

Recherche de signaux de fusions d'objets compacts avec Einstein Telescope

Adrian Macquet, Rencontre ET IJCLab, 12 juin 2025



Motivation et contexte

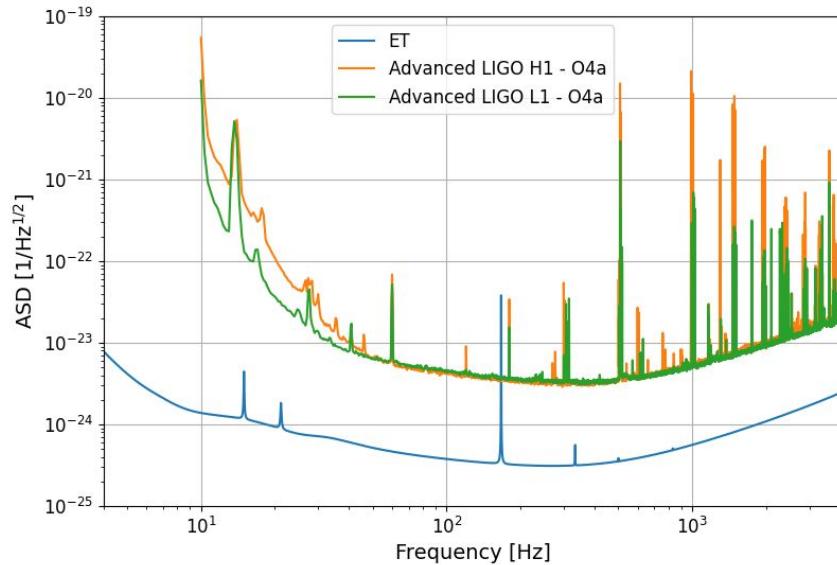
Sensibilité d'ET prévue x ~10 par rapport aux détecteurs actuels

Quel impact sur l'analyse des données ?

- Plus de signaux à analyser (x ~1000).
 - ~1 / minute vs ~1 / jour.
- Signaux plus longs (plusieurs heures).
 - Superposition?
- Signaux avec grand SNR (> 100).

Source principale: coalescences de binaires compactes (CBC) : trous noirs (BBH), étoiles à neutrons (BNS), et trou noir / étoile à neutron (NSBH).

- Le temps de calcul pour la recherche de CBC dans ET pourrait être prohibitif avec les méthodes actuelles.
- Test d'une méthode rapide de détection des CBC pour ET.



Réponse d'un détecteur interférométrique d'OG

Interféromètre de Michelson

Quantité mesurée: puissance en sortie P_{out}

→ Différence relative de longueur des bras (temps de trajet lumière)

$$h(t) = \frac{L_{\vec{u}}(t) - L_{\vec{v}}(t)}{L_0}$$

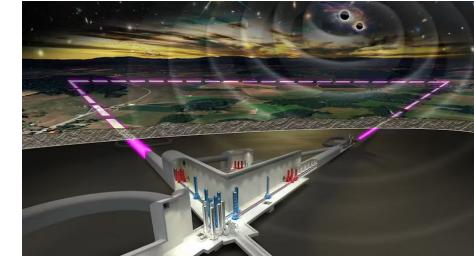
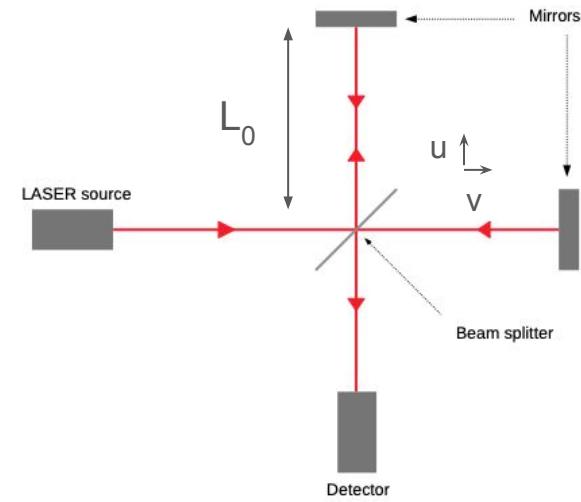
Signal d'OG: perturbation de la métrique de l'espace-temps.

