

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

Adrian Macquet, Rencontre ET IJCLab, 12 juin 2025



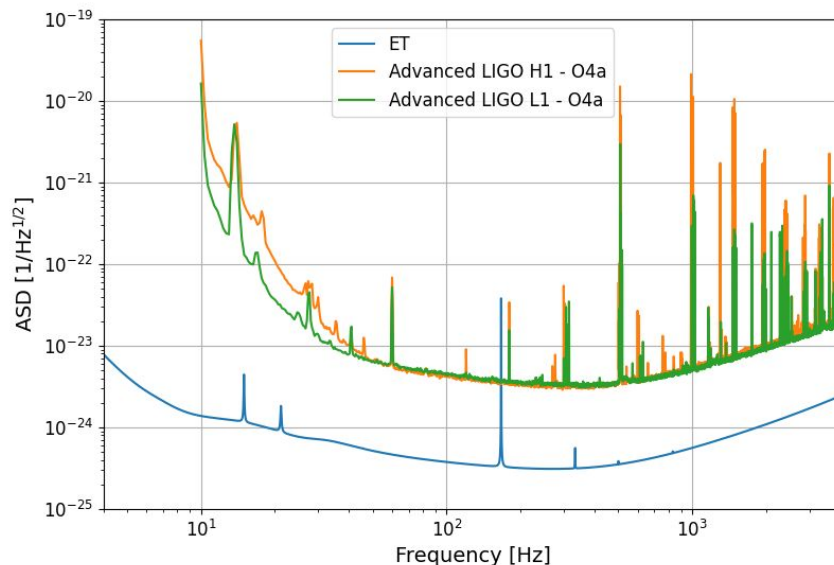
# Motivation et contexte

**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  $P_{\text{out}}$

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

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

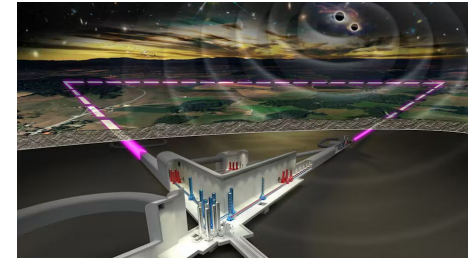
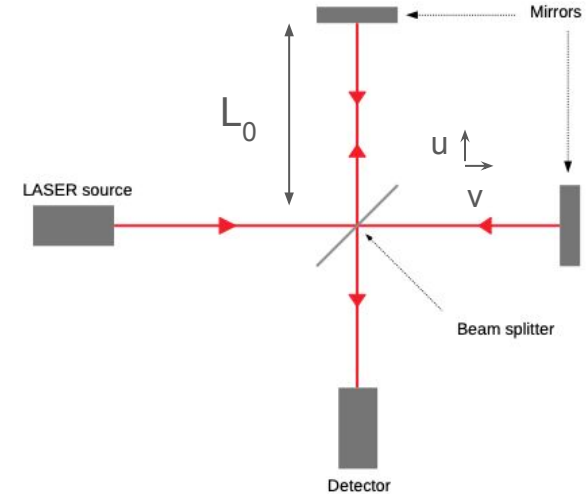
**Signal d'OG:** perturbation de la métrique de l'espace-temps.

