

Étude des pré-déclenchements lors de la recherche à faible latence de coalescences de binaires compactes par le logiciel MBTA

Christopher Alléné

12 Juillet 2023

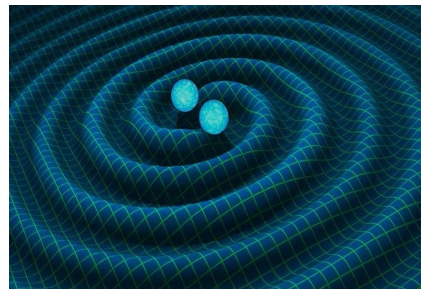
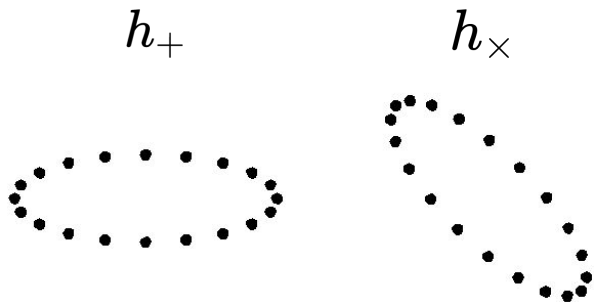
1



Les Ondes Gravitationnelles (OG)

Ondes gravitationnelles :

- Perturbation de la métrique de l'espace-temps (relativité générale)
- Vitesse de propagation : c
- Deux polarisation transverses



Emission si rotation autour d'un axe qui n'est pas de symétrie.

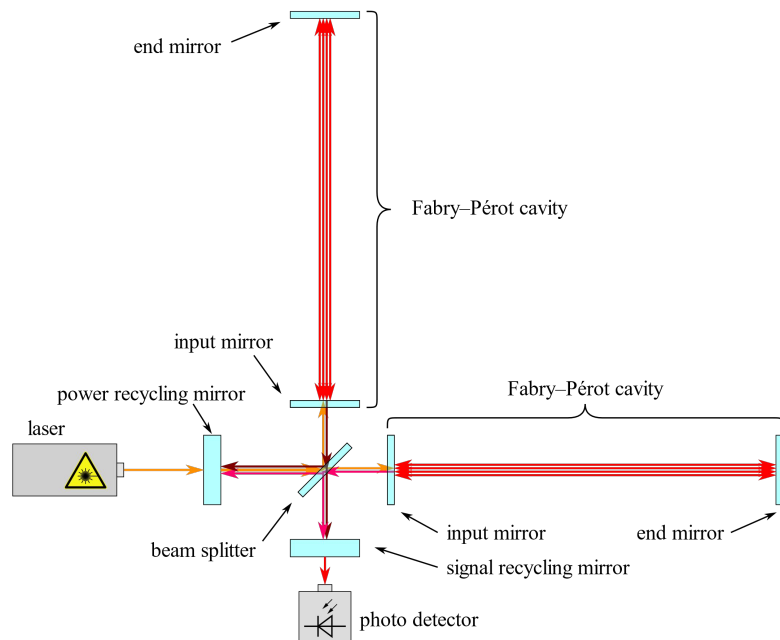
Puissance émise par une source :

$$P \simeq \frac{c^5}{G} \epsilon^2 \left(\frac{R_S}{\Delta} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6 \propto \frac{G}{c^5} \sim 10^{-53} SI$$

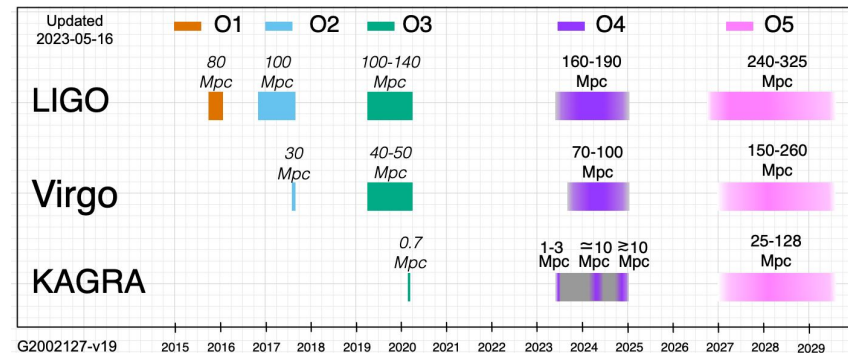
⇒ **Système binaire d'étoiles à neutrons, de trous noirs ou d'étoile à neutrons-trou noir**

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

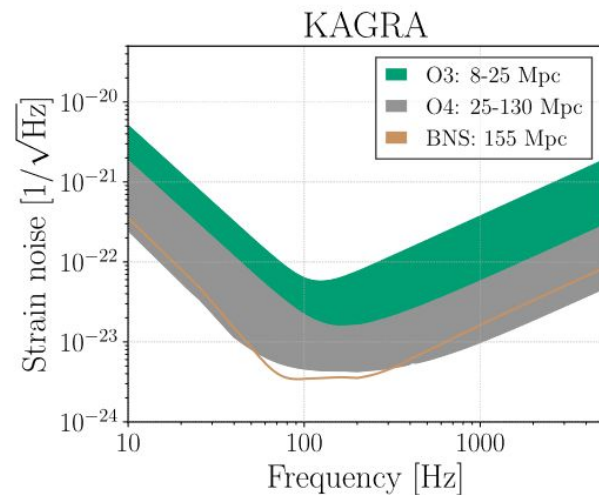
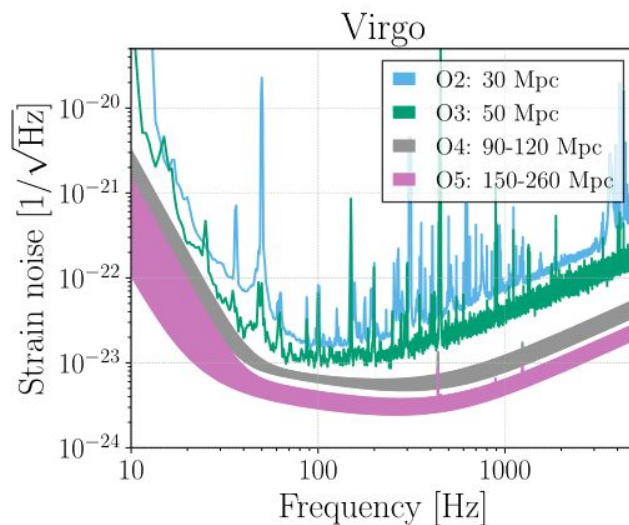
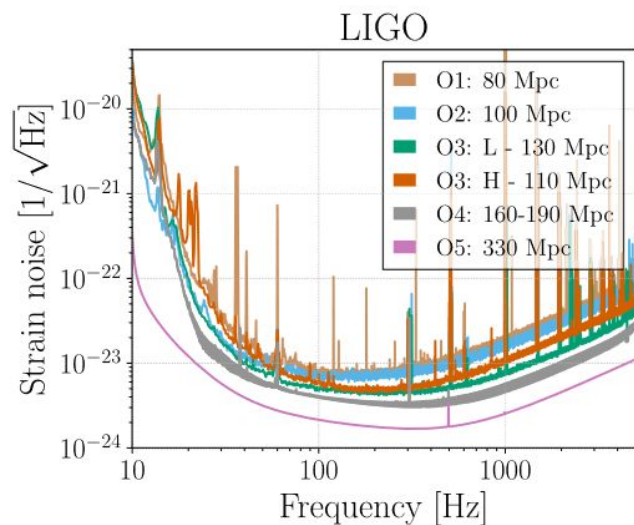
Schéma d'un détecteur



Réseau mondial d'interféromètres

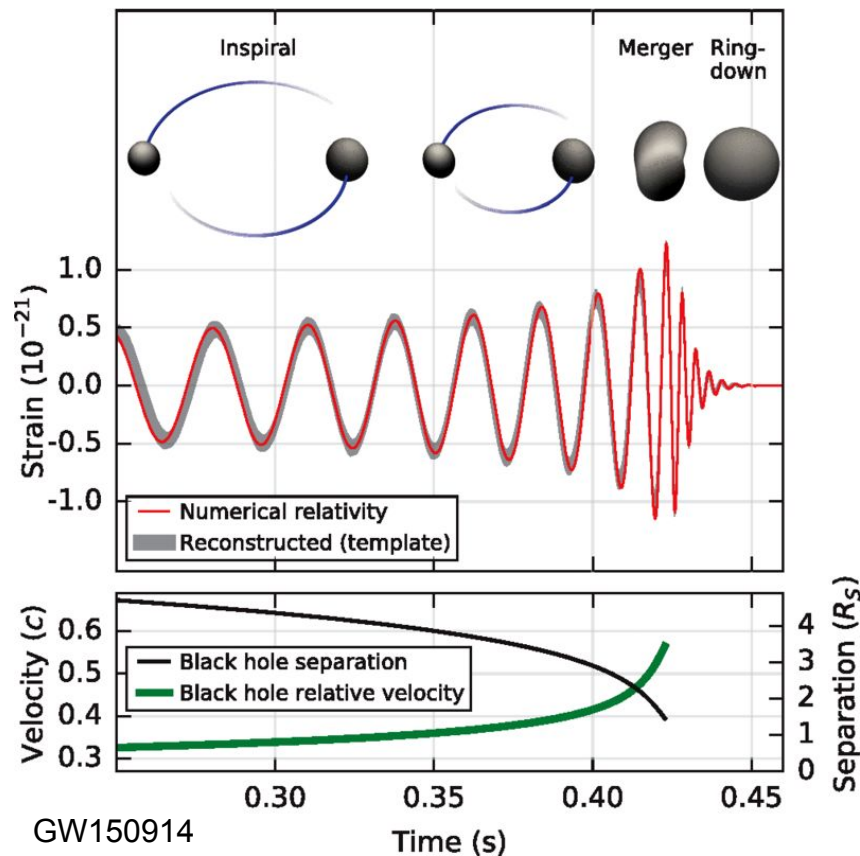


Les détecteurs d'ondes gravitationnelles



Sensibilité des détecteurs : Les sensibilités et les portées des run O4 et O5 sont des perspectives

Evolution d'un système binaire



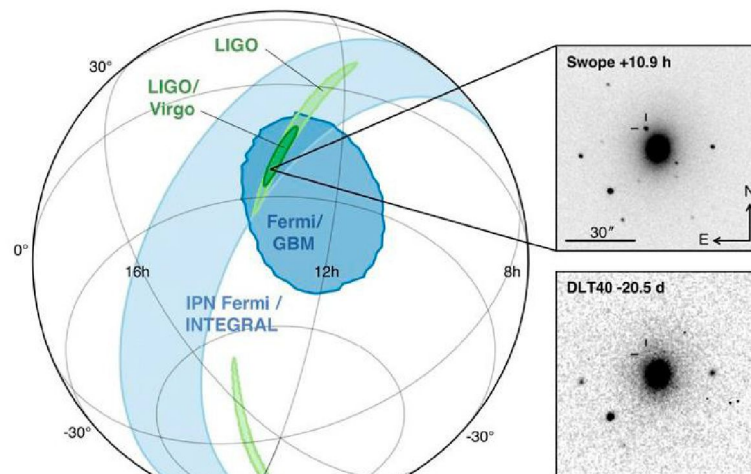
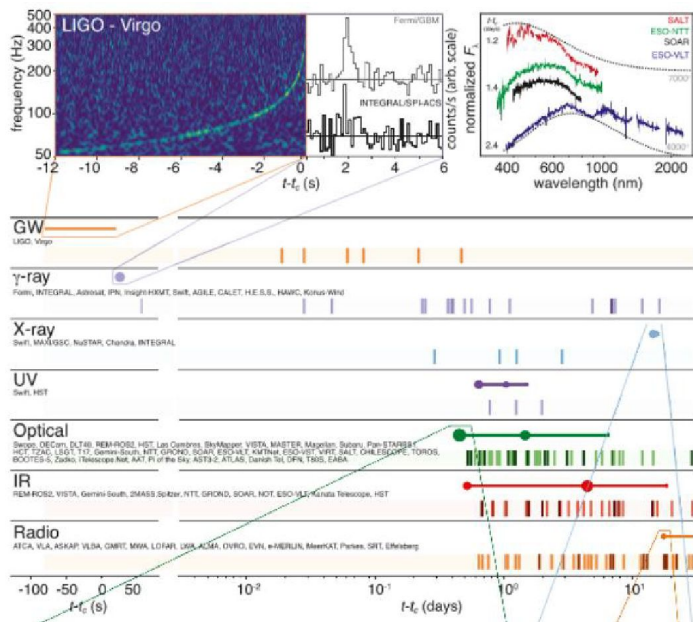
- A l'ordre Newtonien ne dépend que de la « chirp mass » :

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{\frac{3}{5}}}{(m_1 + m_2)^{\frac{1}{5}}}$$