2 degrés de liberté (h_+ , h_x) suivant une équation d'onde et induisant un déplacement relatif

$$h(t) = F^+(\hat{\Omega}, \psi)h_+(t) + F^\times(\hat{\Omega}, \psi)h_x(t)$$

Données à analyser: série temporelle $d(t) = h(t) + n(t)$.

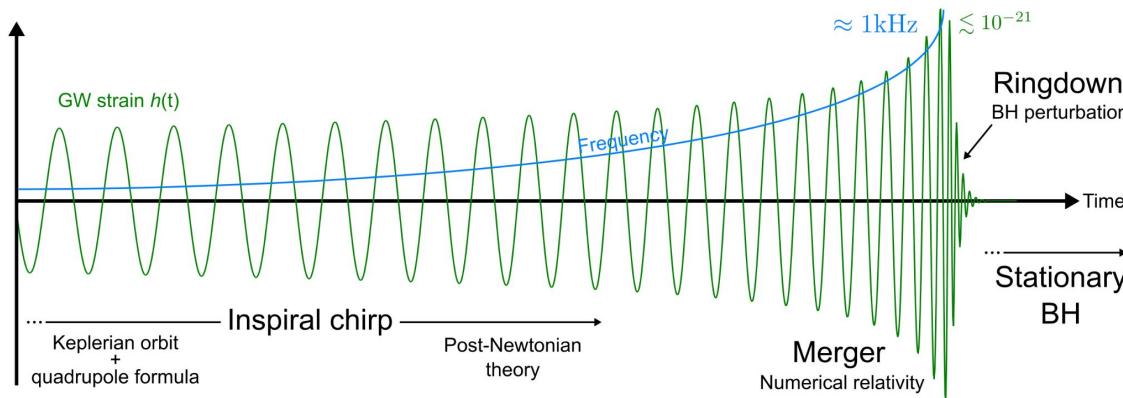
- Réponse à un signal d'OG $h(t)$
- Bruit $n(t)$ appx. gaussien caractérisé par sa PSD.



Ondes gravitationnelles émises par les CBC

Système à 2 corps “simple”: 2 masses ponctuelles m_1, m_2 .

- Emission d'OG bien modélisée par 15 paramètres.
 - ◆ Paramètre principal : “chirp mass” $\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$
 - ◆ Autres paramètres: rapport de masses m_2/m_1 , spins, excentricité, etc
 - ◆ Paramètres extrinsèques: position et orientation de la source, distance
 - Affectent la réponse du détecteur.



Plus grande chirp mass:
→ Plus grande amplitude.
→ Plus petite durée.

Analyse de données OG

$$d(t) = h(t) + n(t)$$

Détection

Est-ce qu'un segment de données contient ou non un signal ?

- Test d'hypothèse (signal + bruit) / (bruit).
- Identification d'événements candidats et estimation de leur significativité (FAR, p-value...)

Estimation des paramètres

Estimer les paramètres de la source à partir du signal observé.

- Paramètres extrinsèques : position, orientation de la source...
- Paramètres intrinsèques : nature de la source, masse, spin, etc.

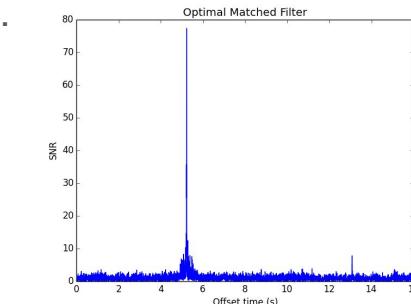
Suivant le régime de signal, ces deux étapes peuvent être distinctes ou non.

- **LIGO/Virgo** : dominé par le bruit -> identification de candidats puis estimation de leurs paramètres.
- **LISA** : dominé par le signal -> fit global des paramètres de toutes les sources.
- **ET** : cas intermédiaire ?

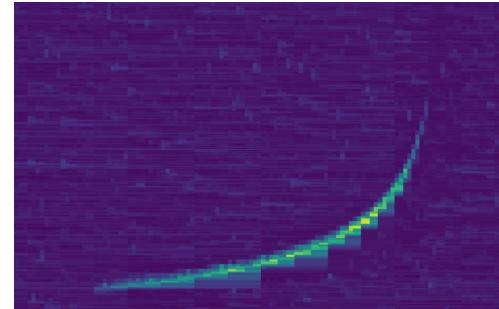
Détection de signaux transitoires

Analyses modélisées / non modélisées

- Modélisée: **filtrage adapté**, utilisé pour les recherches de CBC dans LIGO/Virgo.
 - Méthode optimale.
 - Nécessite la connaissance précise de la forme d'onde.
 - Analyses coûteuses en temps de calcul (banques de $\mathcal{O}(10^{5-6})$ modèles à corréler aux données).
- Non-modélisée: recherche de périodes d'excès de puissance dans les données.
 - Moins sensible que le filtrage adapté.
 - Ne nécessite pas de connaître la forme d'onde.
 - Analyses plus rapides.