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

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

**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.

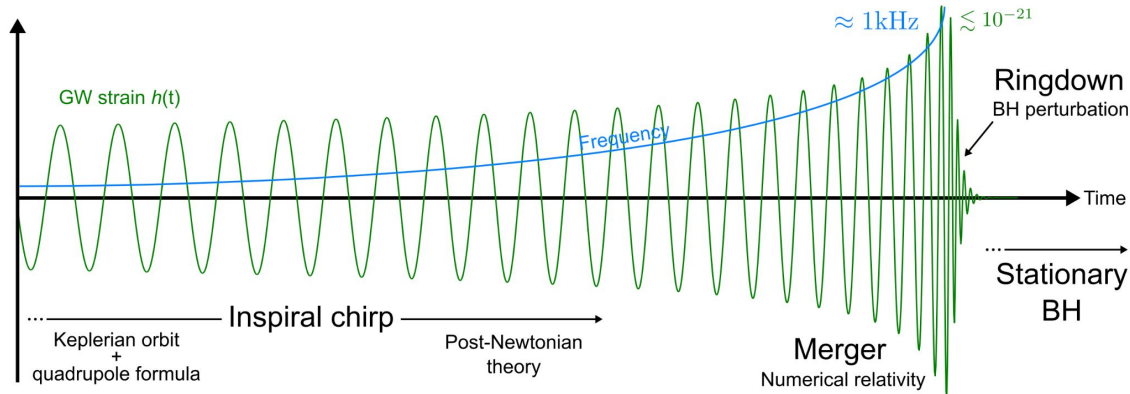


# Ondes gravitationnelles émises par les CBC

**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'évènements 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.

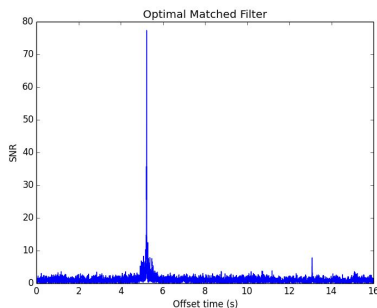
Suivant le régime de signal, ces deux étapes peuvent être distinctes ou non.

- **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

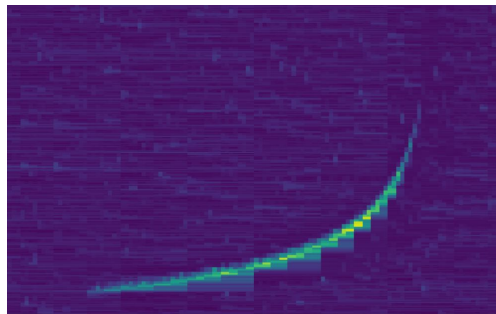
## Analyses modélisées / non modélisées

- 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  $o(10^{5-6})$  modèles à corrélérer aux données).



Crédit: GWOSC

- 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.



Représentation temps-fréquence d'un signal de BNS

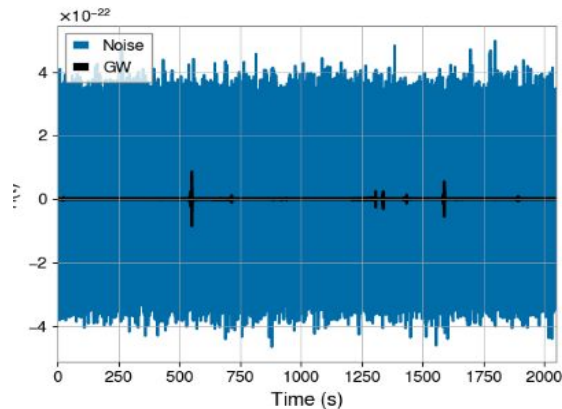
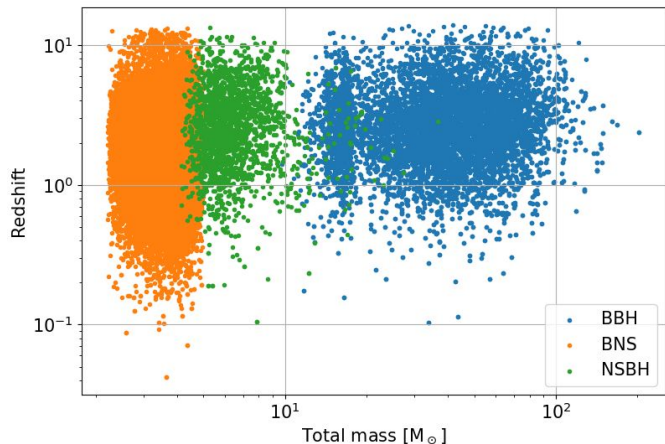
# ET Mock data challenge (MDC)