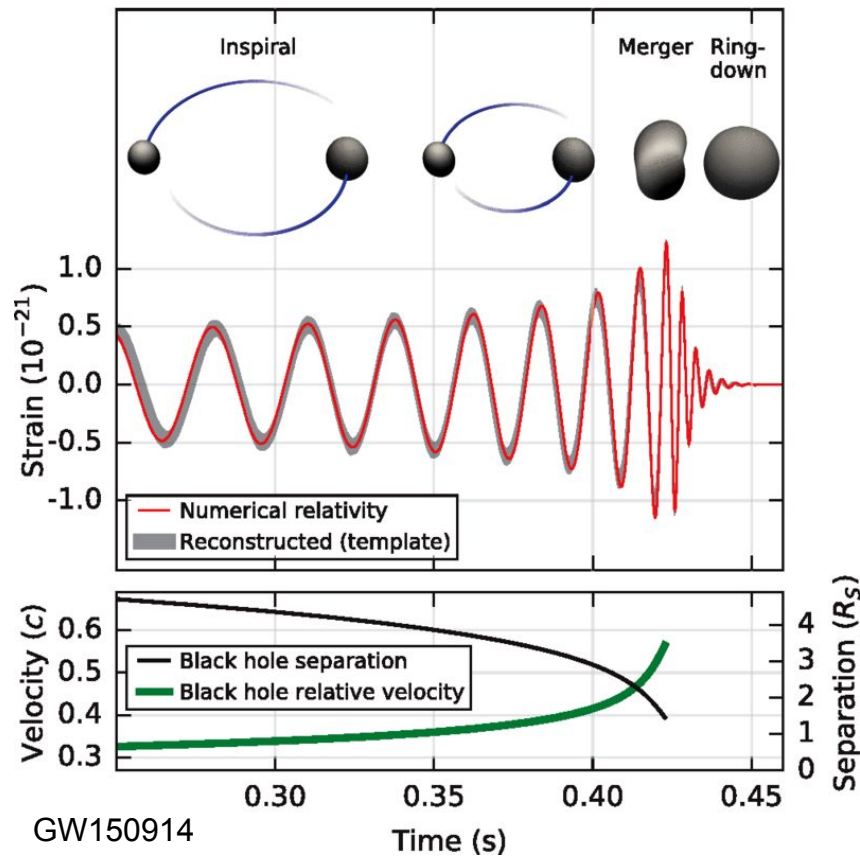
- La phase « spirante » s'arrête à la dernière orbite stable (ISCO) aux ordres newtonien et post-newtonien

Détection multi-messagers : GW170817

- Première et seule détection multi-messagers (OG/EM)
- Observée le 17 août 2017
- Coalescence d'une binaire d'étoiles à neutrons
- Phénomène identifié (EM) comme étant une kilonova
- Localisée dans NGC4993



Détection multi-messagers : GW170817



Objectif global : Avoir plus de détections multi-messagers

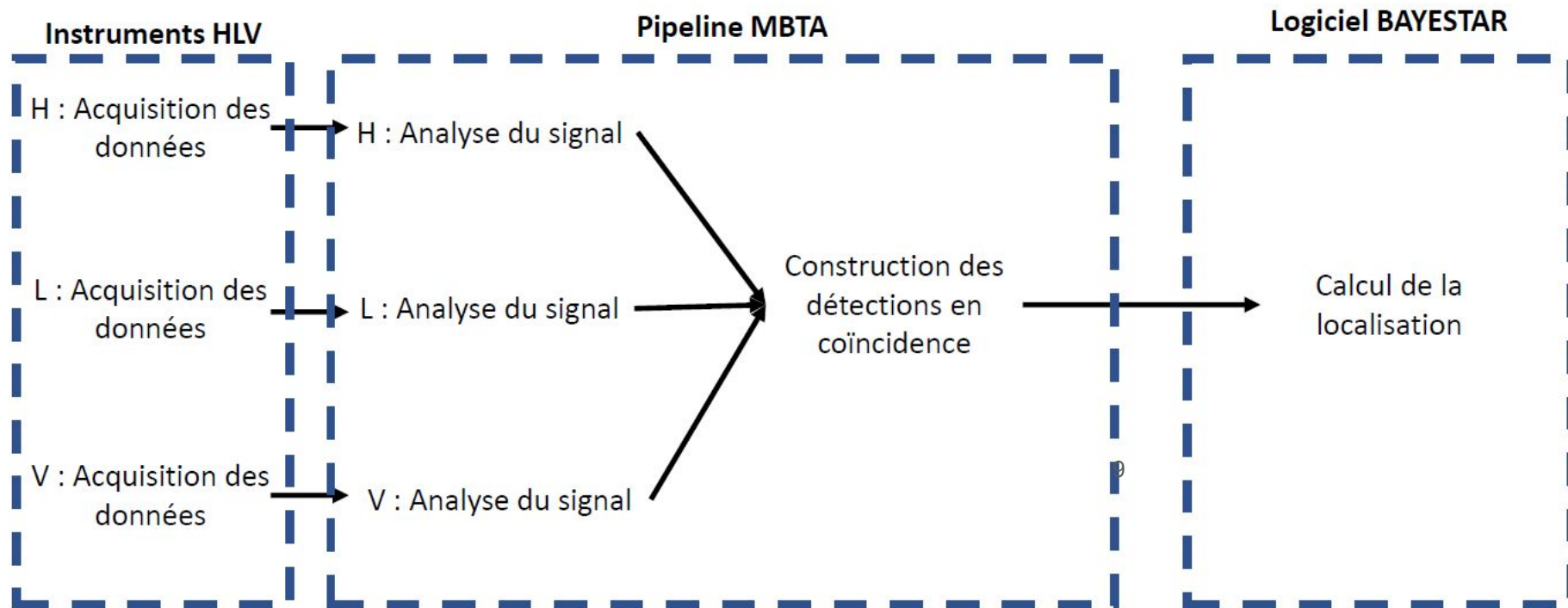
Cela passe par :

- L'amélioration des détecteurs et de leur sensibilité,
- L'optimisation et l'accélération de l'analyse,
 - Faire des pré-déclenchements
 - Envoyer des pré-alertes



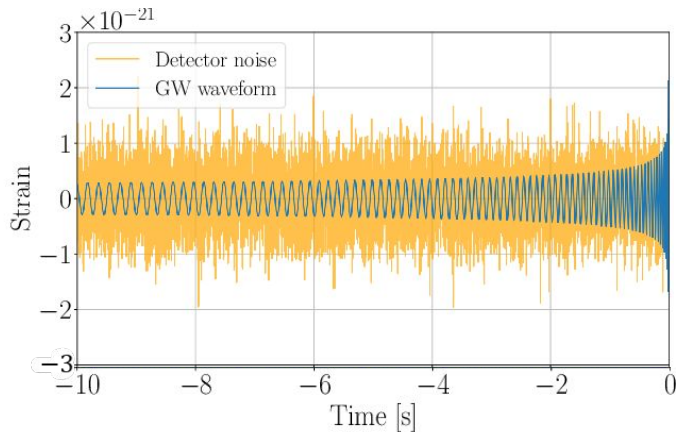
Principe du filtrage et travaux précédents

Chaîne de détection des OGs



Principe de filtrage optimal : MBTA

On a le signal : $s(t) = h(t) + n(t)$



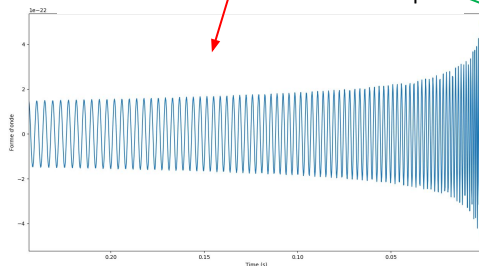
On a alors le rapport signal sur bruit (SNR) :

$$SNR_{opt} = 2 \sqrt{\int_0^{+\infty} \frac{|\tilde{h}(f)|^2}{S_n(f)} df}$$

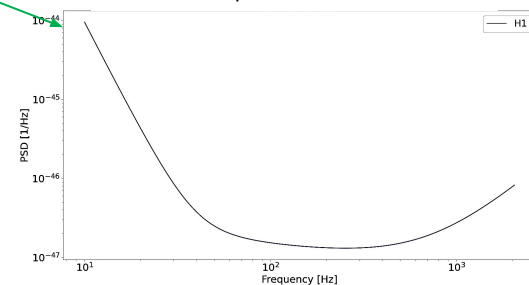
On le filtre dans le domaine fréquentiel :

$$\tilde{Q}(f) = 2 \frac{\tilde{h}(f)}{S_n(f)}, \quad \xrightarrow{\text{filtrage}} \quad S = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{s}(f) \tilde{Q}^*(f) df$$