Crédit: GWOSC

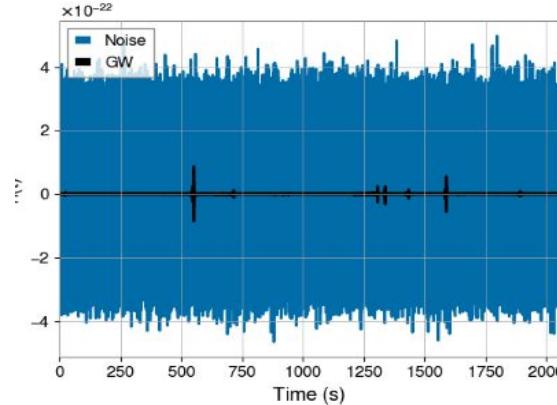
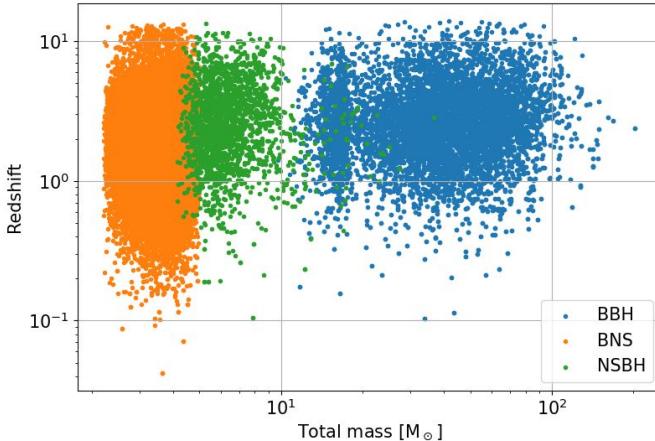


Représentation temps-fréquence d'un signal de BNS

ET Mock data challenge (MDC)

But: fournir un jeu de données d'ET simulées commun pour développer et tester les méthodes d'analyse.

- Configuration: 3 détecteurs en triangle.
- Bruit gaussien stationnaire suivant la PSD nominale d'ET.
- Distribution réaliste de signaux de CBC.
 - 31 jours de données.
 - ~70 000 signaux de CBC



Recherche de CBC avec une analyse non-modélisée

Motivation:

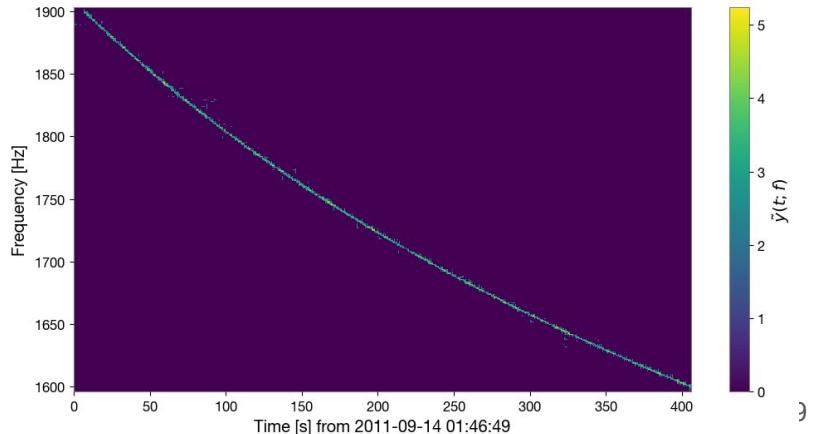
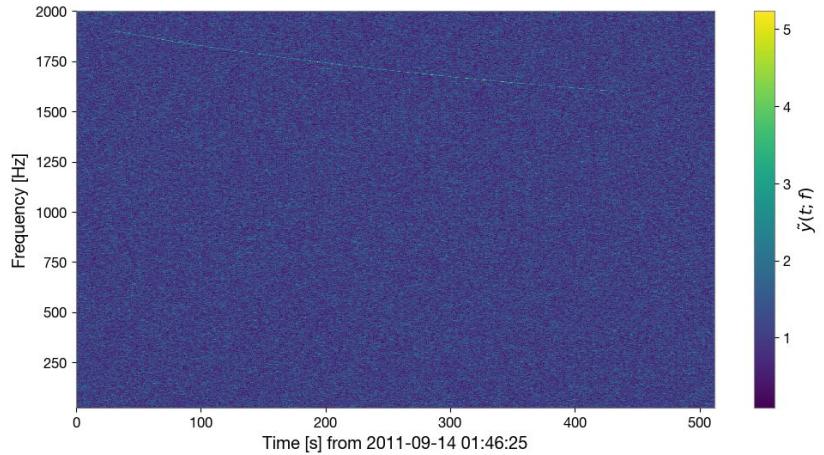
- Quelle fraction de signaux cette analyse est-elle capable de détecter (par rapport à une analyse modélisée) ?
- A quel coût en temps de calcul ?
- Est-ce que la présence de signaux à grand SNR / superposés perturbe l'analyse ?

