plus de 10 fois supérieure à celle émise par l'Univers visible



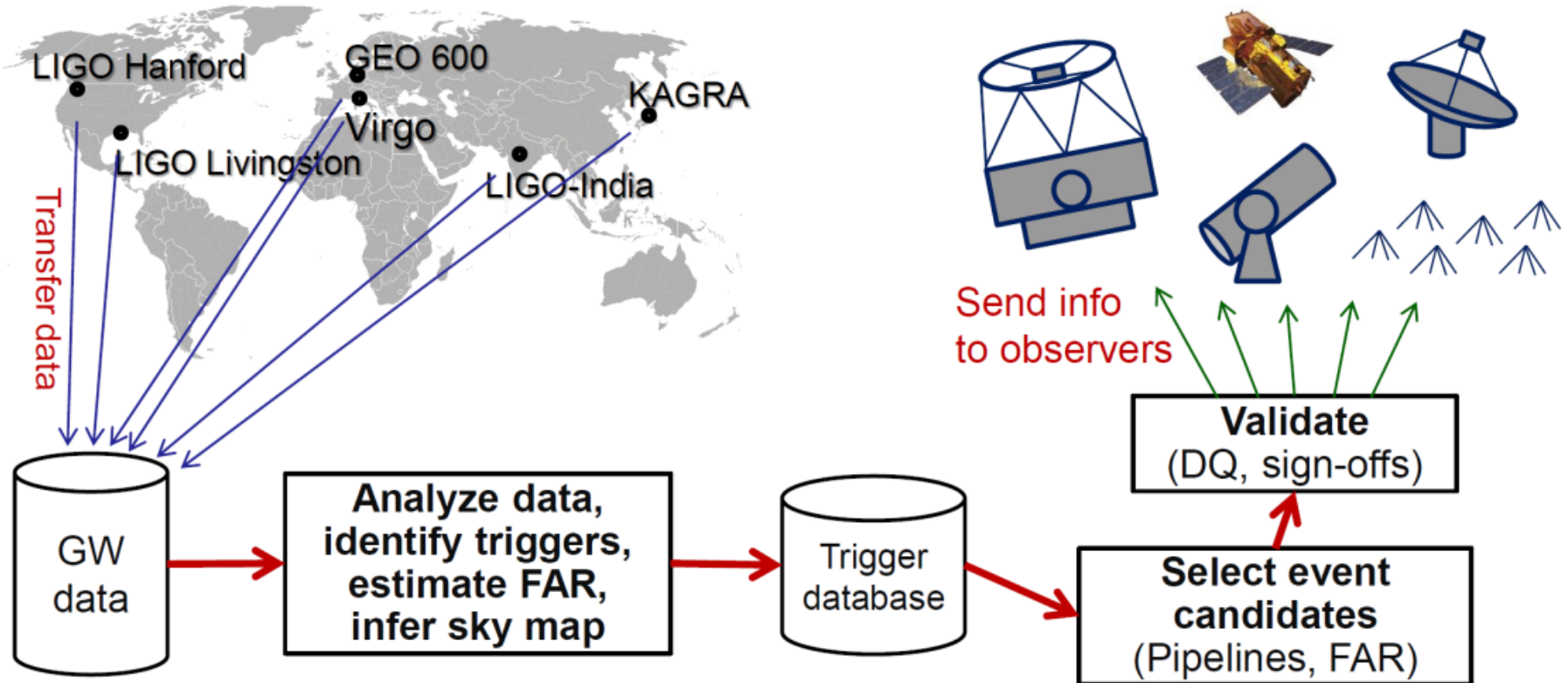
Carte du ciel associée à GW150914

- Ciel au moment de l'événement
- Contours montrent les zones où la présence de la source est possible
- Taille de la zone la plus probable : $\sim 590 \text{ degrés}^2$
- Vue de l'Atlantique sud ; Nord en haut ; lever du Soleil ; Voie Lactée en diagonale