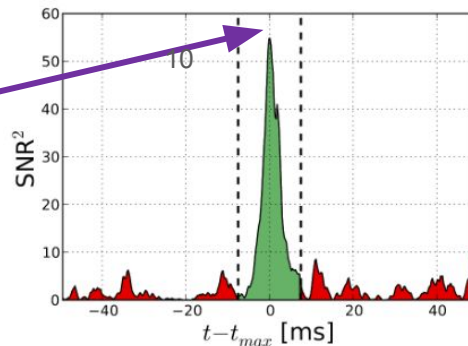
Forme d'onde en fonction du temps



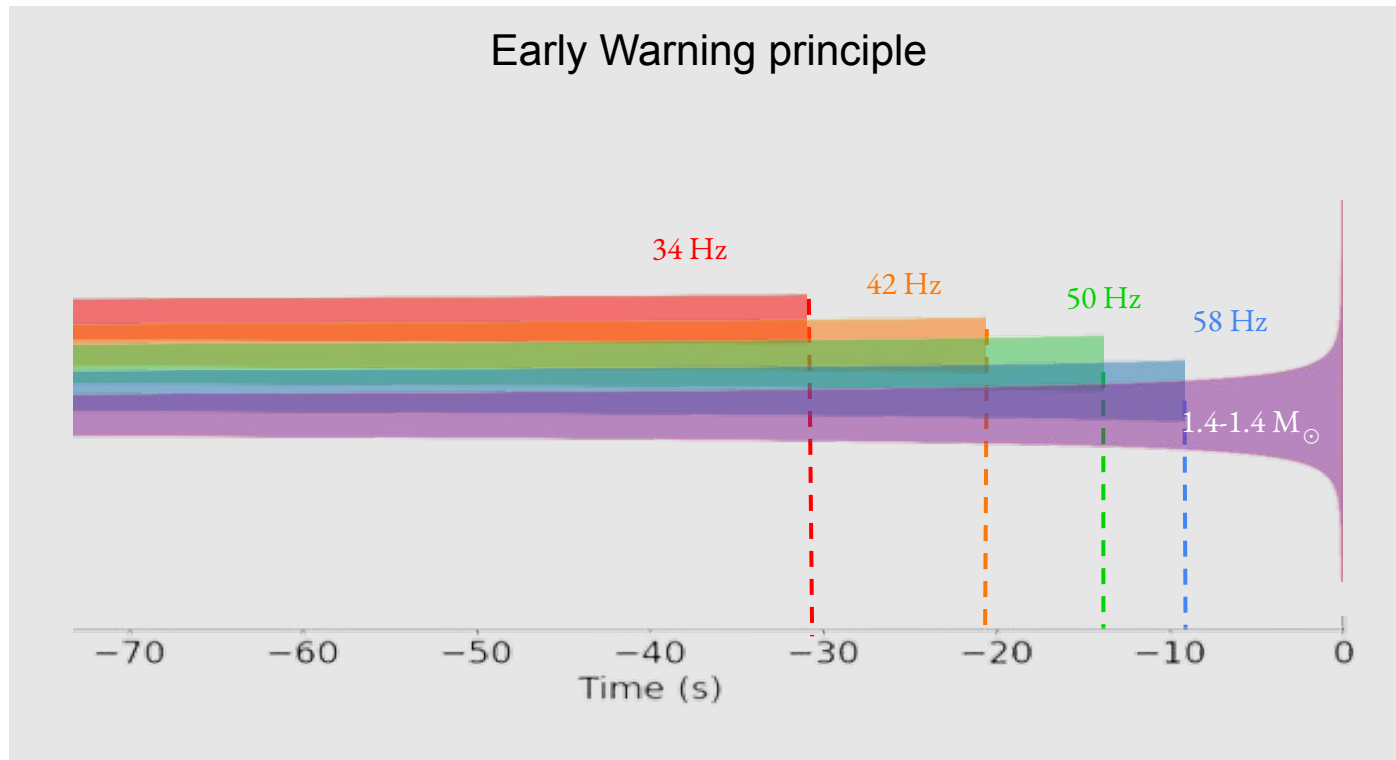
Densité Spectrale de Puissance



SNR récolté en fonction du temps



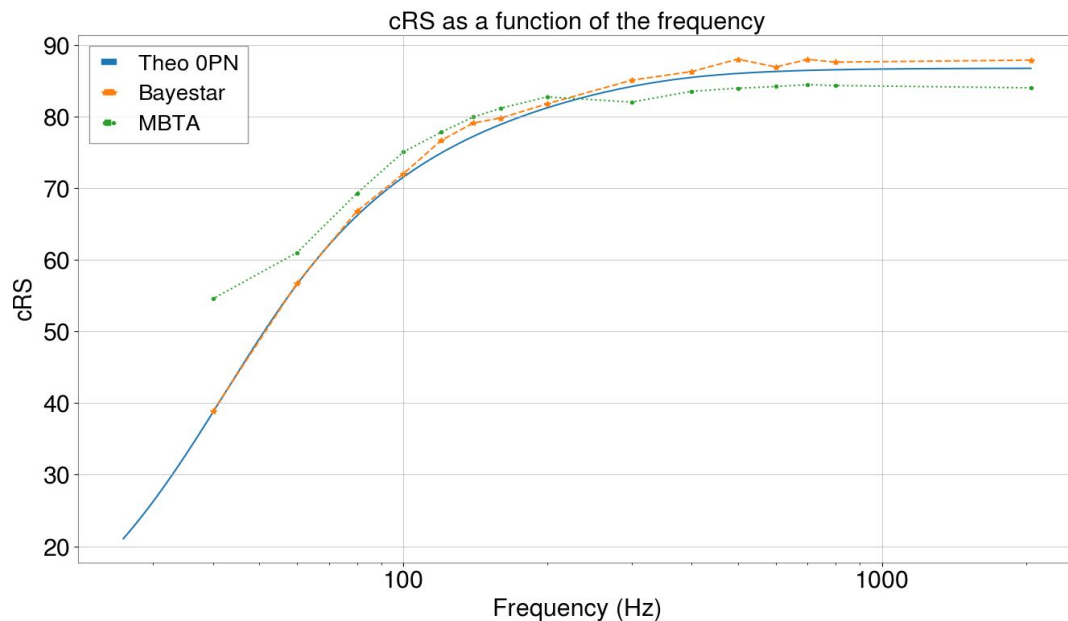
Principe des pré-déclenchement



Fenêtrage des filtres dans le domaine temporel

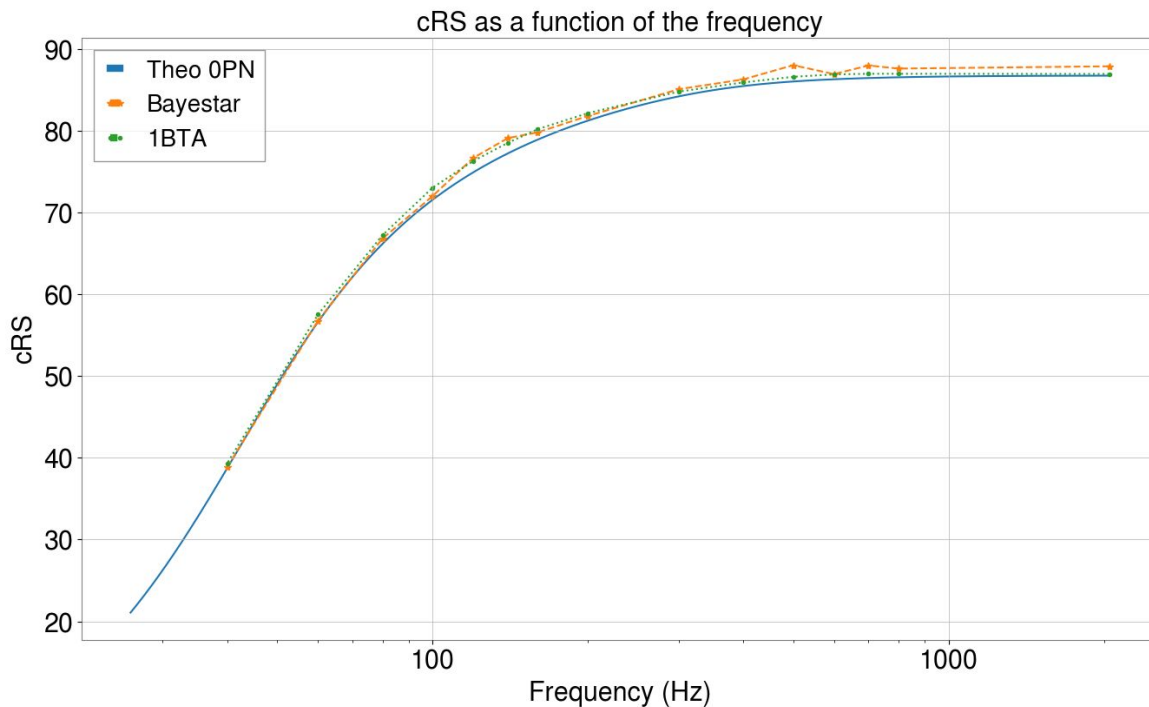
Coupure des calques à une fréquence donnée.

Tests sur un évènement 1.4-1.4 Msol BNS situé à 50Mpc



One Band Template Analysis

Version 1 bande de MBTA:





Première banque de calques

Méthode de génération

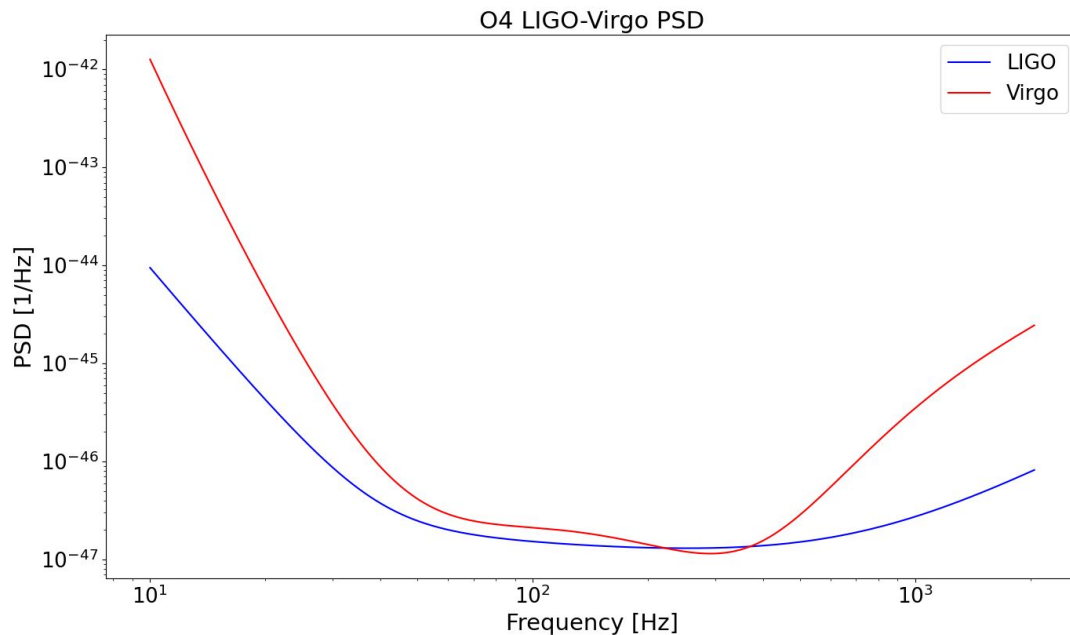
3 méthodes de génération : **Géométrique**, Stochastique, Hybride

Géométrique :

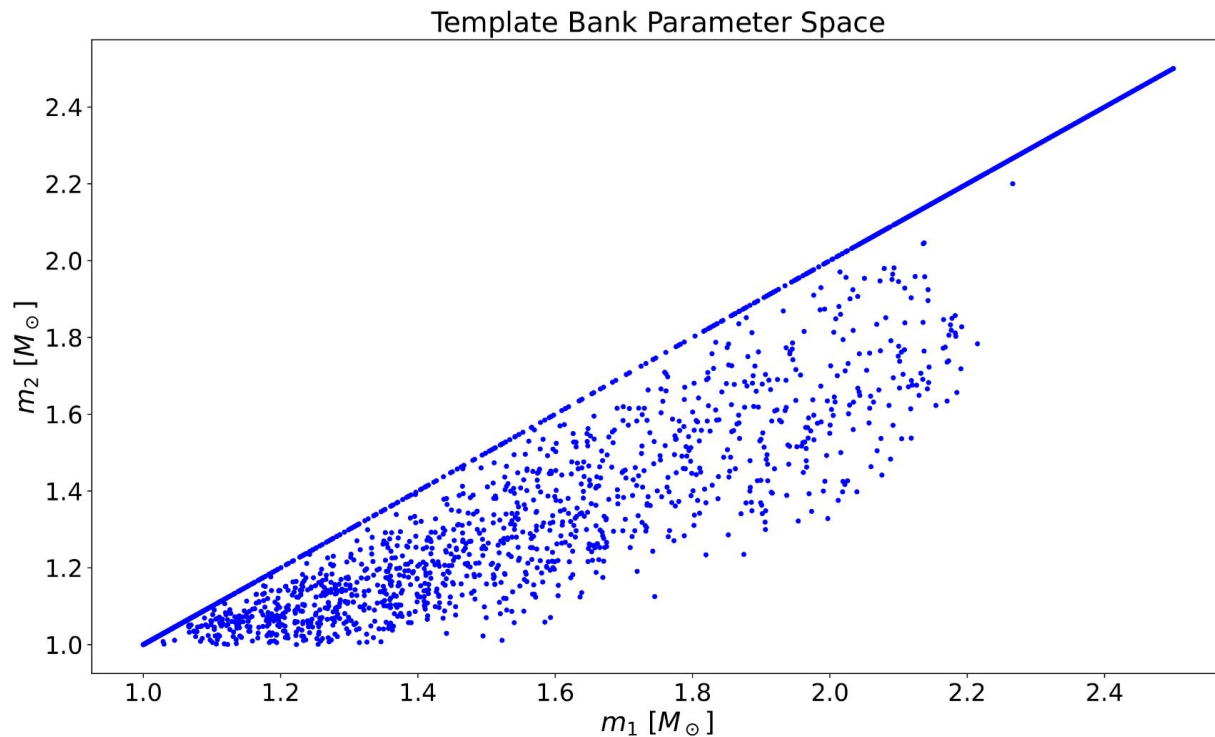
- Calcule la métrique de l'espace des paramètres ;
- Pave cet espace ;
- Efficace pour les faibles masses ;
- Limitée pour les hautes masses ;
- Rapide pour les spins alignés ;
- Algorithme fournie par pyCBC

Paramètres de la première banques

Méthode : Géométrique;
Masses : $m_1, m_2 \in [1.0, 2.5]M_{\odot}$;
Spins : $s_1, s_2 \in [-0.05; 0.05]$;
Spins : alignés avec le moment orbital ;
Fréquence min : 15 Hz ;
Fréquence max : 40 Hz ;
Match minimal : 97% ;
PSD : O4 - aLIGO théorique ;