**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 ?

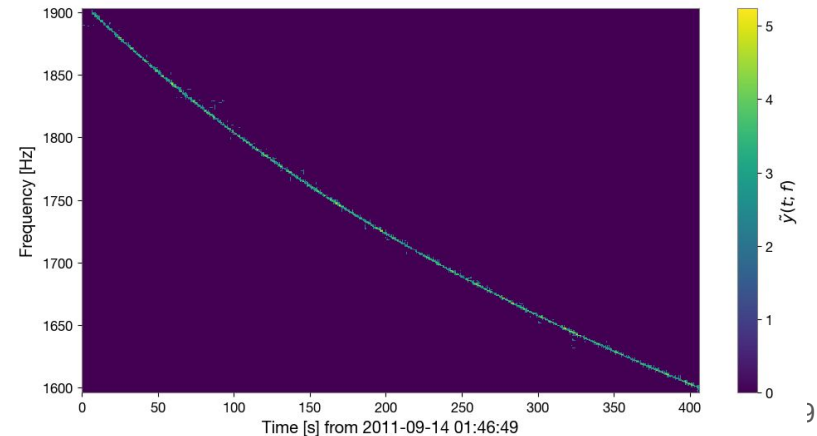
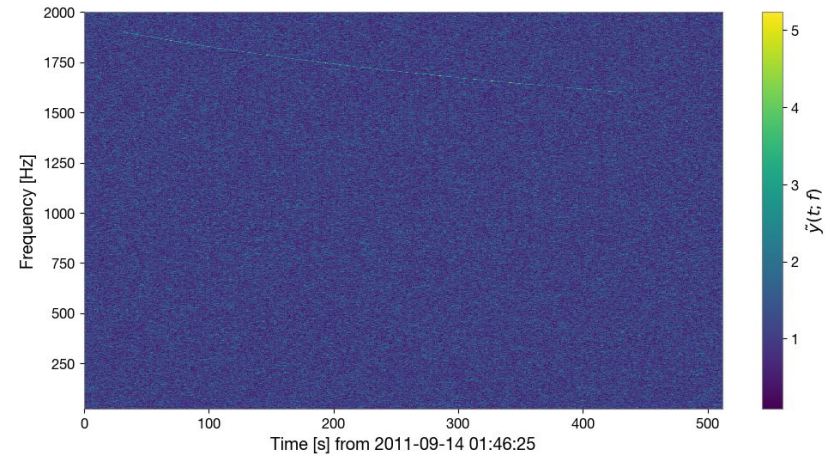
## **Analyse du MDC d'ET avec une chaîne d'analyse faiblement modélisée : PySTAMPAS**

- Conçue pour la recherche de signaux transitoires faiblement modélisés dans LIGO / Virgo avec des durées de  $\sim 1 - 1000$  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.

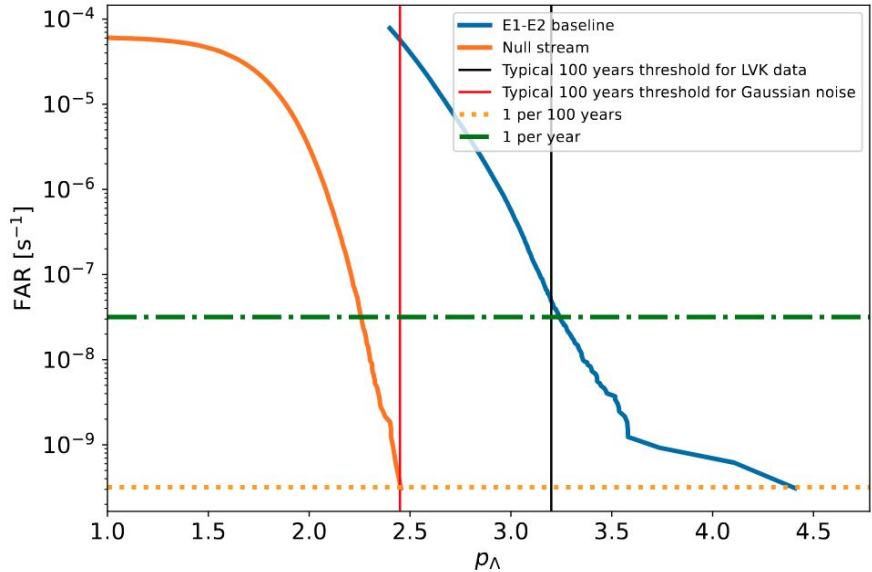
# Estimation du bruit de fond dans le MDC d'ET