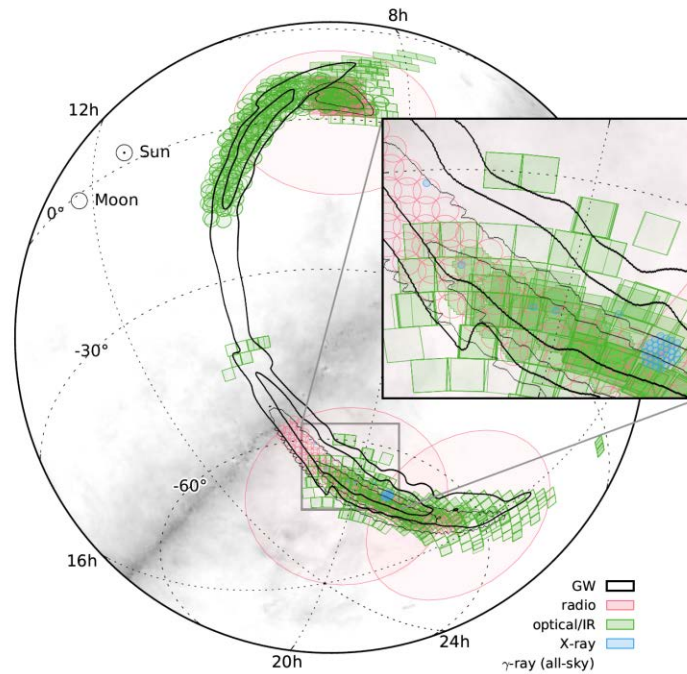
Recherche de contreparties optiques

- Méthode

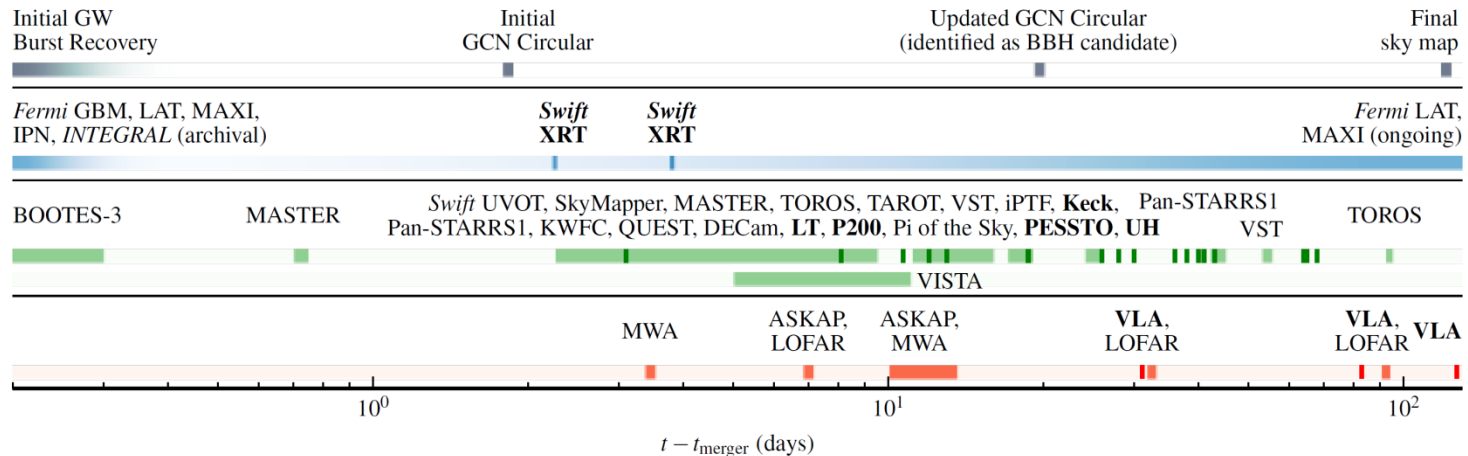


Recherche de contreparties optiques

- Couverture du ciel



- Observations : aucune contrepartie identifiée

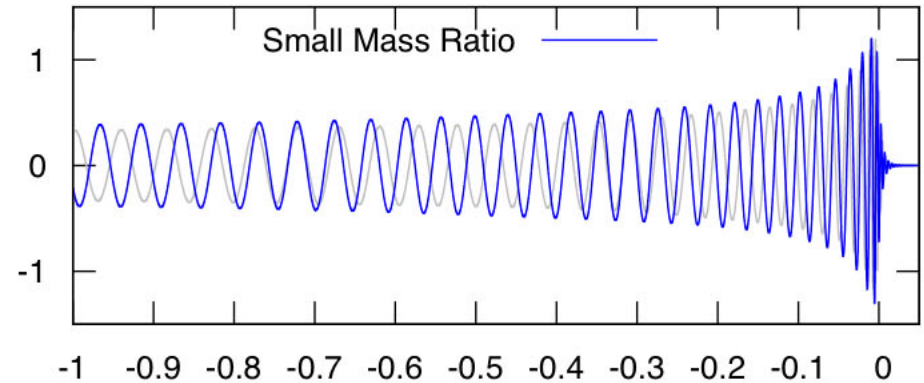
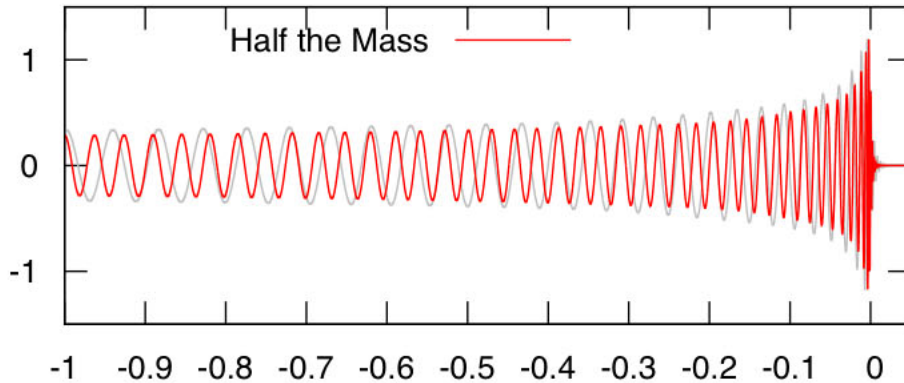
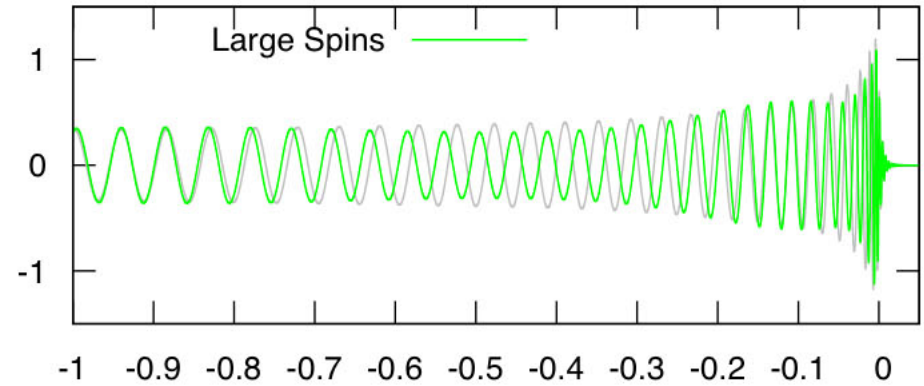
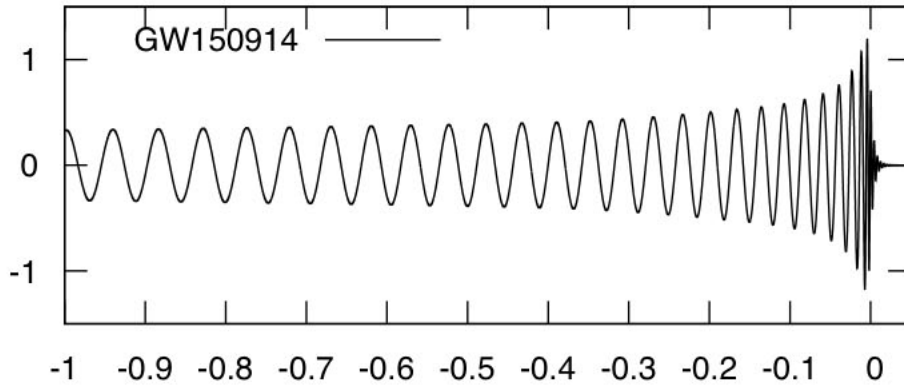


Mesure des paramètres du signal

- Une quinzaine de paramètres au total
 - **Masses** et **moment angulaires** des deux trous noirs initiaux et du trou noir final, **distance** de la source, etc.
- Utilisation de **méthodes statistiques** – inférence bayésienne – pour
 - obtenir une valeur et une incertitude pour chaque paramètre
 - comparer des modèles de forme d'onde entre eux
- **Résultats astrophysiques**
 - Taux d'occurrence d'événements comme GW150914
 - **Plus d'événements nécessaires pour obtenir une mesure précise**
 - Scénarios de formation de systèmes binaires de trous noirs stellaires
- **Tests de la relativité générale**
 - Aucune déviation significative observée par rapport aux prédictions
 - Meilleure limite sur la masse d'un éventuel graviton
 - **$< 10^{-22} \text{ eV}/c^2$**

Exemple de mesure

- Impact des paramètres des trous noirs sur la forme d'onde observée



- Evolutions très différentes de la fréquence des signaux au cours du temps
→ Détermination des jeux de paramètres les plus probables