Analyse du MDC d'ET avec une chaîne d'analyse faiblement modélisée : PySTAMPAS

- Conçue pour la recherche de signaux transitoires faiblement modélisés dans LIGO / Virgo avec des durées de ~1 - 1000 s.
- Adaptée pour la configuration 3 détecteurs triangulaire d'ET.

Principe général de l'analyse

1. Construction de cartes temps-fréquence à partir des données issues de chaque détecteur.
2. Application d'un algorithme de reconnaissance de motif ("clustering") sur les cartes.
 - Extraction de "triggers".
3. Corrélation entre chaque paire de détecteur.
 - Construction d'une statistique de détection cohérente pour chaque trigger.
 - Rejet des évènements dus au bruit dans un détecteur.



Estimation du bruit de fond

But: estimer le taux de fausse alarme (FAR) correspondant à la statistique de détection utilisée.

Hypothèse:

- Signal d'OG cohérent dans chaque détecteur (facteurs d'antenne et décalage d'arrivée).
- Bruit non-corrélé entre les détecteurs (limite dans le cas d'ET pour détecteurs proches).

Principe: introduire un décalage temporel entre les détecteurs lors de la corrélation (étape 3).

- Détruit la cohérence des signaux d'OG.
 - Préserve les propriétés du bruit.
- L'opération peut être répétée N fois pour simuler N réalisations du bruit.

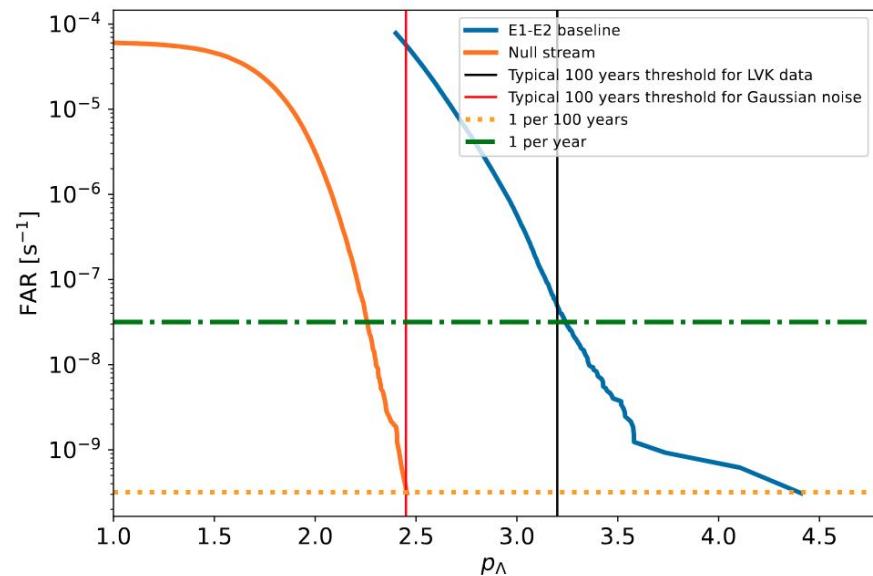
Estimation du bruit de fond dans le MDC d'ET

Excès de triggers observé (courbe bleue) par rapport au résultat attendu pour du bruit gaussien (courbe orange).