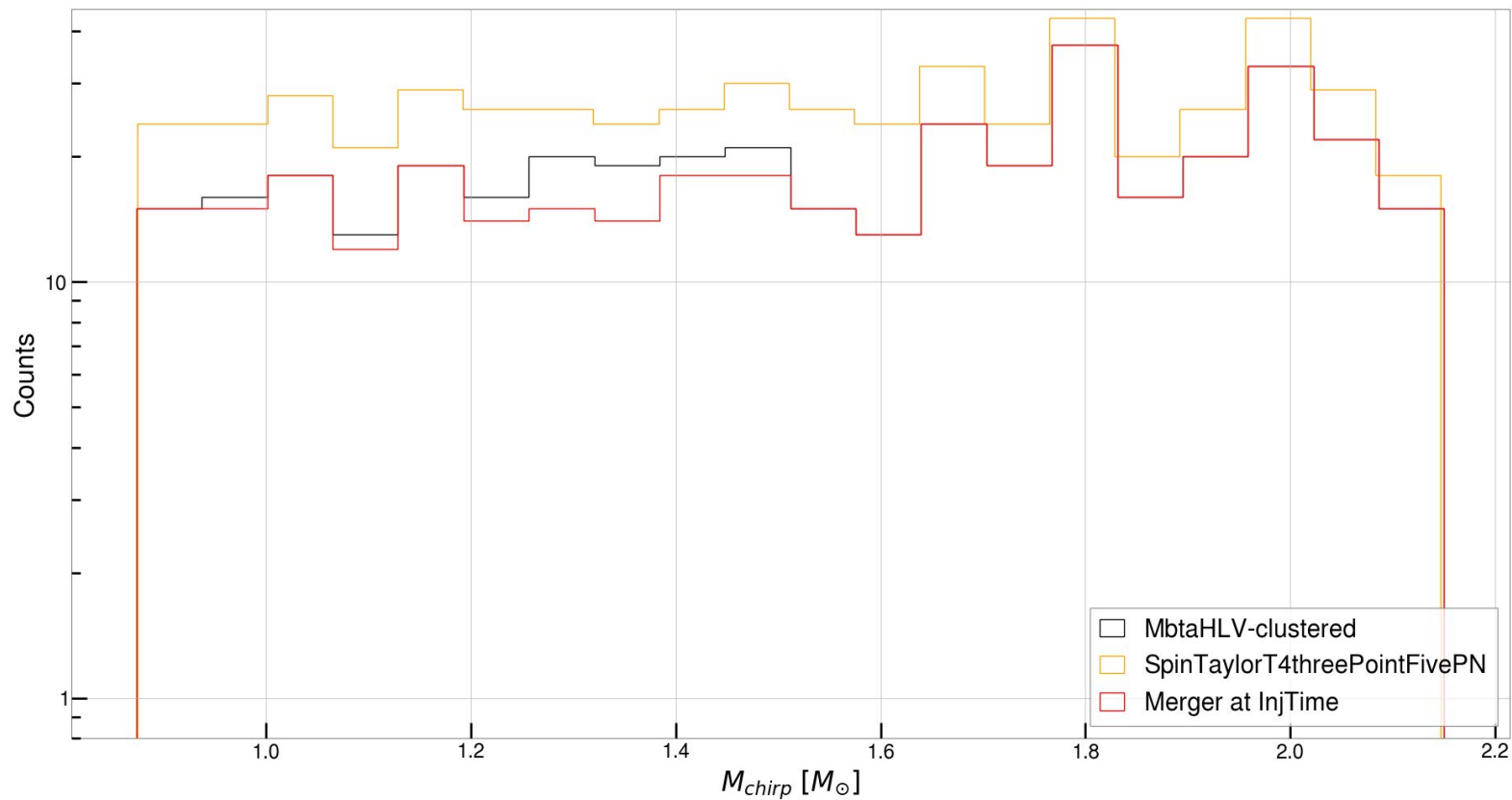


Couverture de l'espace des paramètres

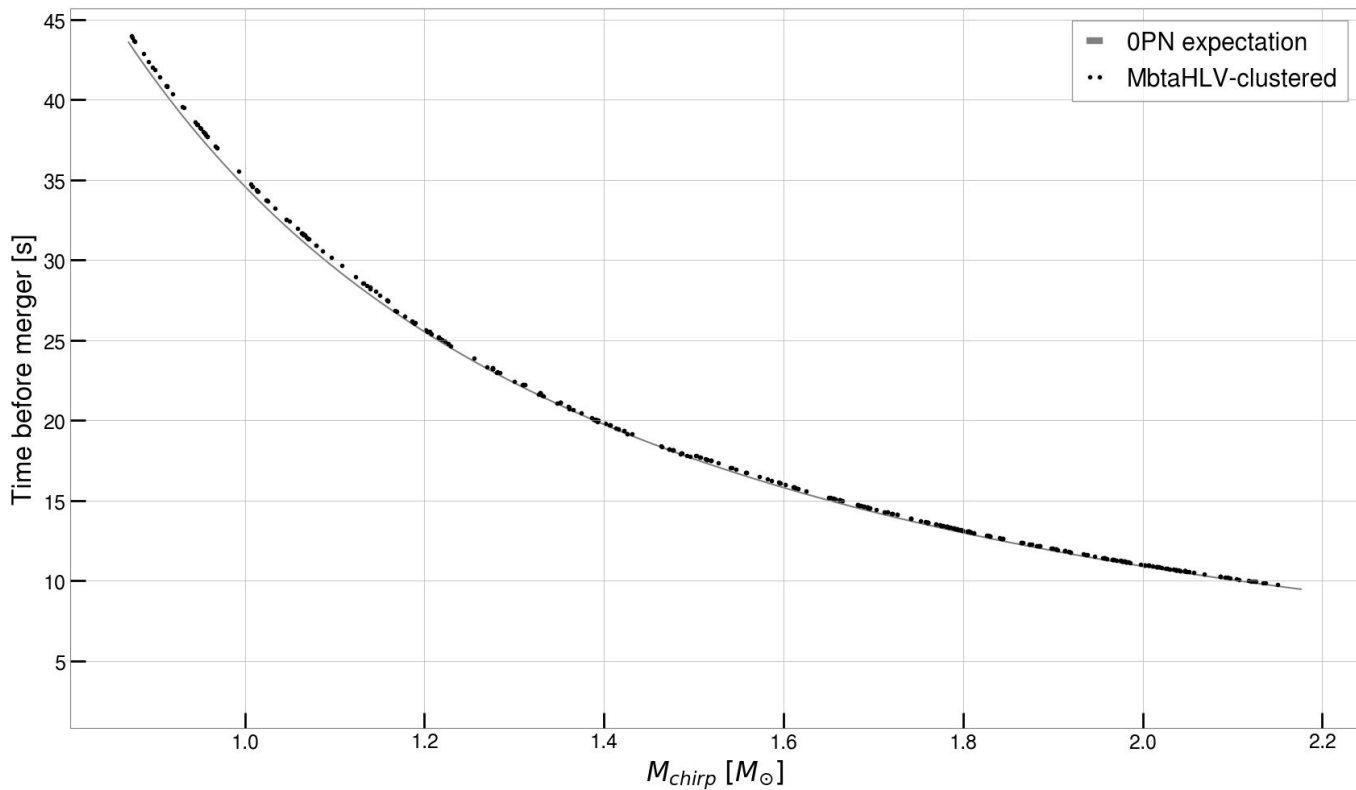


Vérification

18

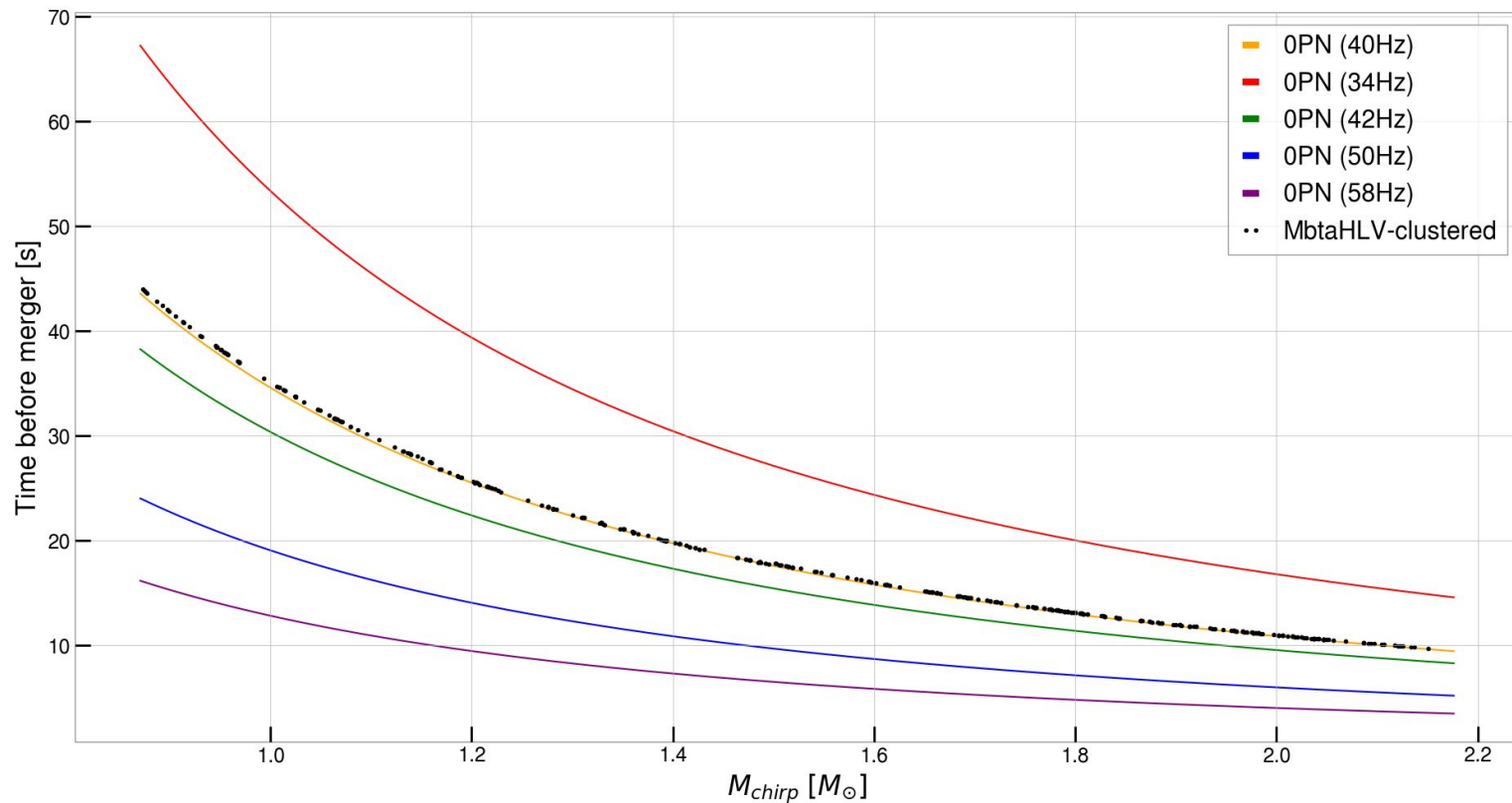


Correspondance des temps de détection



Temps de détection

20

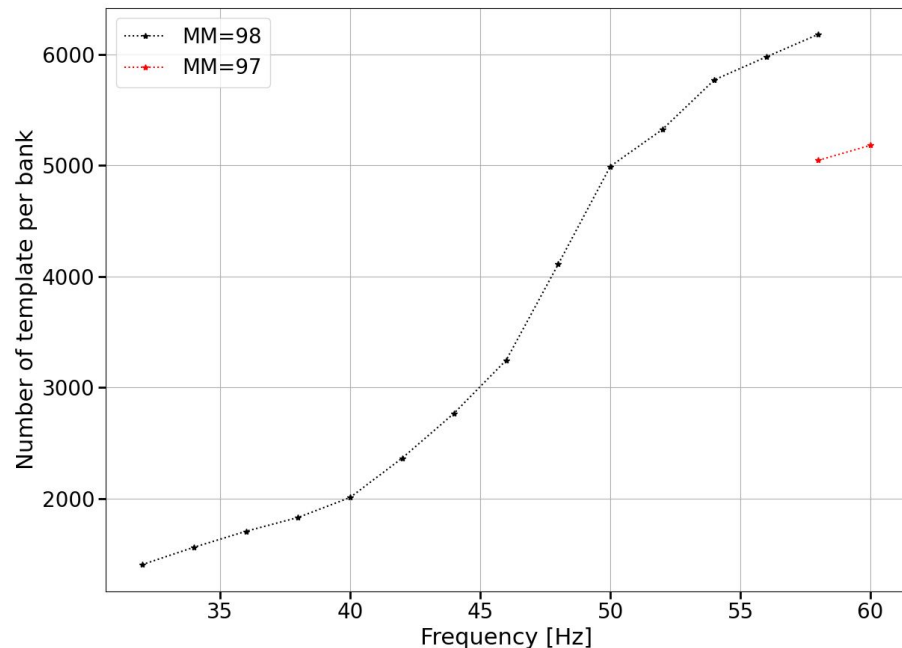


The background features a series of concentric, slightly irregular ellipses in shades of blue and green, creating a ripple effect. In the upper right quadrant, two small red circles are positioned close together, each containing a white, stylized letter 'S'.

Préparation du run 04

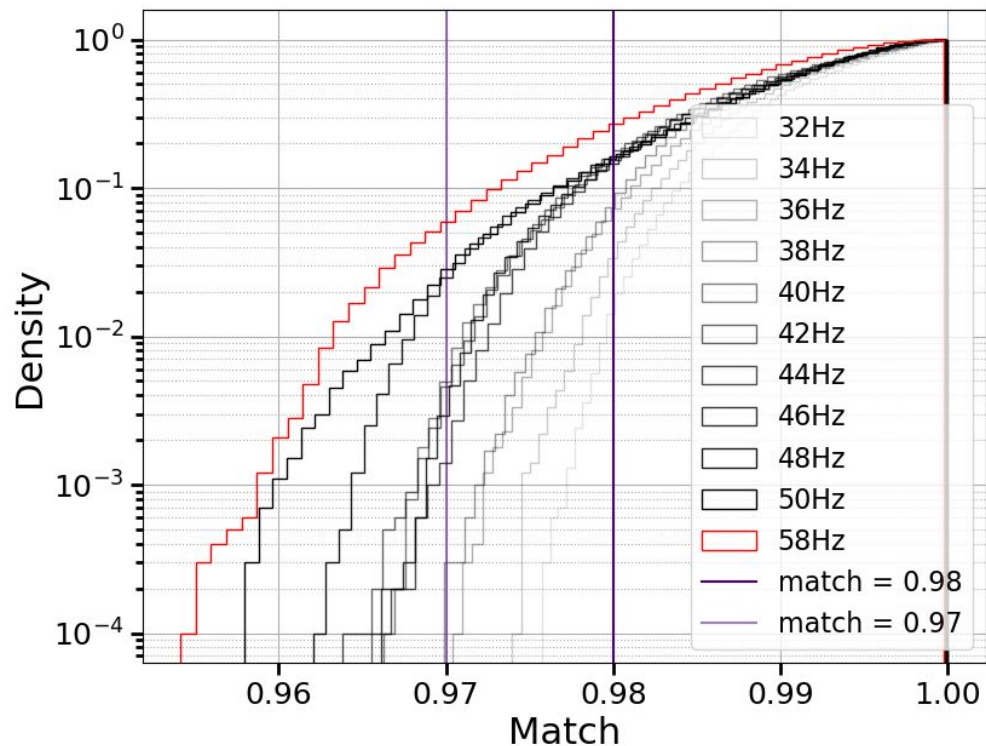
Ensemble des banques pour O4-EW

Méthode : Géométrique;
 Masses : $m_1, m_2 \in [1.0, 2.5]M_{\odot}$;
 Spins : $s_1, s_2 \in [-0.05; 0.05]$;
 Spins : alignés avec le moment orbital ;
 Fréquence min : 15 Hz ;
 Fréquence max : {32; 34; 36; 38; 40; 42; 44;
 46; 48; 50; 52; 54; 56; 58; 60} Hz ;
 Match minimal : 98% ou 97%
 PSD : O4 - aLIGO théorique ;



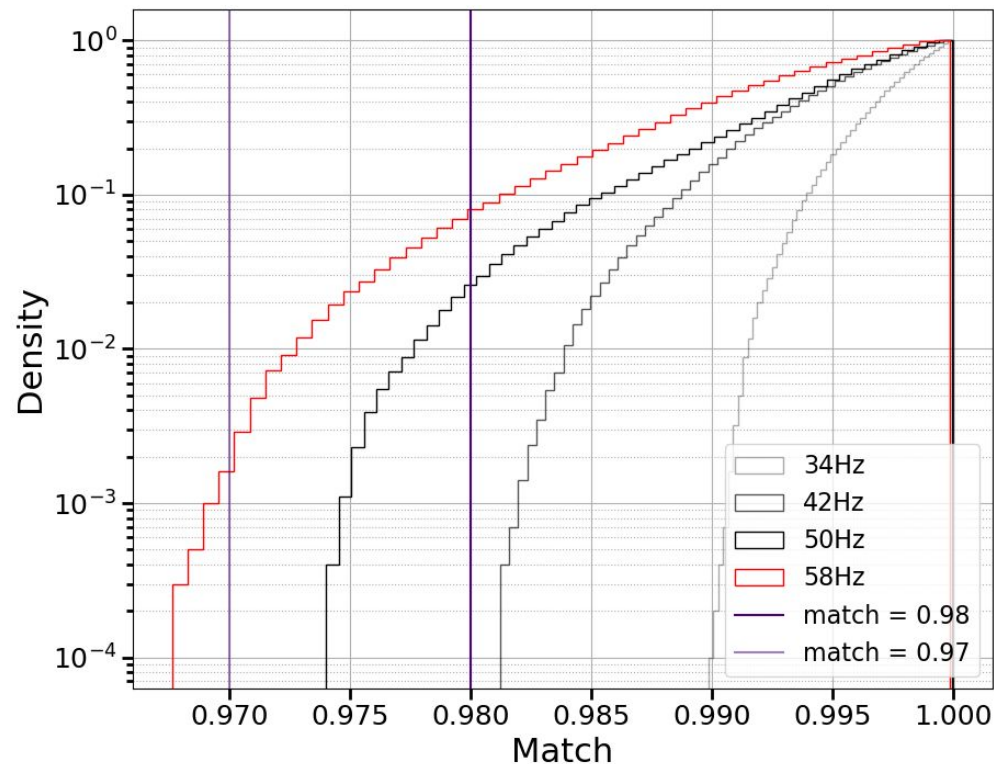
Vérification des banques

Masses : $m_1, m_2 \in [1.0, 2.5]M_\odot$;
Spins : $s_1, s_2 \in [-0.05; 0.05]$;
Spins : alignés avec le moment orbital ;
N injection : 10 000 ;
PSD : O4 - aLIGO théorique ;