GW150914: FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

| | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| observed by | LIGO L1, H1 | duration from 30 Hz | ~ 200 ms |
| source type | black hole (BH) binary | # cycles from 30 Hz | ~10 |
| date | 14 Sept 2015 | peak GW strain | 1×10^{-21} |
| time | 09:50:45 UTC | peak displacement of interferometers arms | ± 0.002 fm |
| likely distance | 0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc | frequency/wavelength at peak GW strain | 150 Hz, 2000 km |
| redshift | 0.054 to 0.136 | peak speed of BHs | ~ 0.6 c |
| signal-to-noise ratio | 24 | peak GW luminosity | 3.6×10^{56} erg s ⁻¹ |
| false alarm prob. | < 1 in 5 million | radiated GW energy | 2.5-3.5 M _⊙ |
| false alarm rate | < 1 in 200,000 yr | remnant ringdown freq. | ~ 250 Hz |
| Source Masses | M _⊙ | remnant damping time | ~ 4 ms |
| total mass | 60 to 70 | remnant size, area | 180 km, 3.5×10^5 km ² |
| primary BH | 32 to 41 | consistent with general relativity? | passes all tests performed |
| secondary BH | 25 to 33 | graviton mass bound | $< 1.2 \times 10^{-22}$ eV |
| remnant BH | 58 to 67 | coalescence rate of binary black holes | 2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹ |
| mass ratio | 0.6 to 1 | online trigger latency | ~ 3 min |
| primary BH spin | < 0.7 | # offline analysis pipelines | 5 |
| secondary BH spin | < 0.9 | CPU hours consumed | ~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days) |
| remnant BH spin | 0.57 to 0.72 | papers on Feb 11, 2016 | 13 |
| signal arrival time delay | arrived in L1 7 ms before H1 | # researchers | ~1000, 80 institutions in 15 countries |
| likely sky position | Southern Hemisphere | | |
| likely orientation resolved to | face-on/off ~600 sq. deg. | | |

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= 9.46×10^{12} km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc, fm=femtometer= 10^{-15} m, M_⊙=1 solar mass= 2×10^{30} kg

En résumé



Le trou noir final a environ la « taille » de l'Islande

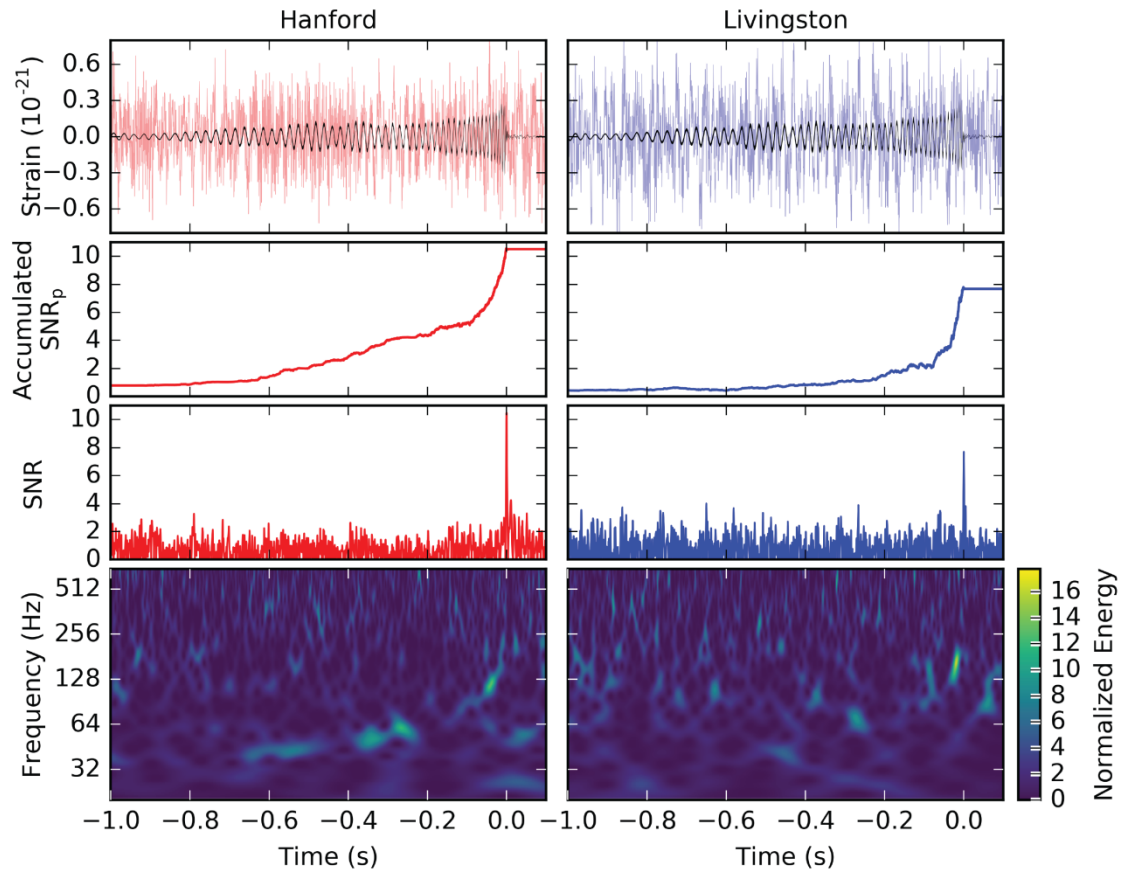
L'événement GW151226

GW151226

- Une autre coalescence de deux trous noirs

- Tous les signaux ne s(er)ont pas visibles à l'œil nu !

- Nécessité du **filtrage adapté**



- Masses des trous noirs plus petites (14 et 8 M_{\odot})
 - Amplitude du signal plus faible
 - Plus de cycles dans la bande de détection