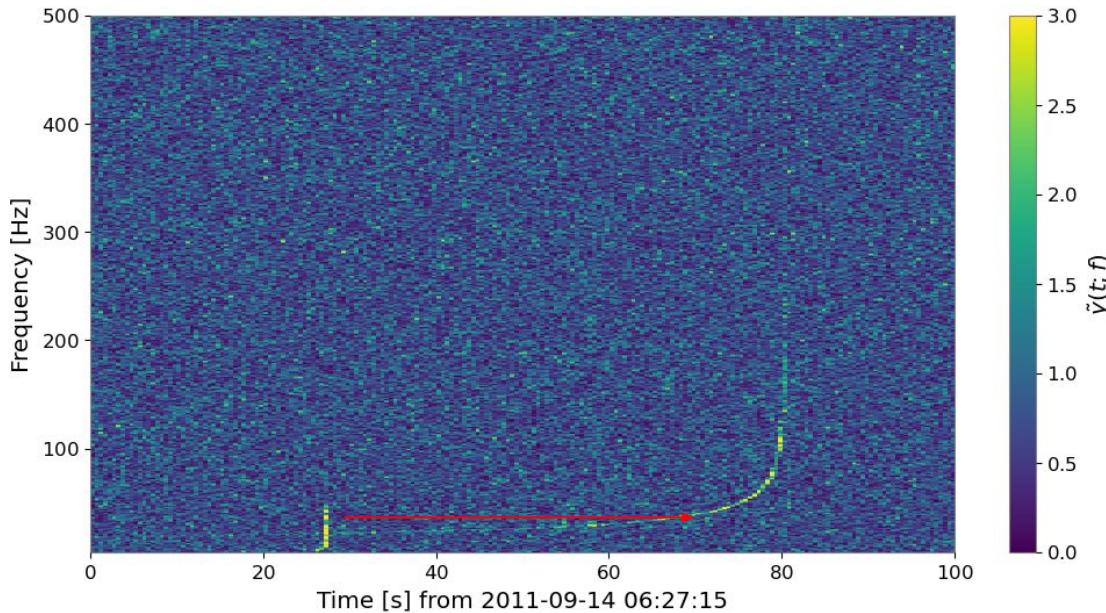
- Réduit significativement la sensibilité de l'analyse : seuil sur la statistique de détection plus haut à FAR constant.

Origine: superpositions accidentielles de signaux à grand SNR.

- Le décalage temporel ne détruit que partiellement la cohérence des signaux



Illustration



Superposition (partielle) de
2 signaux à grand SNR
→ Trigger avec une
statistique de
détectio
anormalement élevée.

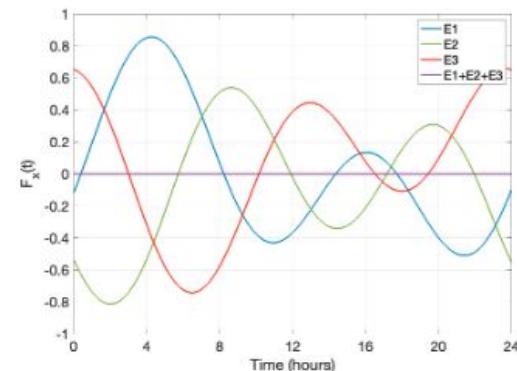
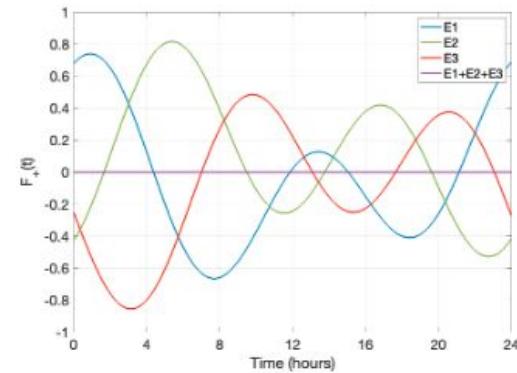
Une solution : null stream

Propriété géométrique du réseau de détecteurs triangulaires
: somme des facteurs d'antenne nulle.

- Canal sans signal d'OG.
- Propriétés du bruit préservées.