Vérification des banques

Masses : $m_1, m_2 \in [1.0, 2.5]M_{\odot}$;
Spins : $s_1, s_2 \in [-0.05; 0.05]$;
Spins : alignés avec le moment orbital ;
N injection : 10 000 ;
PSD : O4 - aLIGO théorique* ;



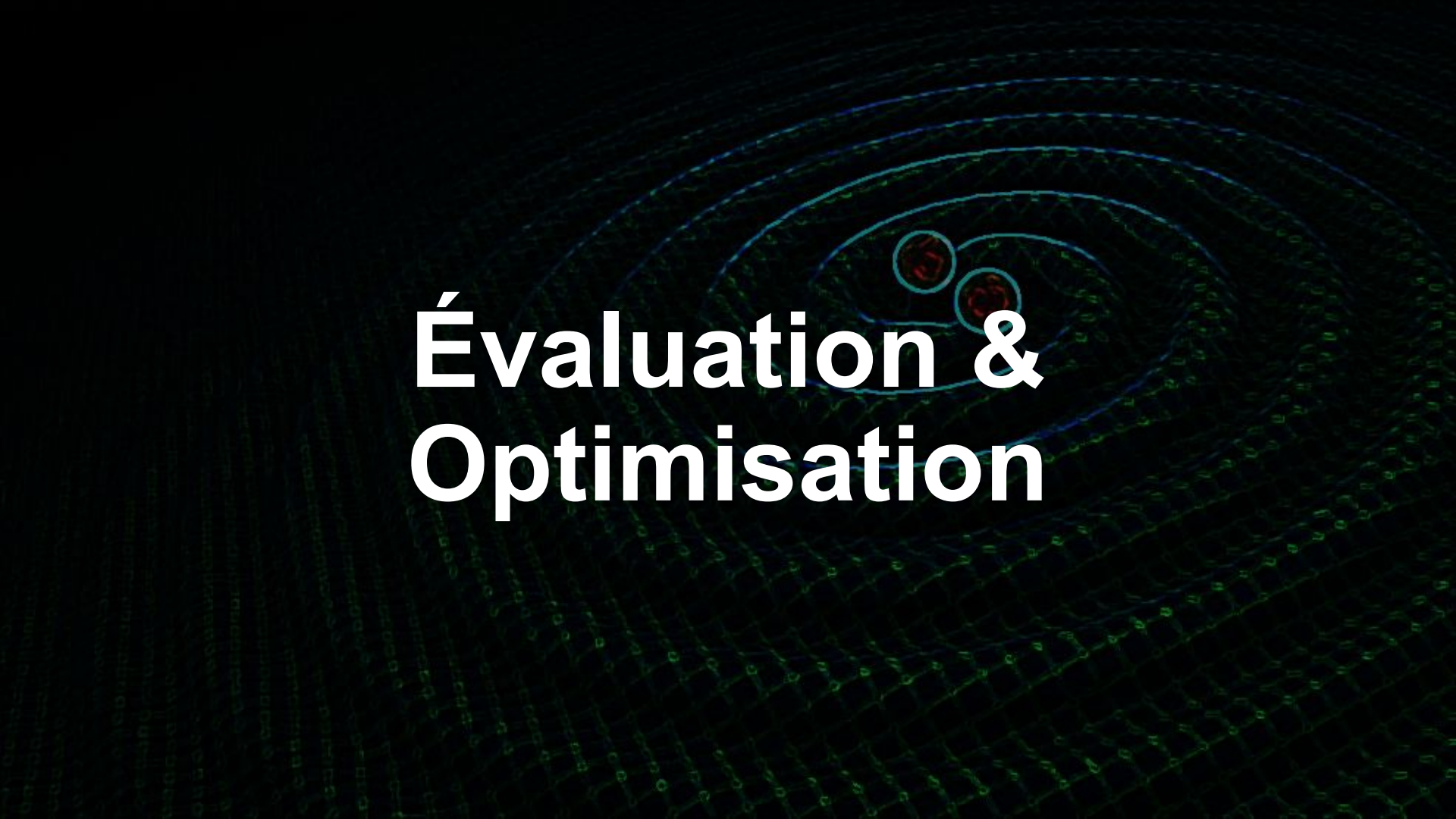
*même PSD que la recherche principale et SSM

Plan pour les pré-déclenchement de O4

Lancement dès le début de O4 : 24 Mai 2023

Fréquences sélectionnées : 34 Hz; 42 Hz; 50 Hz; 58 Hz;

Détecteurs : LIGO Hanford + LIGO Livingston (+ Virgo à 34 Hz)

A background image featuring a contour plot with concentric, elongated elliptical lines in shades of blue and green. Two small red circles are visible near the center of the plot, each containing a red number '5'.

Évaluation & Optimisation

Méthodes de réjection

Méthodes de réjection de MBTA:

- Gating : Supprime les variations brusques du bruit ;
- $\text{Auto}\chi^2_{\text{PQ}}$: Quantifie la gaussianité du bruit environnant ;
- p_{astro} : Probabilité d'un signal astrophysique ;
- FAR : Taux de fausses alarmes (dérive de p_{astro} ou du SNR) ;

Auto χ^2_{PQ} et repondération du SNR

Évaluation de la non-gaussianité du bruit entre $t_0 + \Delta t/2$ et $t_0 - \Delta t/2$:

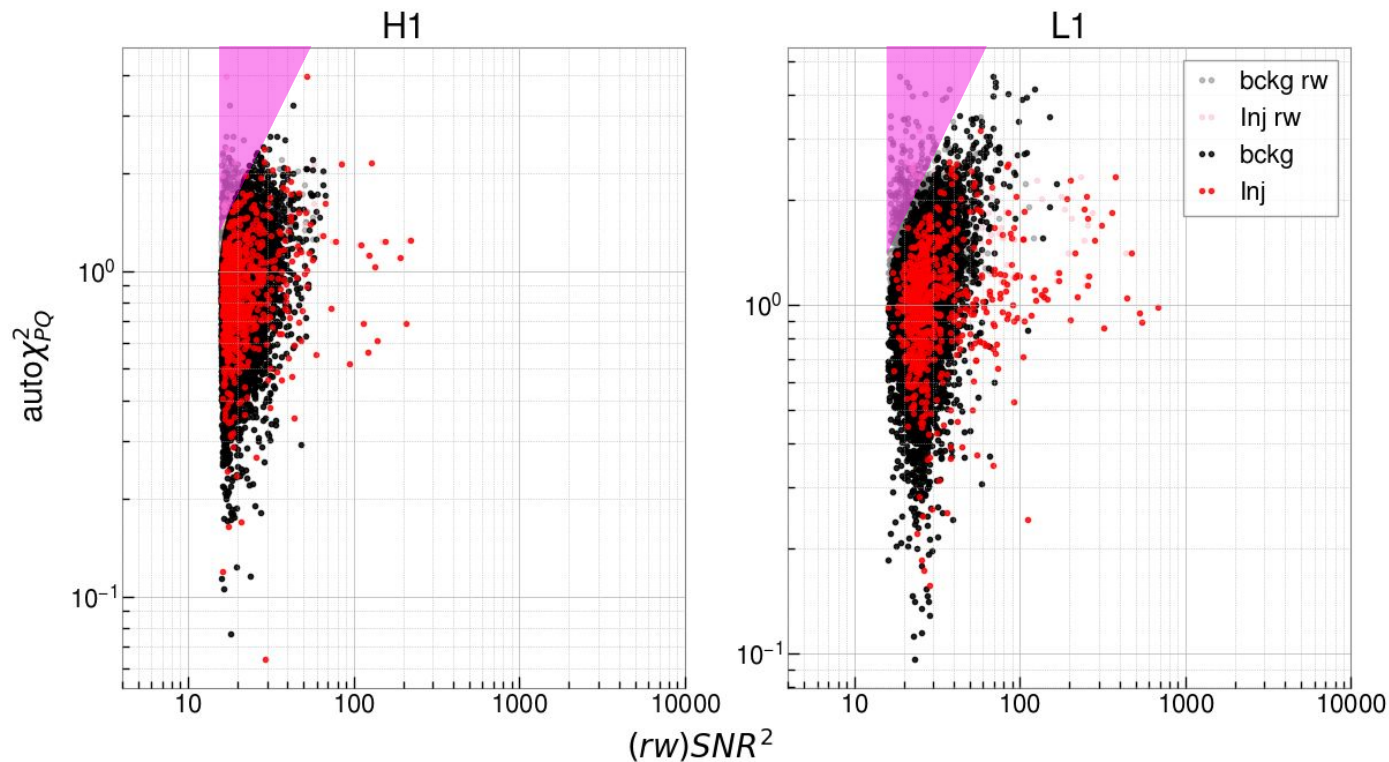
$$\text{auto}\chi_{PQ}^2 = \frac{1}{2\Delta t} \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} \left\| \begin{pmatrix} \rho_P \\ \rho_Q \end{pmatrix} (t) - \begin{pmatrix} \cos \Phi_0 & -\sin \Phi_0 \\ \sin \Phi_0 & \cos \Phi_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_P \\ A_Q \end{pmatrix} (t - t_0) \right\| dt$$

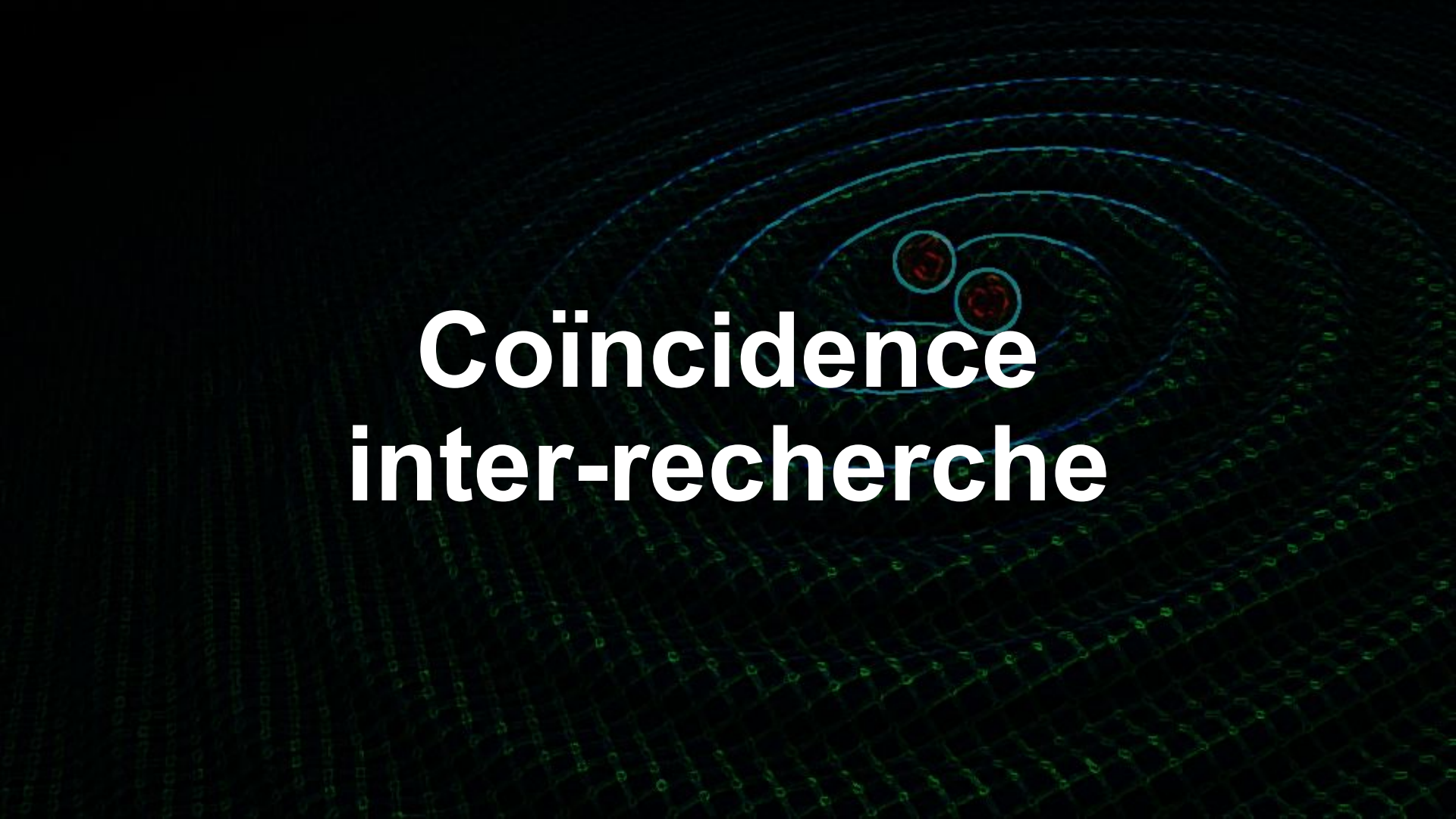
Repondération du SNR :

$$\text{rwSNR} = \begin{cases} \text{SNR} & \text{si } \text{auto}\chi_{PQ}^2 < 1 \\ \text{SNR} \left(\frac{A + (\text{auto}\chi_{PQ}^2)^\alpha}{A+1} \right)^{-\frac{1}{\beta}} & \text{sinon} \end{cases}$$