GW151226

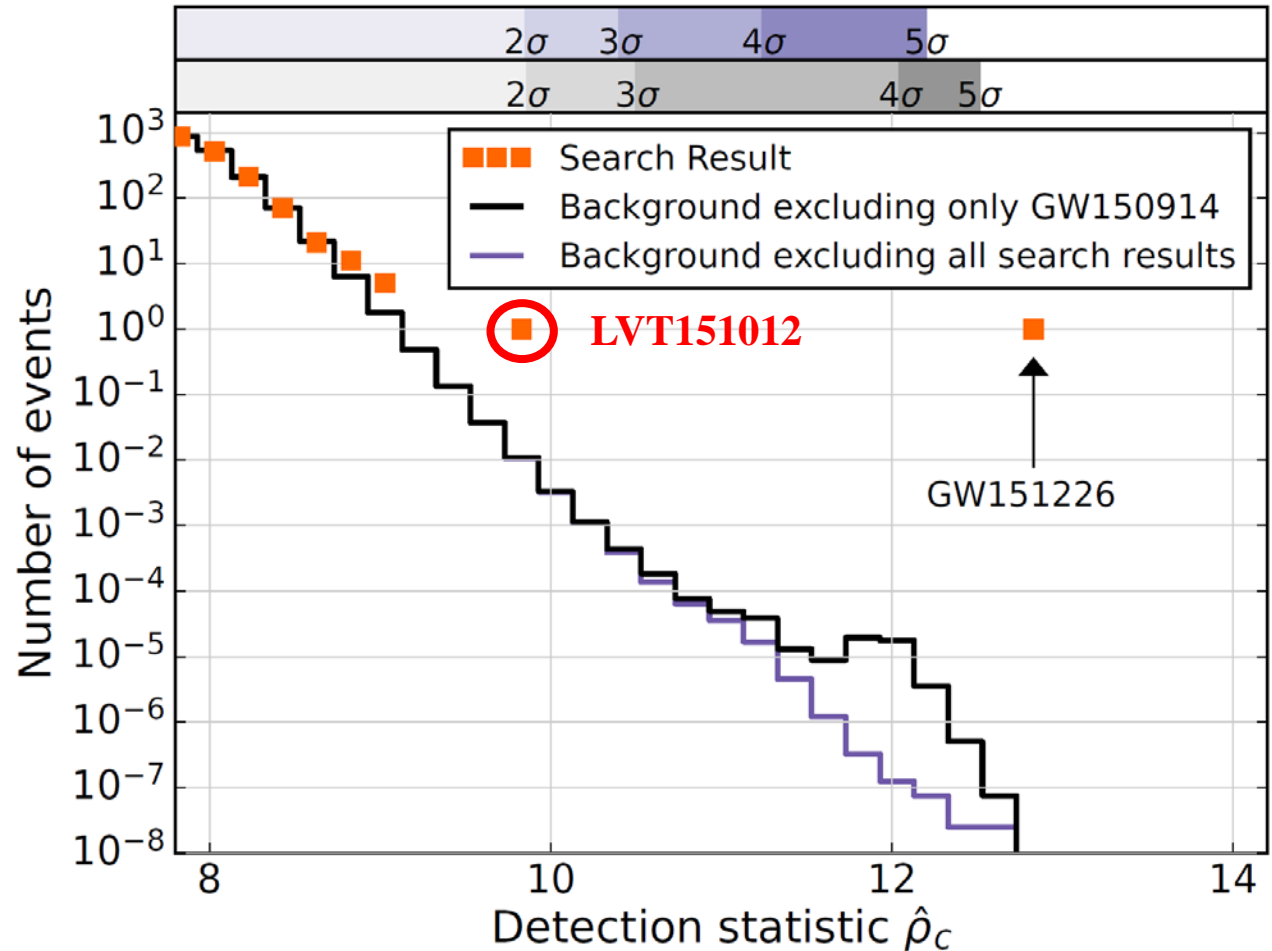
- 2^{ème} événement le plus fort enregistré

- Après GW150914

- Un candidat supplémentaire : **LVT151012**

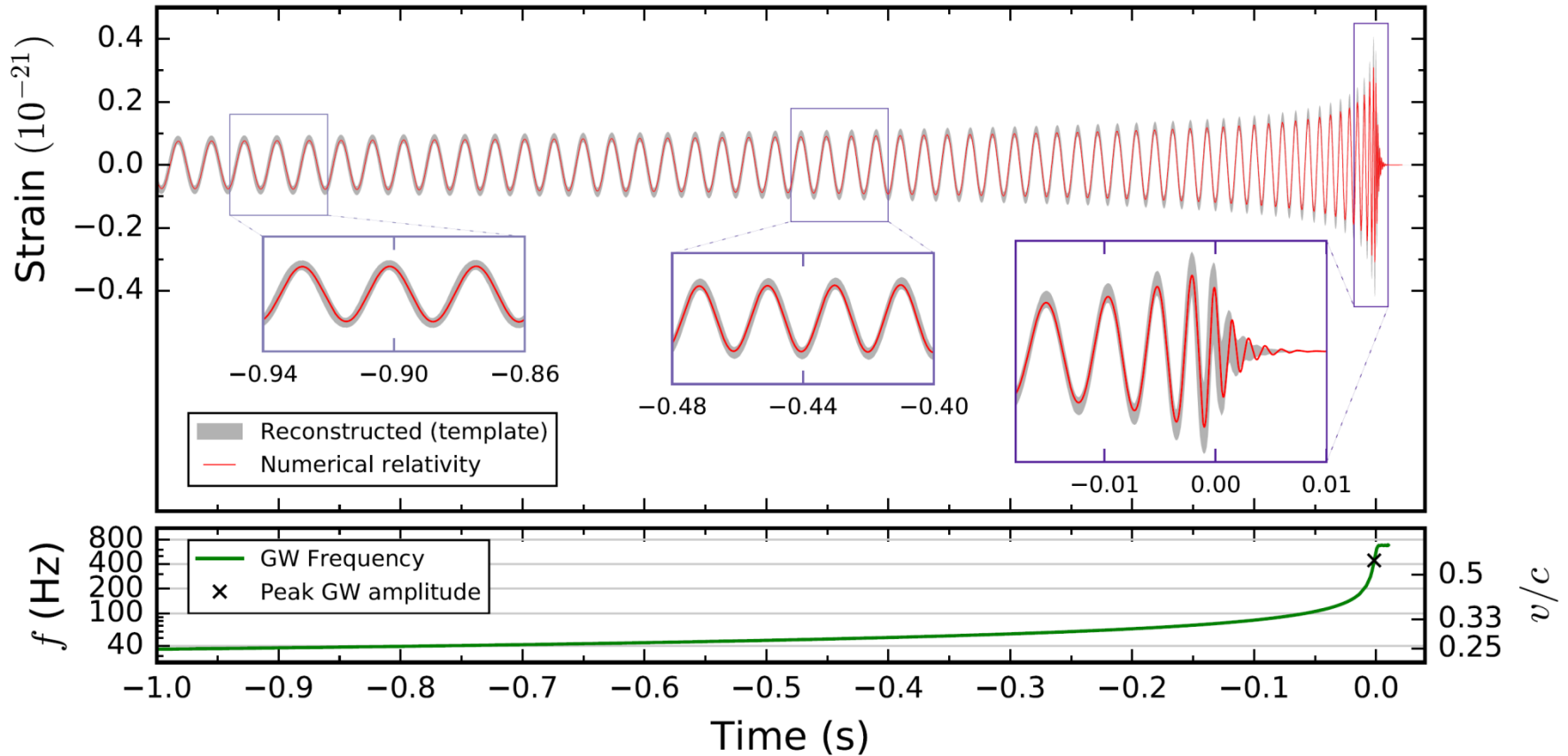
- Signification statistique insuffisante

→ « Source » beaucoup plus éloignée (~1 Gpc)