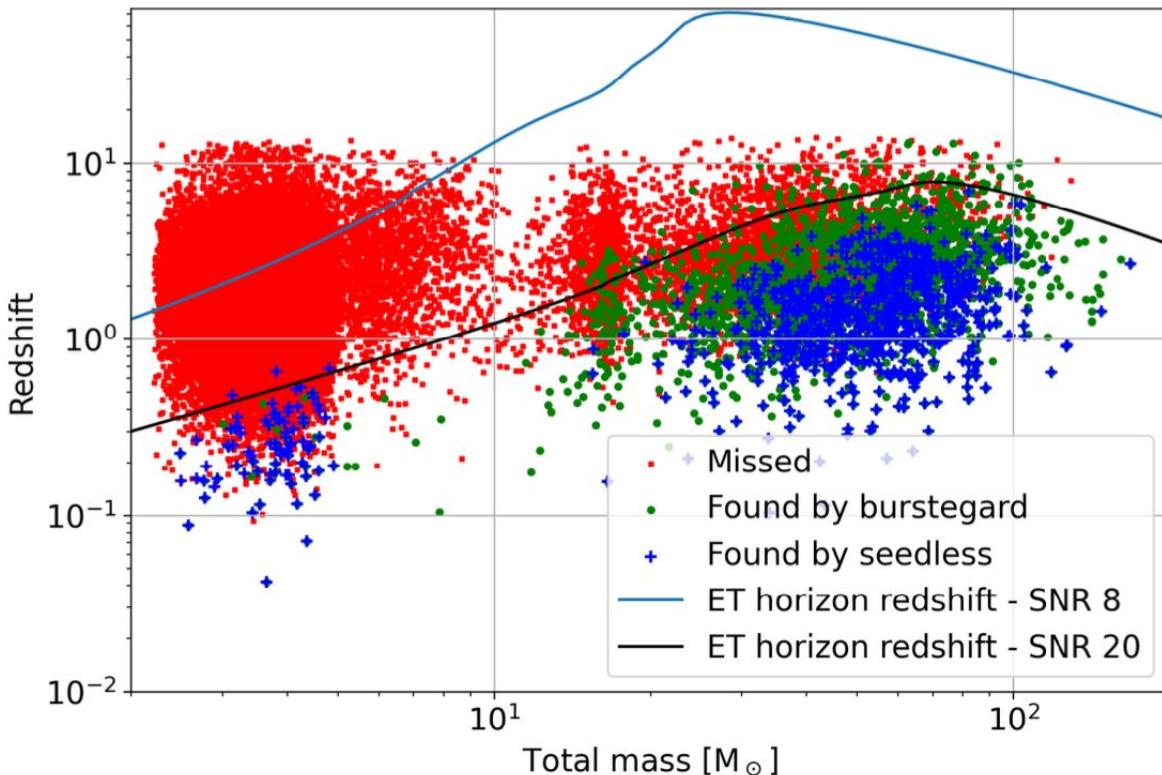
Estimation du bruit de fond sur le canal “null stream”:
compatible avec du bruit gaussien (courbe orange).

- Nécessite une configuration triangulaire.
- Difficultés en pratique : calibration, duty cycle des détecteurs, etc.



Crédit : T. Regimbau

Résultats

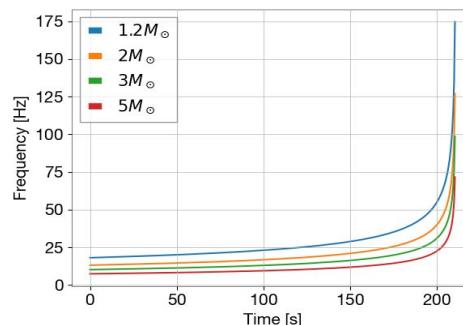
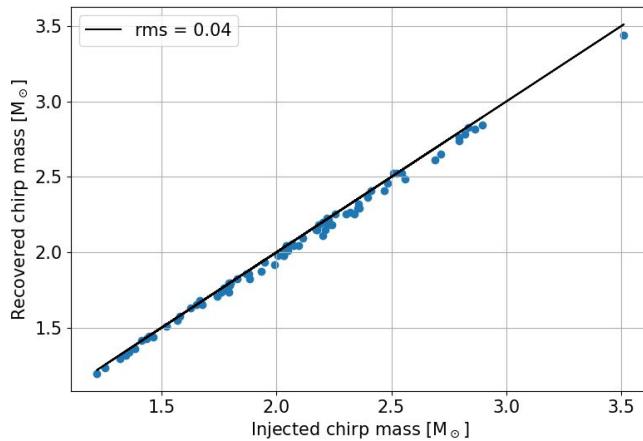