Auto χ^2_{PQ} des pré-déclenchements

EW searches



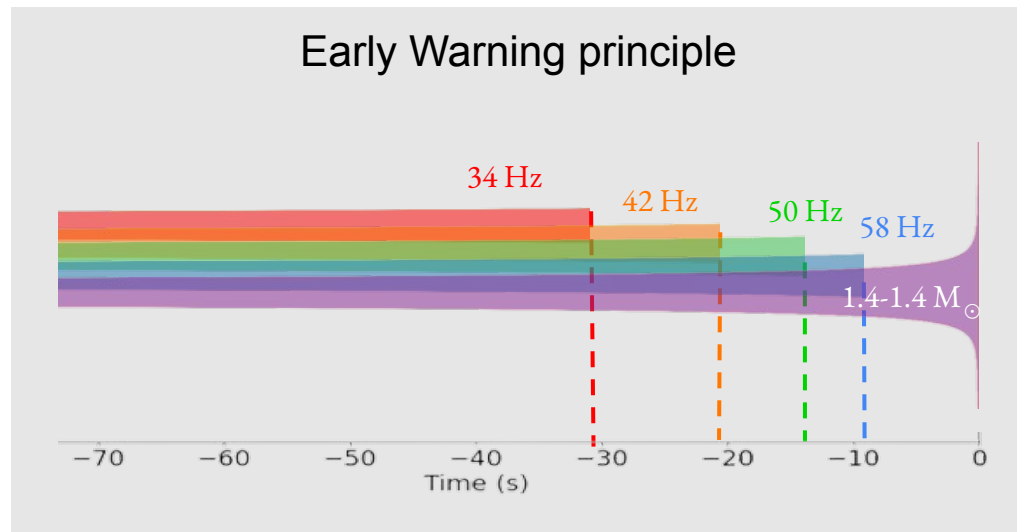


Coïncidence inter-recherche

Coïncidence inter-recherche

Les événements doivent avoir :

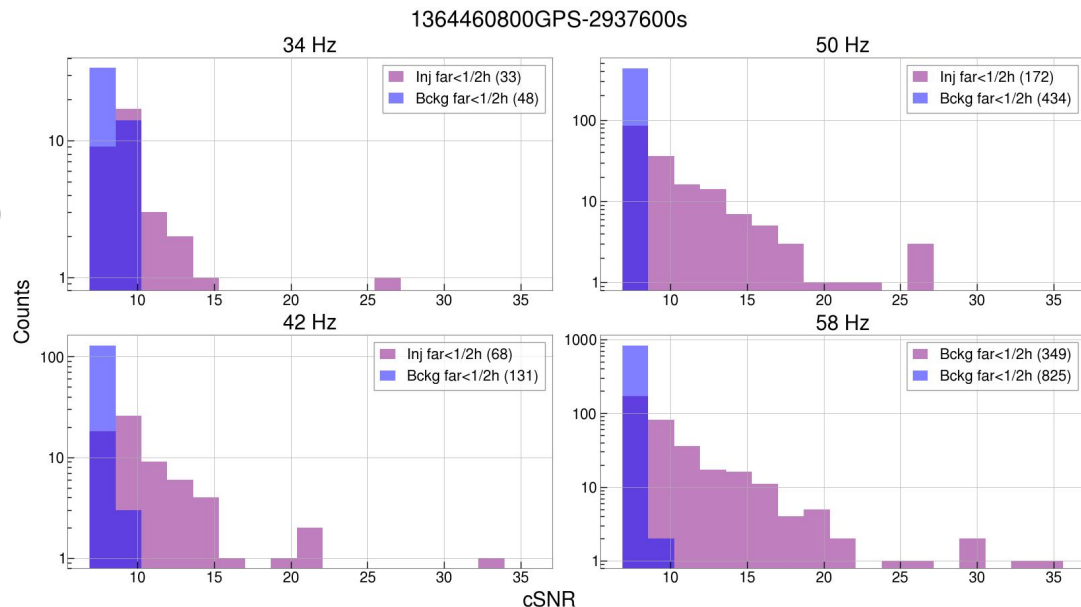
- le même temps de fusion (± 0.5 s)
- la même chirp mass ($\pm 0.05 M_{\odot}$)
- des fréquences de coupure différentes



Coïncidence inter-recherche

Données utilisé :

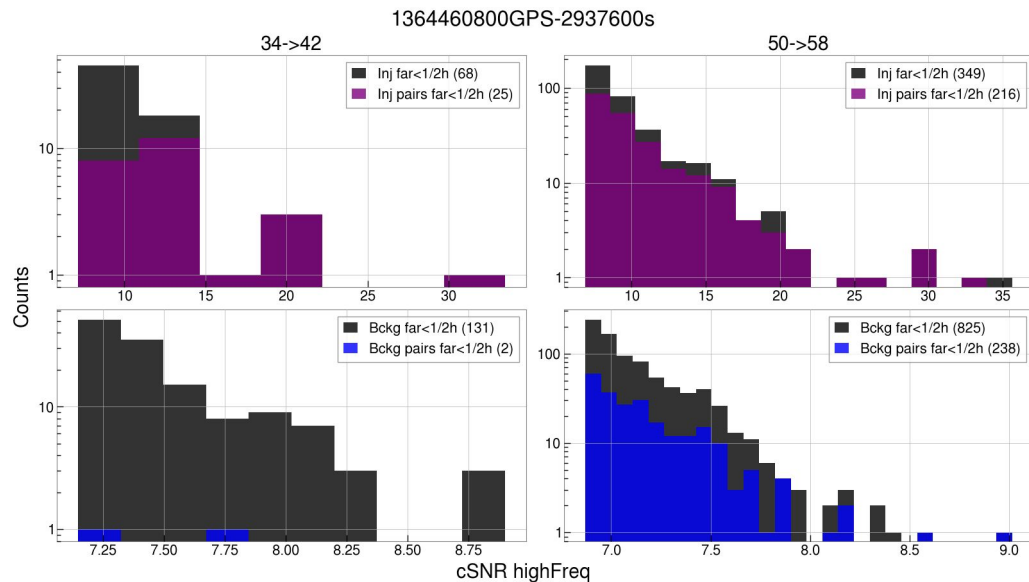
- MDC avec des injections
IMRPhenomPv2_NRTidalv2 ;
- Filtré par MBTA Early Warning (ewl)
- Entre le temps GPS 1364460800 et
sur 34 jours.



Coïncidence inter-recherche

Données utilisé :

- MDC avec des injections
IMRPhenomPv2_NRTidalv2 ;
- Filtré par MBTA Early Warning (ewl) ;
- Entre le temps GPS 1364460800 et
sur 34 jours.



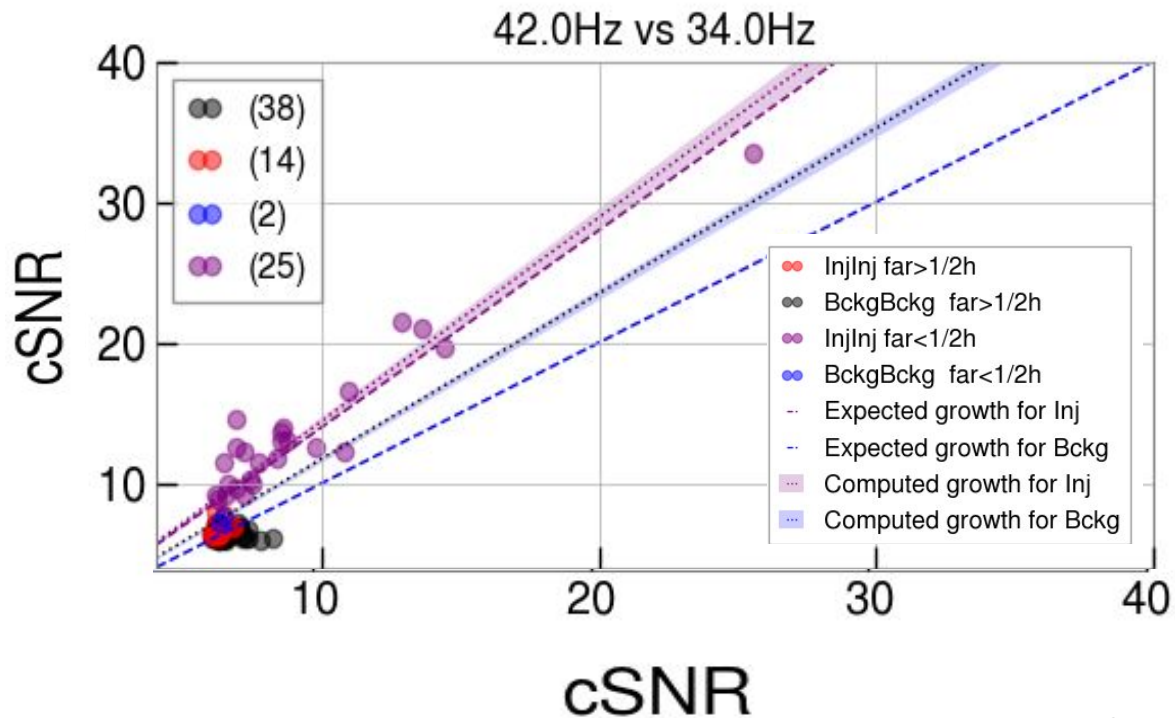
Coïncidence inter-recherche

Injections :

- Distribuée selon une droite proche de celle attendue
 - $\Rightarrow$ corrélation

Fond:

- Répartie uniformément
 - $\Rightarrow$ non-corrélée



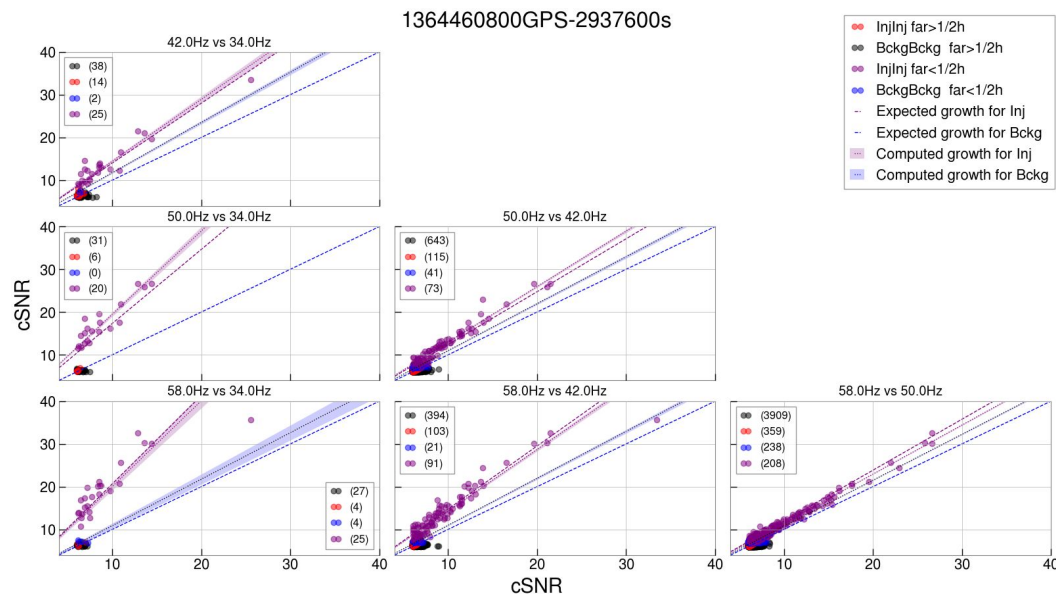
Coïncidence inter-recherche

Injection :

- Distribuées autour d'une droite de coefficient supérieur à 1 => corrélés

Background :