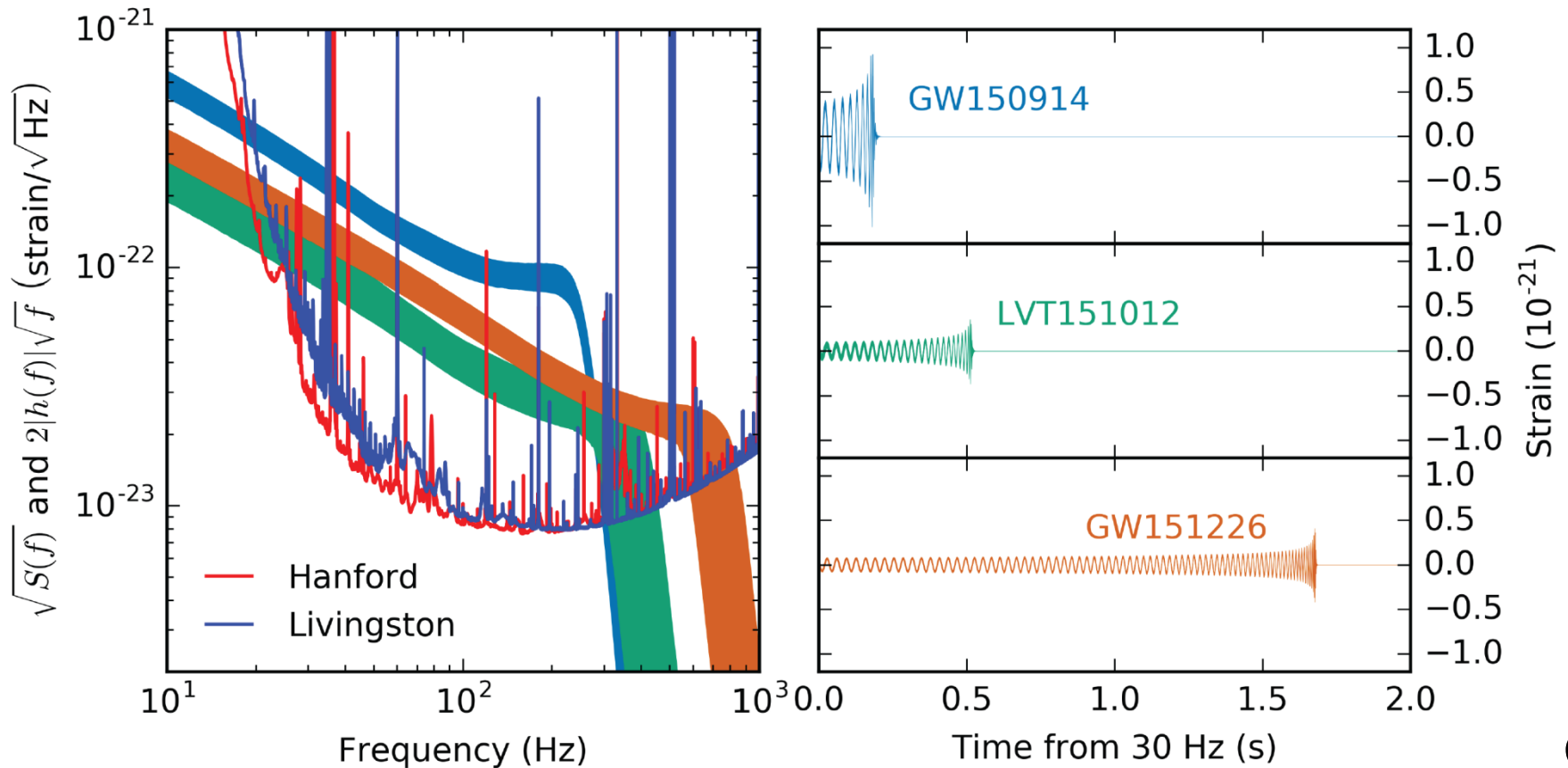
GW151226

- **Excellent accord** entre formes d'onde
 - analytique (développement post-newtonien, en gris) et
 - numérique (en rouge)



Bilan de la prise de données O1

- Deux détections confirmées, un candidat
- Systèmes binaires de trous noirs
- Pas d'autre type de source observé



Et maintenant ?

Situation actuelle des détecteurs

- **Détecteurs LIGO avancés**

- Démarrage de la **seconde prise de données** le 30 novembre 2016
- Point fin janvier : **12 jours de données en coïncidence** au 23 janvier, **2 candidats identifiés**

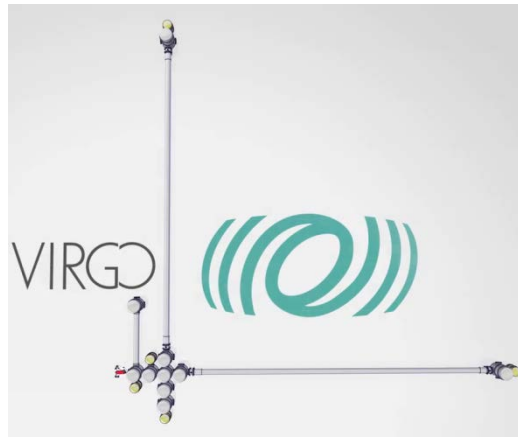
- **Détecteur Virgo avancé**

- **En pleine phase de démarrage** du détecteur !
- **Progrès importants** dans la compréhension et le contrôle de l'instrument
→ Un « nouveau » détecteur
- **Objectif : rejoindre LIGO « dès que possible »**
→ Encore quelques semaines/mois d'effort ...

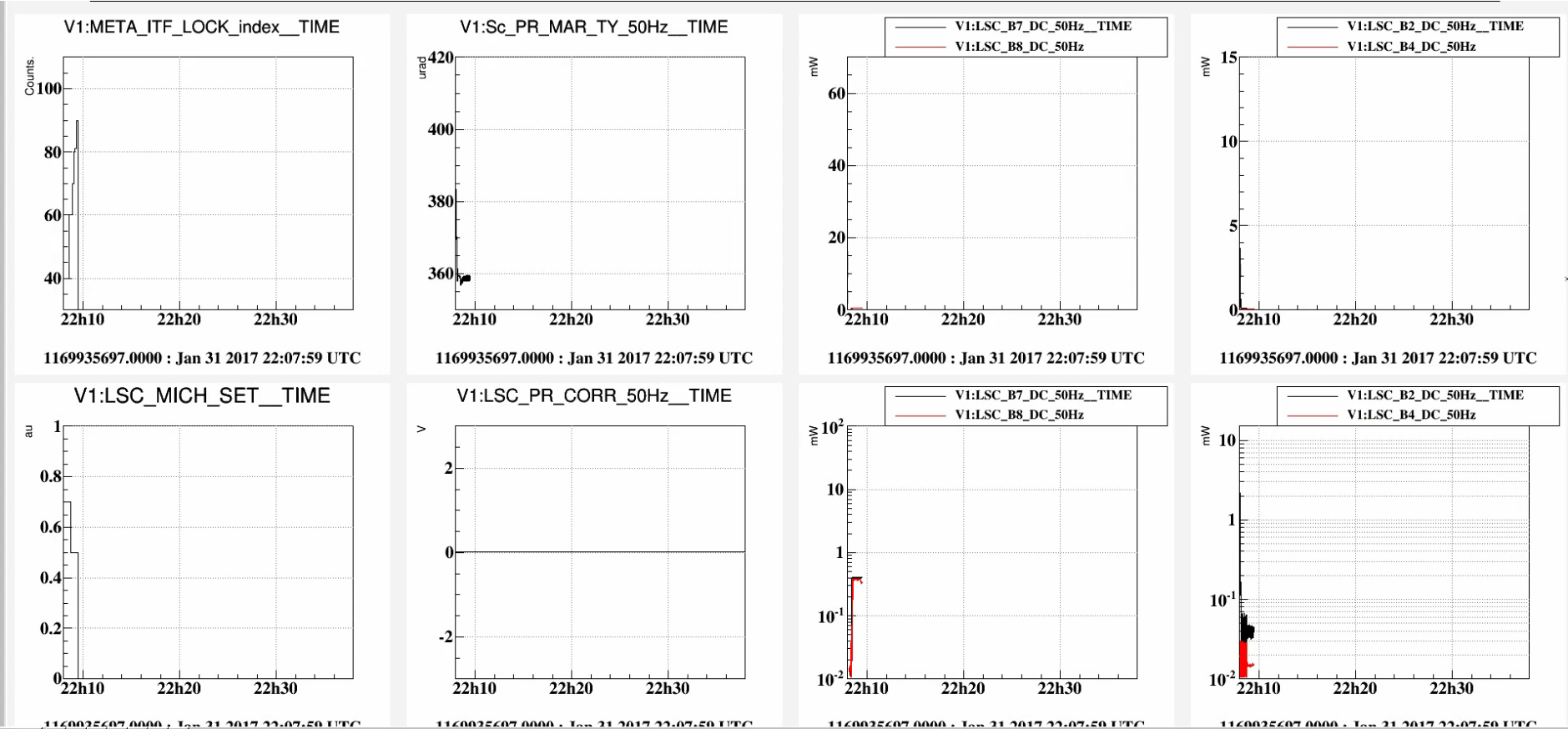
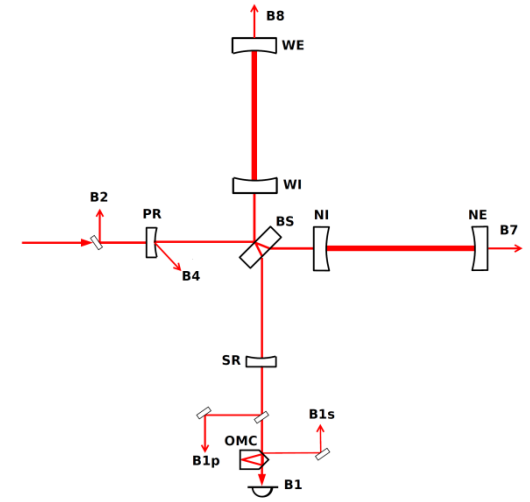