FAR: ≤ 1 par an

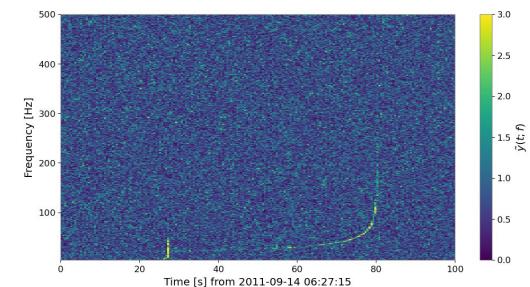
- 2567 BBH (**38% du total**).
- 89 % au dessus de 100 masses solaires.
- 81 BNS .
- Signaux détectés à partir de SNR ~ 20 .
 - (Filtrage adapté : SNR ~ 8 .)
- **Faible coût en temps de calcul: $O(10)$ heures sur VirtualData.**

Estimation de la chirp mass

L'algorithme de reconnaissance de motifs donne une estimation rapide de la *chirp mass*.



Fit de l'évolution
temps-fréquence du signal
de CBC sur les cartes T-F.



- Précision pour les BNS détectées: 1.4 % (RMS).
- o(10s) pour estimer la chirp mass pour un signal -> utile pour le suivi multi-messager ?

Conclusion

La présence d'un grand nombre de signaux détectables dans ET nécessite d'adapter les méthodes d'analyse de données de LIGO/Virgo.

- Analyses rapides et robustes, moins sensibles en complément des analyses "matched filter" plus coûteuses et plus sensibles.
- L'analyse détecte une fraction significative des BBH (en part. pour les grandes masses).
- L'analyse détecte ~3 BNS par jour et donne une estimation rapide et précise de la *chirp mass* (utile pour le suivi multi-messager).
- Faible coût en temps de calcul ($\mathcal{O}(10)$ heures) sur 28 machines à VirtualData).
- Utilisation du null stream nécessaire pour estimer correctement le bruit de fond.

Développements futurs:

- Nouveau MDC plus réaliste (bruit non gaussien, bruit corrélé, signaux non CBC...).
- Développement d'un algorithme de reconstruction et de soustraction des signaux à grand SNR.
- Mise en place d'une analyse modélisée (pyCBC).

Pattern recognition algorithms

→ 2 complementary strategies

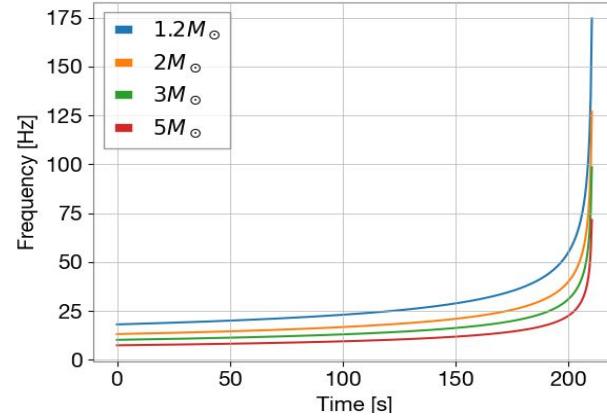
Unmodelled clustering

- “Burstegard”, seed-based clustering
- Sensitive to any signal morphology
- Need high-SNR pixels -> **not very suited for narrow-band, faint signals**

Seedless chirp

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{5}{256} \right)^{3/8} \left(\frac{GM_c}{c^3} \right)^{-5/8} (t_c - t)^{-3/8}$$

- “Seedless clustering”, look for specific pattern in the TF plane (e.g Bezier curves)
- Adapted to search for BNS signals: try Newtonian chirps
- For each 0.5s time bin, try 100 Newtonian chirps parametrized by chirp mass (1-5 solar masses)
 - **By-product:** merger time and chirp mass that maximizes the detection statistic (rough PE)



Recovery of fainter unmodelled transients

We inject various models of long-duration waveforms on top of the MDC data and compute distance at 50% recovery.

Waveform	Frequency [Hz]	Duration [s]	Distance [Mpc]	
			Noise	MDC data
ADI-A	135 – 166	39	445	425
ECBC-C	10 – 300	297	312	301
magnetar-D	1598 – 1900	400	2.80	2.80
SG-C	402 – 408	250	4.57	4.49

TABLE I. Distance at 50% detection efficiency for a FAR of 1 per year for a set of standard long-duration GW waveforms.

The CBC foreground only marginally affects detection efficiency.