- Distribué autour d'une droite de pente proche de 1 => non-corrélés



Taux de Fausses-alarmes (FAR) inter-recherche

Nouvelle statistique de classement combinée (cRS) prenant en compte la croissance d'une recherche à une autre :

$$gSNR^2 = cSNR_1^2 + (cSNR_2 - cSNR_1)^2$$

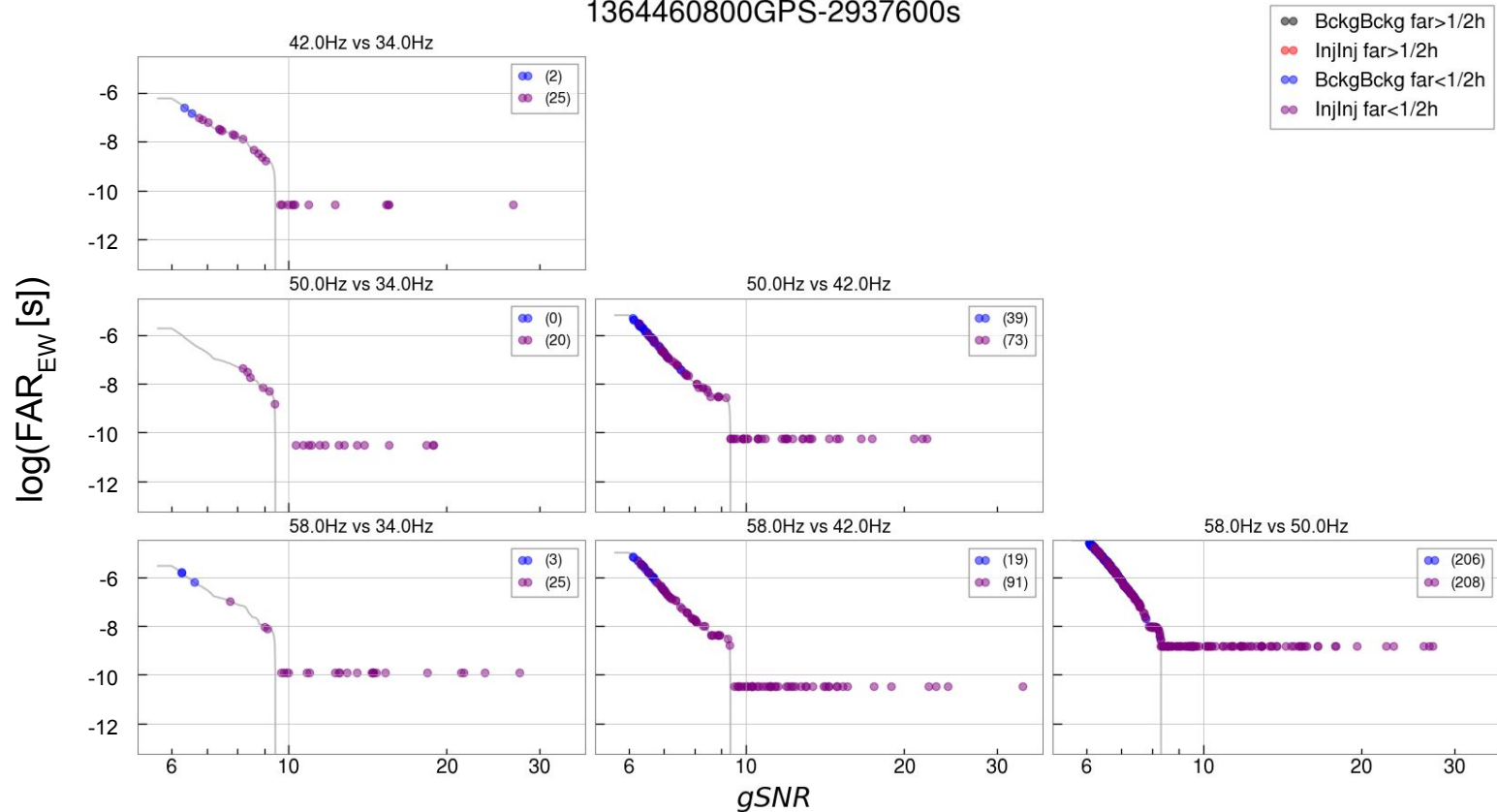
Construction d'un nouveau FAR :

$$FAR(gSNR_{12}) = \frac{N(gSNR_{12})\delta t}{T_1 T_2}$$

- N = nombre de coïncidence inter-recherche de fond avec un $gSNR$ plus grande que $gSNR_{12}$;
- δt = fenêtre temporelle utilisée pour construire une coïncidence inter-recherche ;
- T_1 et T_2 les périodes utilisées pour récolter des déclenchements.

Taux de Fausses-alarmes (FAR) inter-recherche

1364460800GPS-2937600s



En utilisant les coïncidences inter-recherches, il serait possible réduire le nombre d'événement de fond :

- En se servant du FAR inter-recherche, on peut rejeter plus d'événements de fond ;
 - Choix d'une limite en FAR inter-recherche ;
- Étude en cours pour paramétrer le degré de confiance dans les événements ;

The background features a series of concentric, hand-drawn style lines in blue and green, creating a ripple effect. Two small red circles are positioned near the center of these lines. The overall aesthetic is digital and abstract.

Merci de votre attention

Poursuite

40

Optimisation des pré-déclenchements de MBTA :

→ Coïncidence inter-recherche (jusqu'à Décembre);

Rédaction du manuscrit (Janvier-Juin);

Poursuite (Rédaction du manuscrit)

1	Introduction aux ondes gravitationnelles	3
1.1	Relativité Générale	3
1.2	Ondes gravitationnelles dans le vide	4
1.3	Ondes gravitationnelles avec source	5
1.3.1	Ordres supérieurs	7
1.4	Les sources d'ondes gravitationnelles	12
1.4.1	Les coalescences de binaires compactes	12
1.4.2	Les Bursts	13
1.4.3	Les sources continues	13
1.4.4	Le fond stochastique d'onde gravitationnelle	13
1.5	Évolution des binaires compactes	13
1.5.1	La phase spiralante	15
1.5.2	Effet du redshift	16
1.6	Les détecteurs d'ondes gravitationnelles	16
1.6.1	Les interféromètres de Michelson	17
1.6.2	Autres méthodes de détection	21
1.7	L'intérêt des ondes gravitationnelles	22
2	L'analyse des ondes gravitationnelles	23
2.1	Le filtrage optimal	23
2.2	Les pipeline de détection basse latence	25
2.2.1	Multi-Band Template Analysis	25
2.2.2	PyCBC	26
2.2.3	GstLAL	26
2.2.4	SPIIR	26
2.3	Les méthodes de réjection de MBTA	27
2.3.1	Le Gating	27
2.3.2	Le χ^2 et l' $auto\chi^2_{PQ}$	27
2.3.3	La P_{astro}	27
2.3.4	Le False Alarm Rate	27
2.3.5	Le Clustering	27
2.4	La localisation des sources	28

Formations suivies

Formations doctorales :

- Animation des Tribulations Savantes ;
- Encadrer efficacement des TD-22-2 ;
- JOURNEE DE RENTREE DES DOCTORANTS 2022 ;
- GWsNS-2023 Summer School ;
- MaNiTou 2023 Summer School ;

Enseignements :

- TP Outils Mathématique et Logiciel 1 : GEII, IUT Savoie Mont Blanc (Annecy) ;
- TD Physique S2 : GEII, IUT Savoie Mont Blanc (Annecy) ;
- TP Physique S2 : GEII, IUT Savoie Mont Blanc (Annecy).

Méthode de génération Stochastique

Stochastique :

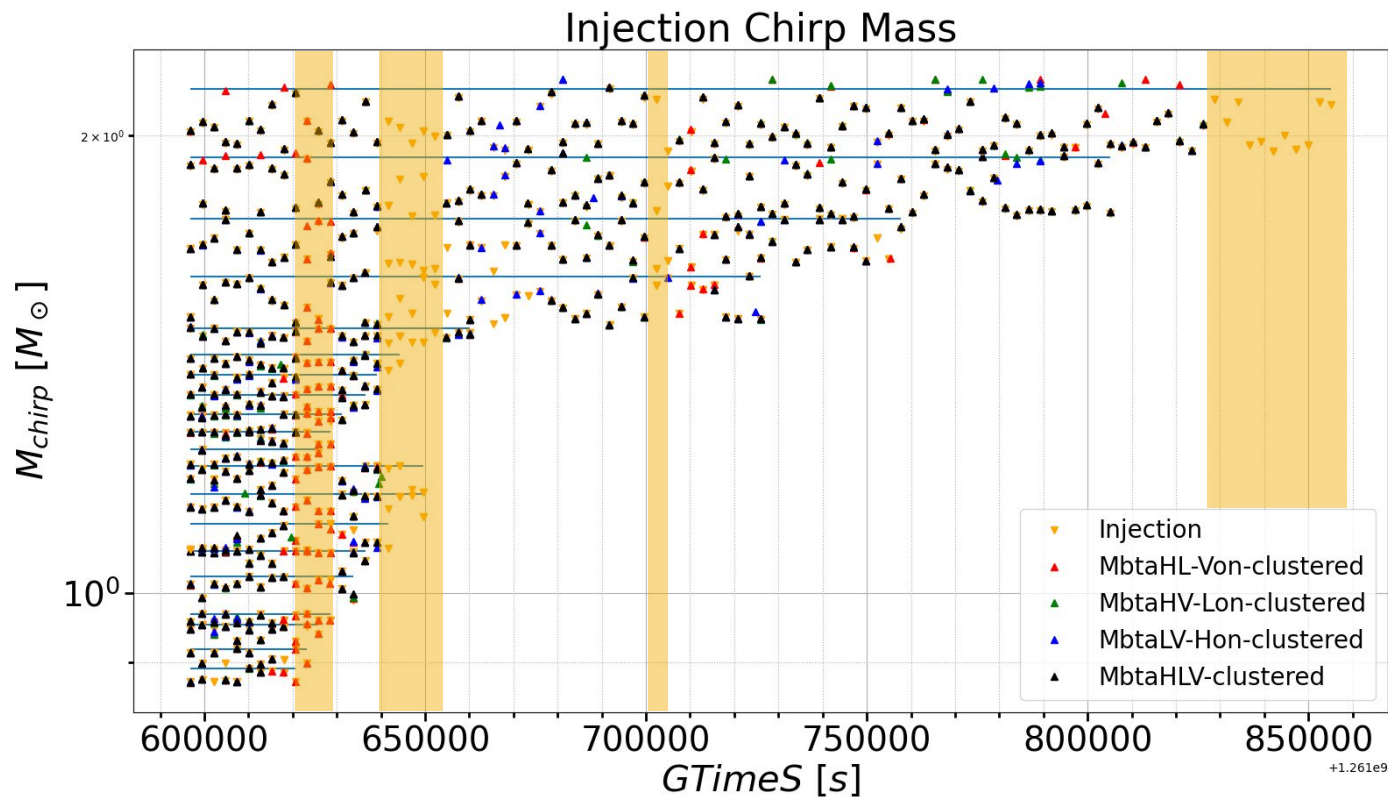
- Place des calques aléatoirement ;
- Ajoute des calques jusqu'à couvrir l'espace ;
- Adapter pour les hautes masses ;
- Risque de surcouverture ;
- Algorithme fournie par LAL

Méthode de génération Hybride

Hybride :

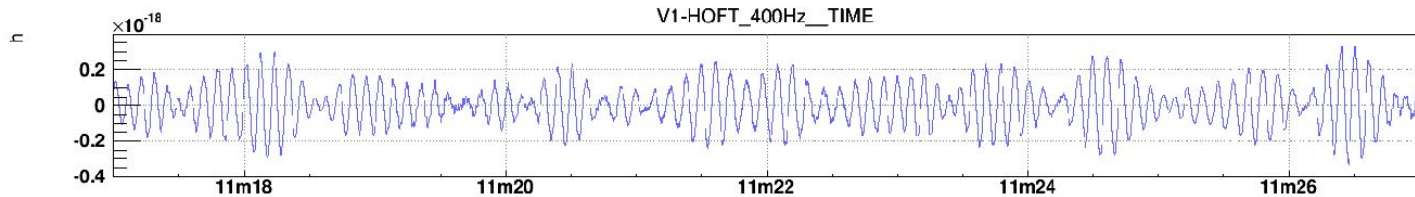
- Place des calques aléatoirement ;
- Calcule une métrique locale autour des points placés aléatoirement ;
- Place géométriquement des calques dans la métrique locale calculée ;
- Surcouverture réduite de 5 à 10 % par rapport au placement stochastique ;
- Algorithme fournie par pyCBC.

Périodes de mauvaises qualités

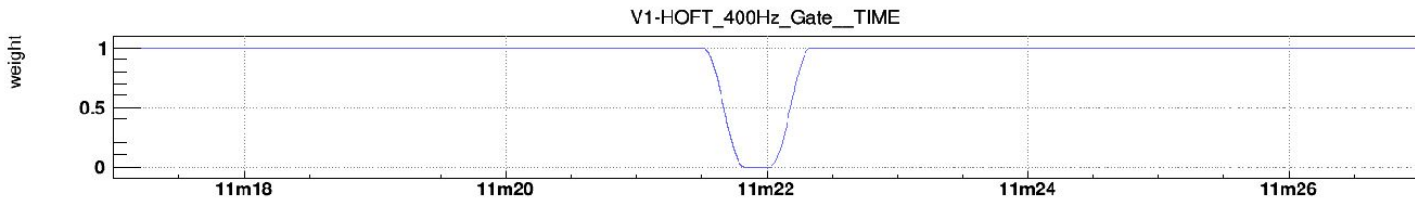


Gating

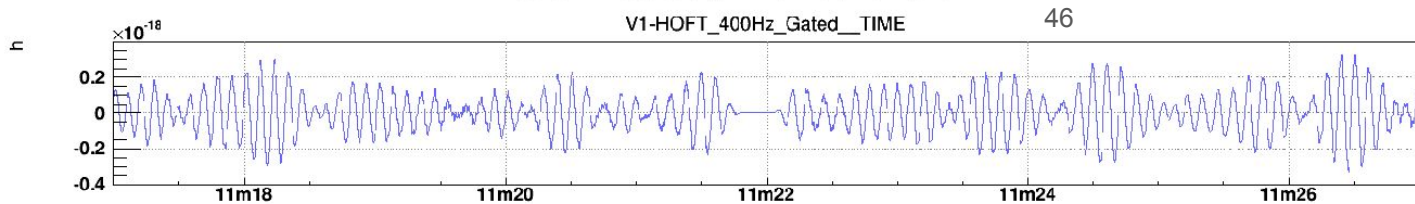
dataDisplay v10r10 : started by allene on May 26 2021 09:55:36 UTC