Exemple de contrôle

- 31 janvier 2017
- PR-ITF
Offset frange noire : 0.1

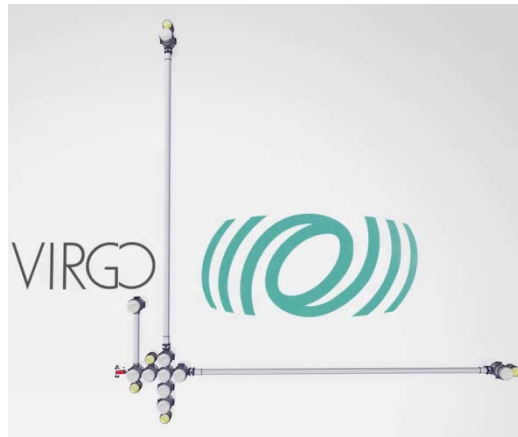


[Version rapide]

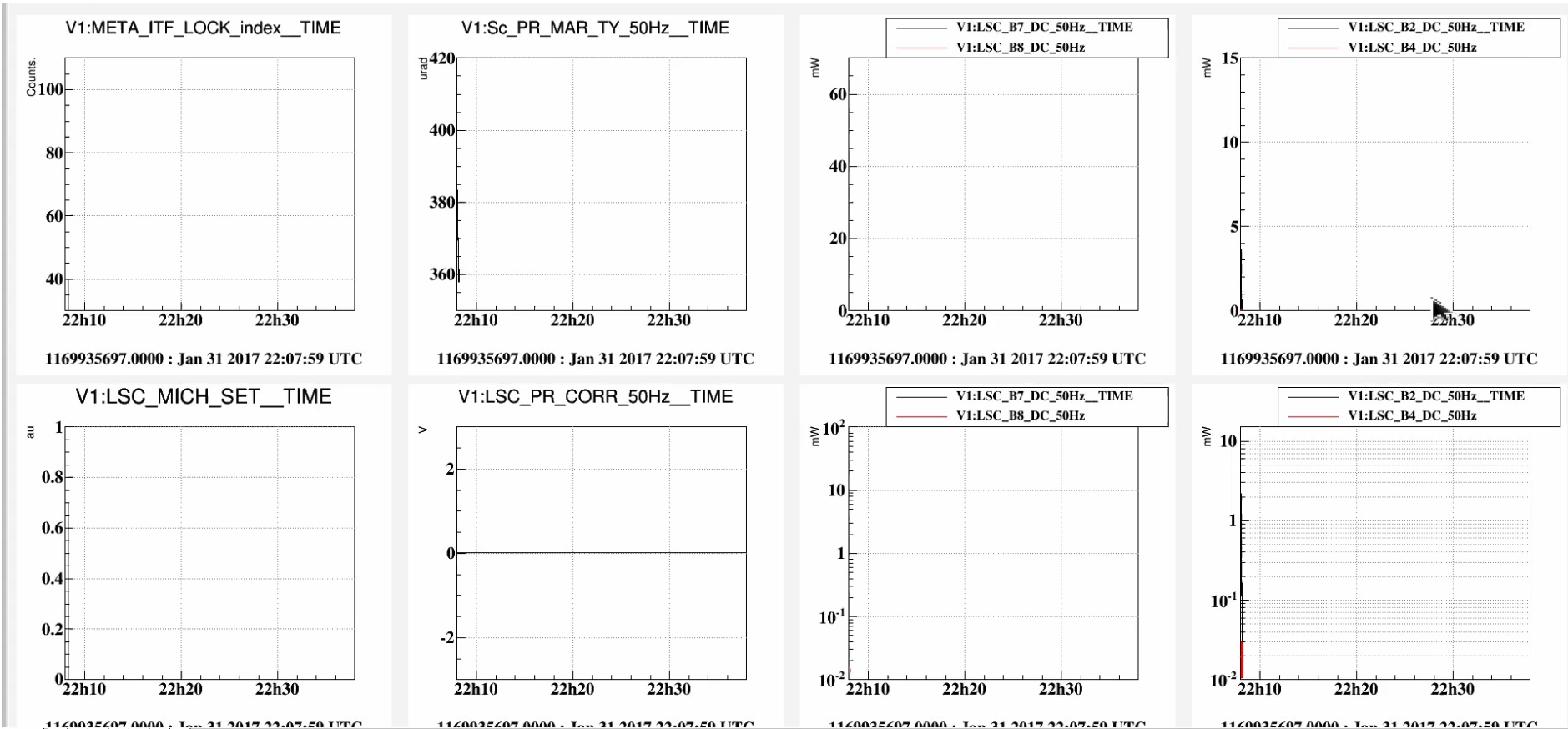
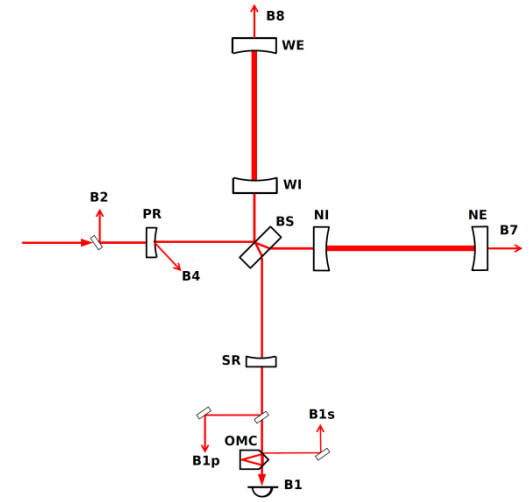


Exemple de contrôle

- 31 janvier 2017
- PR-ITF
Offset frange noire : 0.1

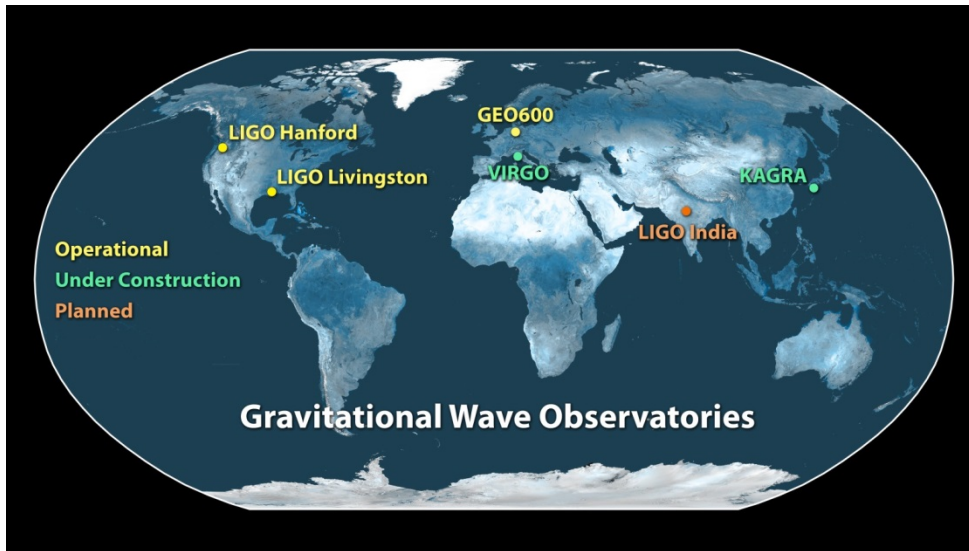


[Version lente]



Réseau de détecteurs

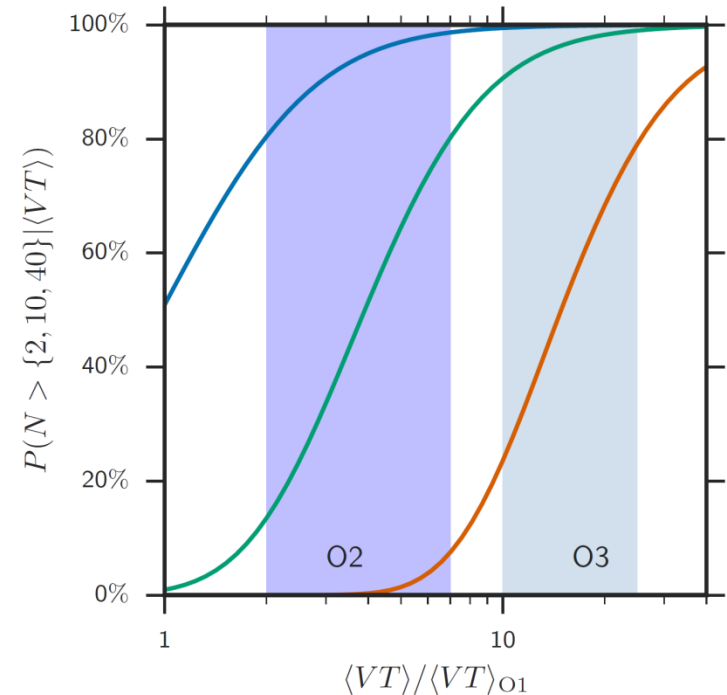
- Bientôt : un **réseau de détecteurs terrestres**
 - **plus large** et
 - **plus performant**