1000001495.0000 : Sep 14 2011 02:11:17 UTC



1000001495.0000 : Sep 14 2011 02:11:17 UTC



1000001495.0000 : Sep 14 2011 02:11:17 UTC

46

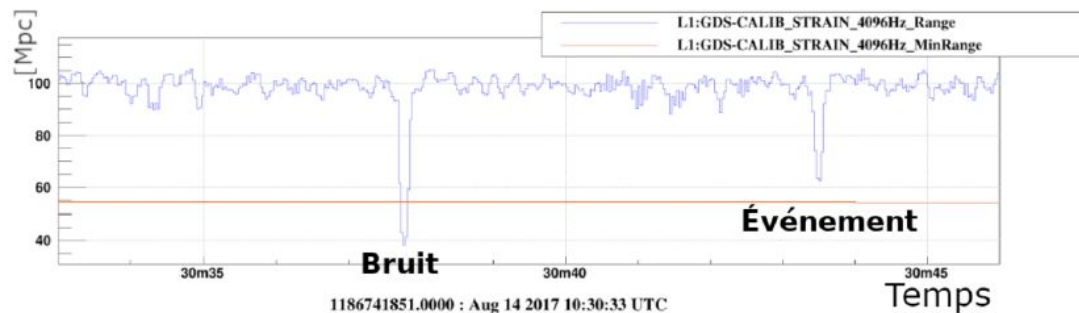
Gating

Portée du détecteur:

$$R = \frac{1}{2.26\rho} \frac{(GM)^{5/6}}{\pi^{2/3}c^{3/2}} \sqrt{\frac{5}{6} \int_{f_{min}}^{f_{ISCO}} \frac{f^{7/3}}{S_n(f)} df}$$

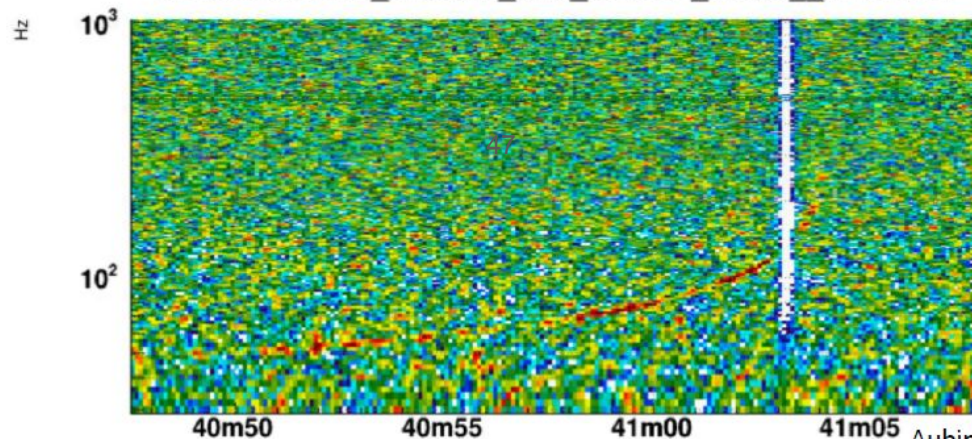
Distance telle qu'une BNS standard ($m_1 = 1.4M_\odot, m_2 = 1.4M_\odot$) soit vue avec un $SNR = 8$.

Gating : Fenêtre de Tukey quand le bruit est trop élevé ($R < 60\%R_{mediane}$) sur une courte période.



Aubin, 2020

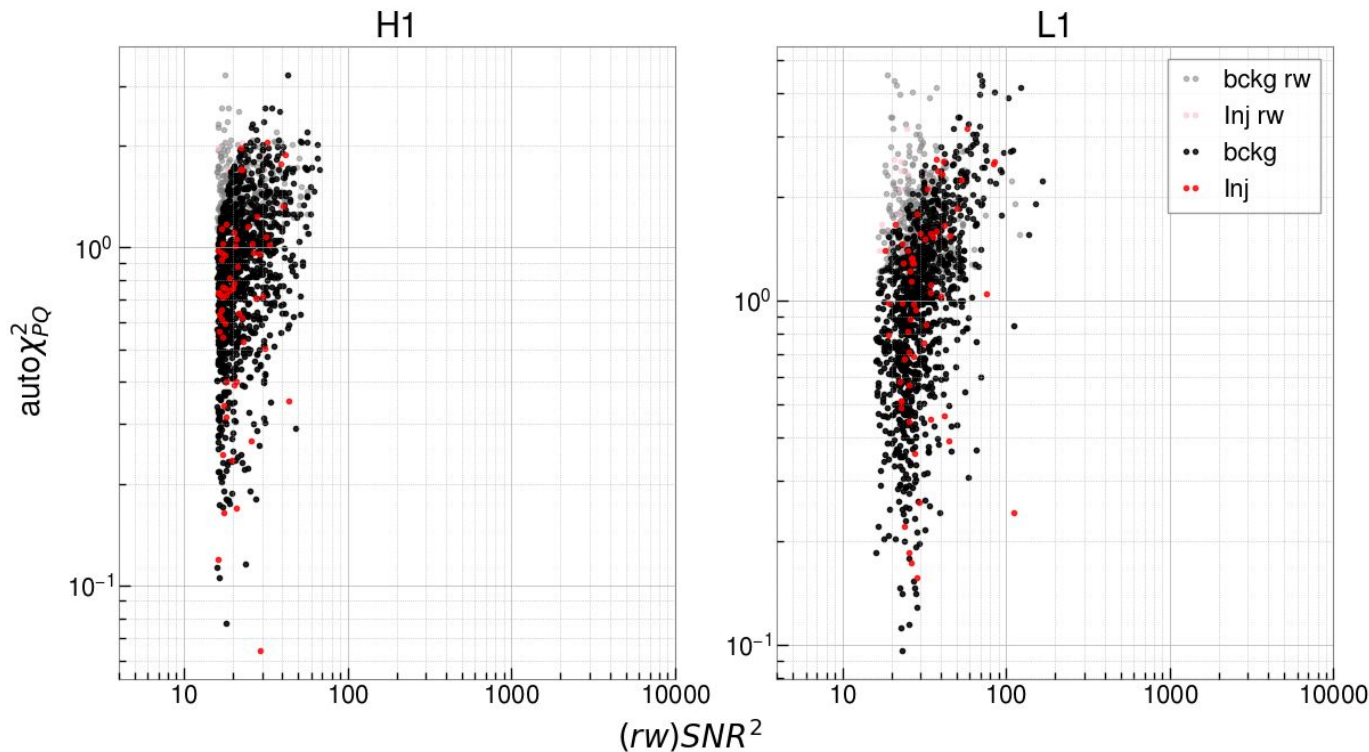
L1:DCH-CLEAN_STRAIN_C02_4096Hz_Gated_FFTTIME



Aubin, 2020

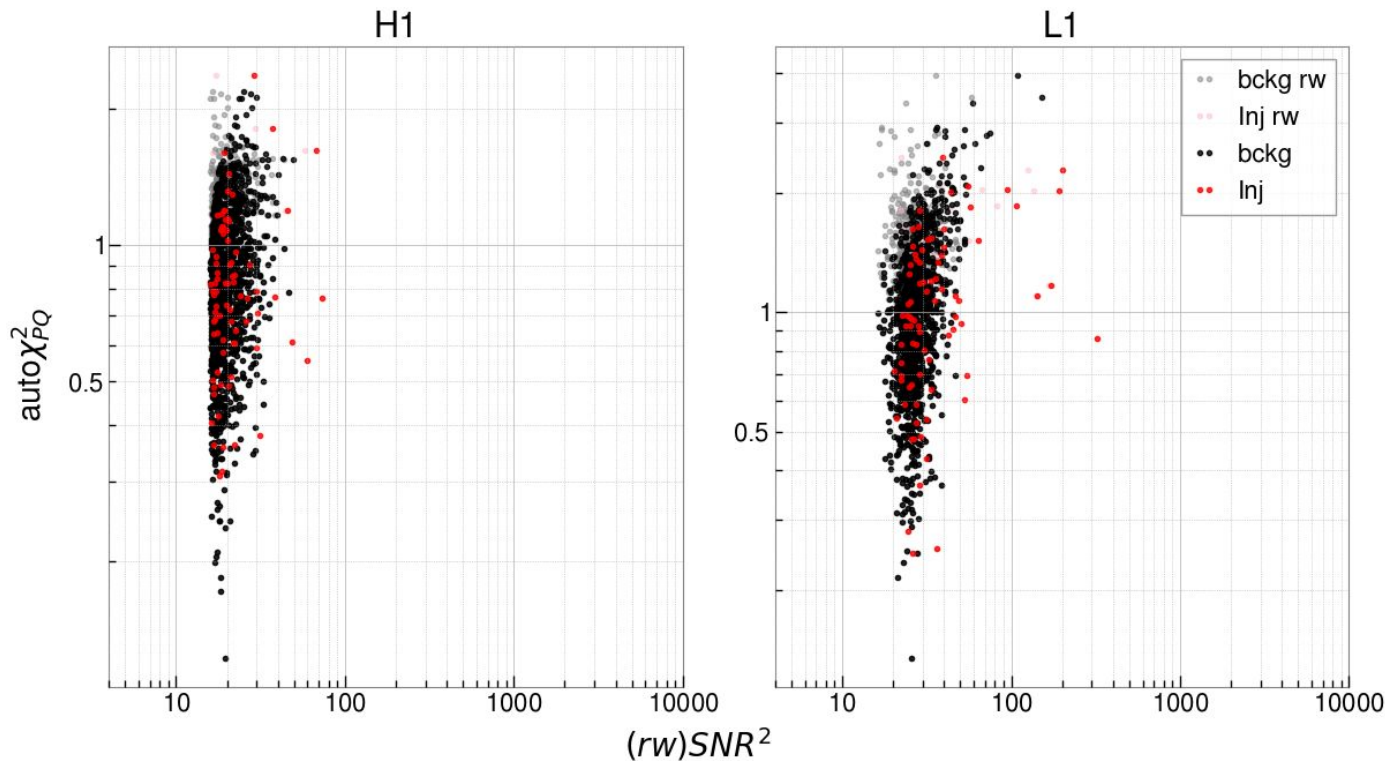
Auto χ^2_{PQ} des pré-déclenchements : 34 Hz

34.0Hz EW search



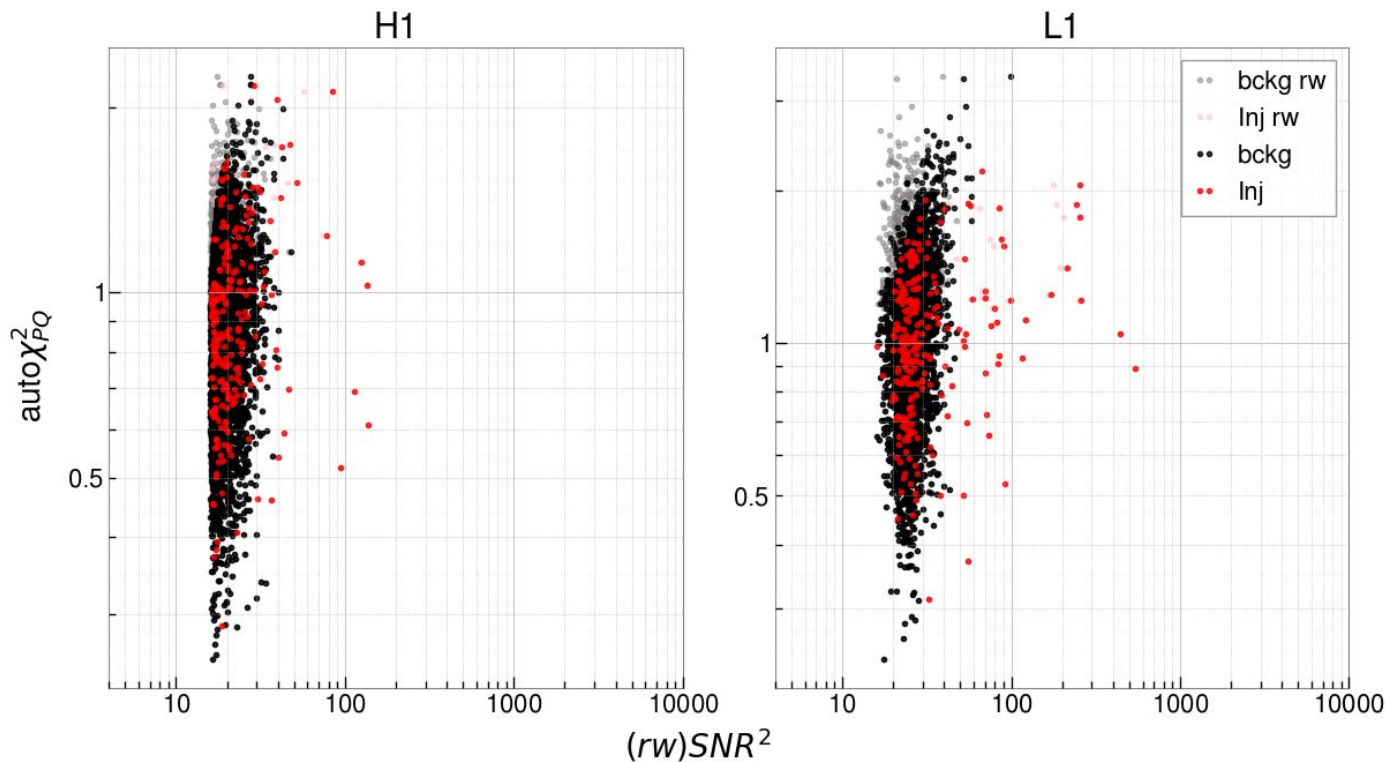
Auto χ^2_{PQ} des pré-déclenchements : 42 Hz

42.0Hz EW search



Auto χ^2_{PQ} des pré-déclenchements : 50 Hz

50.0Hz EW search



Auto χ^2_{PQ} des pré-déclenchements : 58 Hz

58.0Hz EW search