→ On s'attend à observer
(beaucoup) d'autres signaux

Probabilités que le nombre
de détections excède

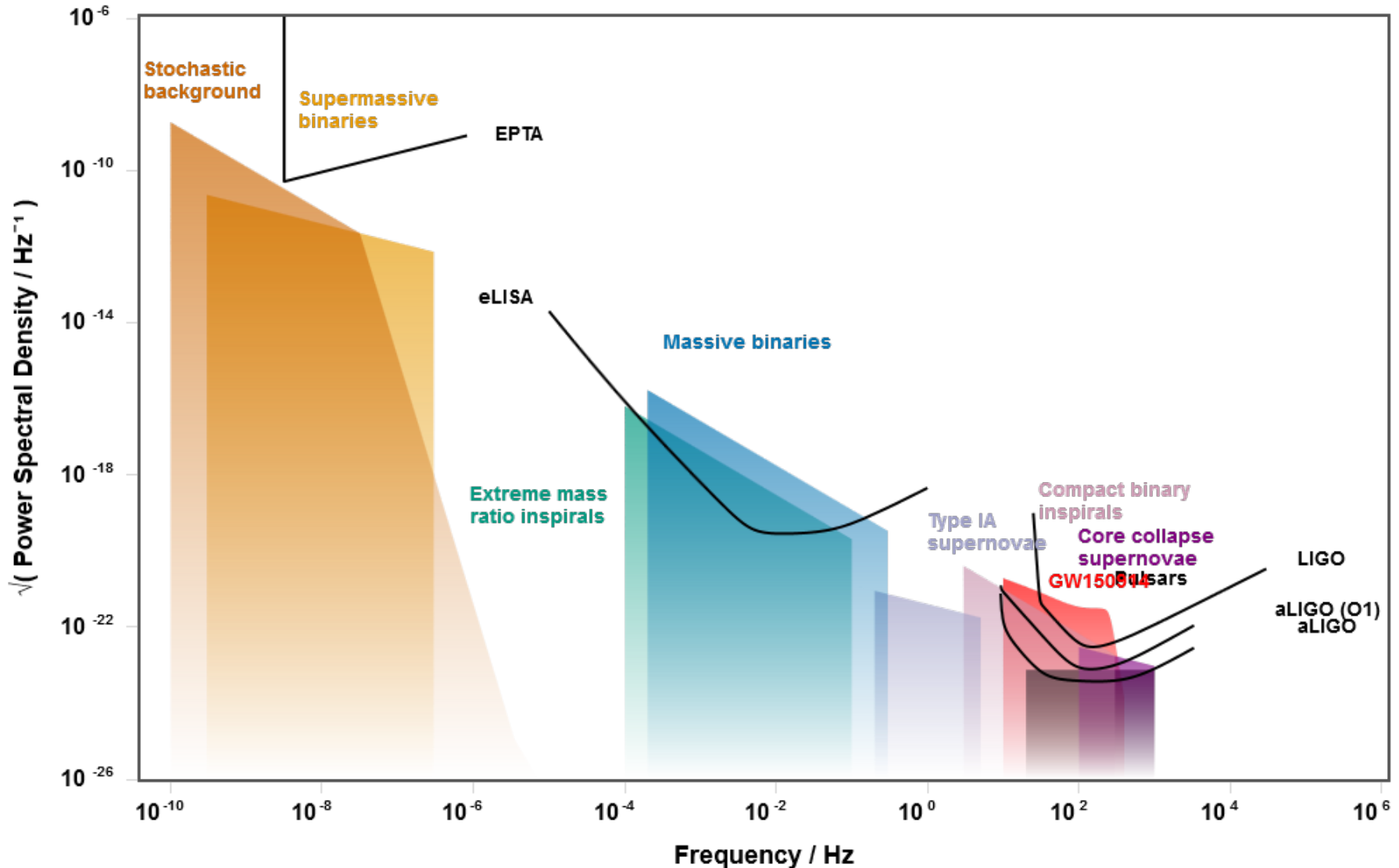
- **2**
- **10**
- **40**



OX : prise de données
« d'observation » numéro **X**

Une grande variété de sources et de détecteurs

- Site internet associé : <http://rhcole.com/apps/GWplotter>



Conclusions

- Premières observations directes des ondes gravitationnelles
 - Premières observations directes des trous noirs
 - Les systèmes doubles de trous noirs existent et fusionnent
 - En un temps inférieur à l'âge de l'Univers !
 - Taux d'événements encore incertain
 - Plus d'événements nécessaires pour l'estimer avec précision
 - Des trous noirs ont des masses de l'ordre de $20-30 M_{\text{Soleil}}$
 - Implications astrophysiques
 - Formation de trous noirs stellaires lourds, de systèmes doubles de trous noirs ...
 - Pas de déviation observée par rapport aux prédictions de la relativité générale
 - LIGO/Virgo ont ouvert une nouvelle fenêtre sur l'Univers
 - A venir : chronométrage des pulsars, eLISA, polarisation du CMB
- Nous sommes à l'aube de l'astronomie en ondes gravitationnelles

La Nuit des Ondes Gravitationnelles

#NuitDesOG

Paris
Annecy
Nice
Lyon
Marseille
Lille
Dunkerque
Nancy
Bordeaux
Limoges
Orléans
Strasbourg
Cascina (Italie)
Florence (Italie)

La nuit
des
ondes
gravita-
tionnelles

20 mars 2017

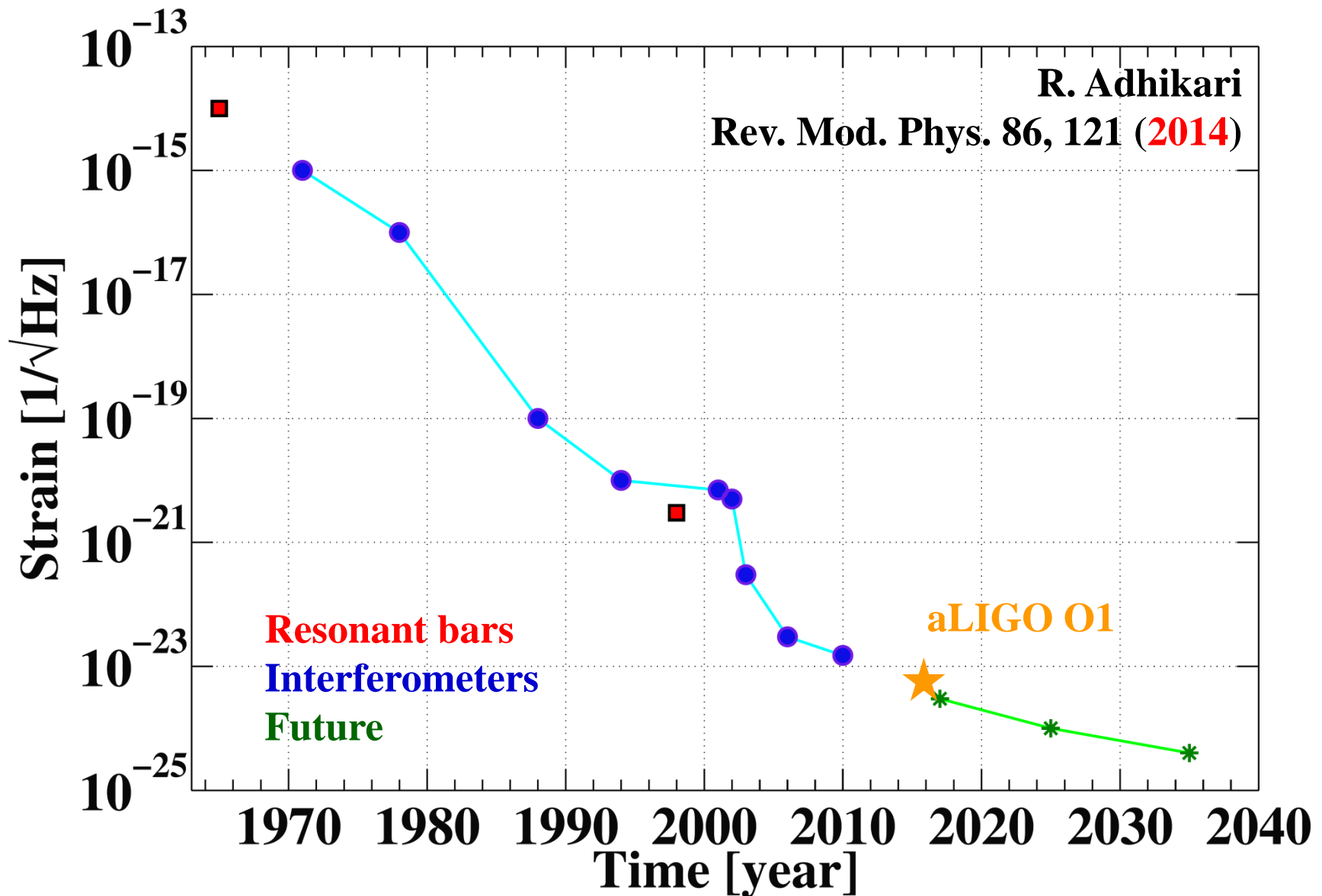
Des concours ouverts à tous
Date limite de dépôt des dossiers le 1er mars 2017
Inscription préalable obligatoire sur le site

Une soirée festive
Le 20 mars 2017, au grand Rex à Paris et dans de nombreuses villes
(liste des villes disponibles sur le site)

<http://www.cnrs.fr/nuit-des-ondes-gravitationnelles/>



Evolution du pic de sensibilité des détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles



Film CNRS Images

- <https://lejournal.cnrs.fr/videos/ondes-gravitationnelles-les-detecteurs-de-lextreme>
 - 6 minutes, 2016