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

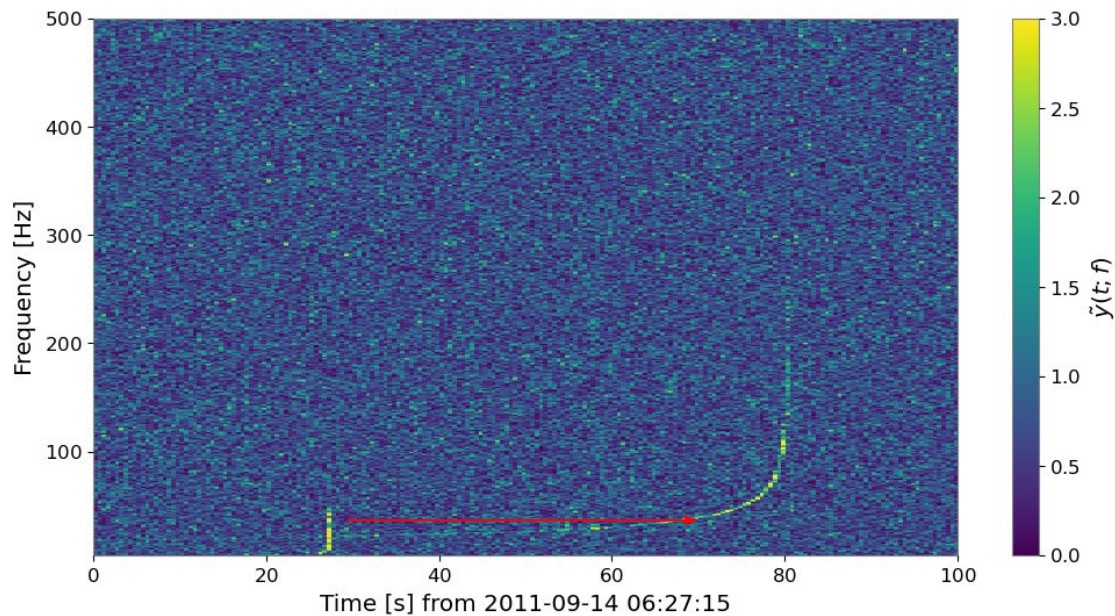
→ Réduit significativement la sensibilité de l'analyse : seuil sur la statistique de détection plus haut à FAR constant.

**Origine:** superpositions accidentelles 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  
détection  
anormalement élevée.

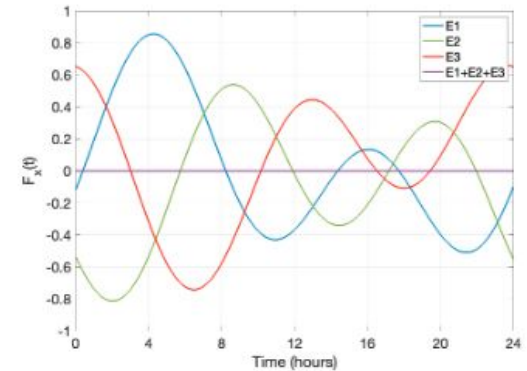
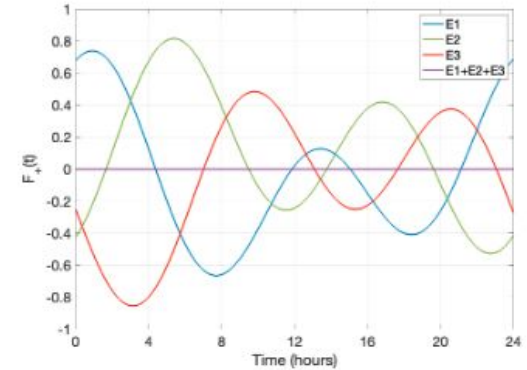
# Une solution : null stream

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

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

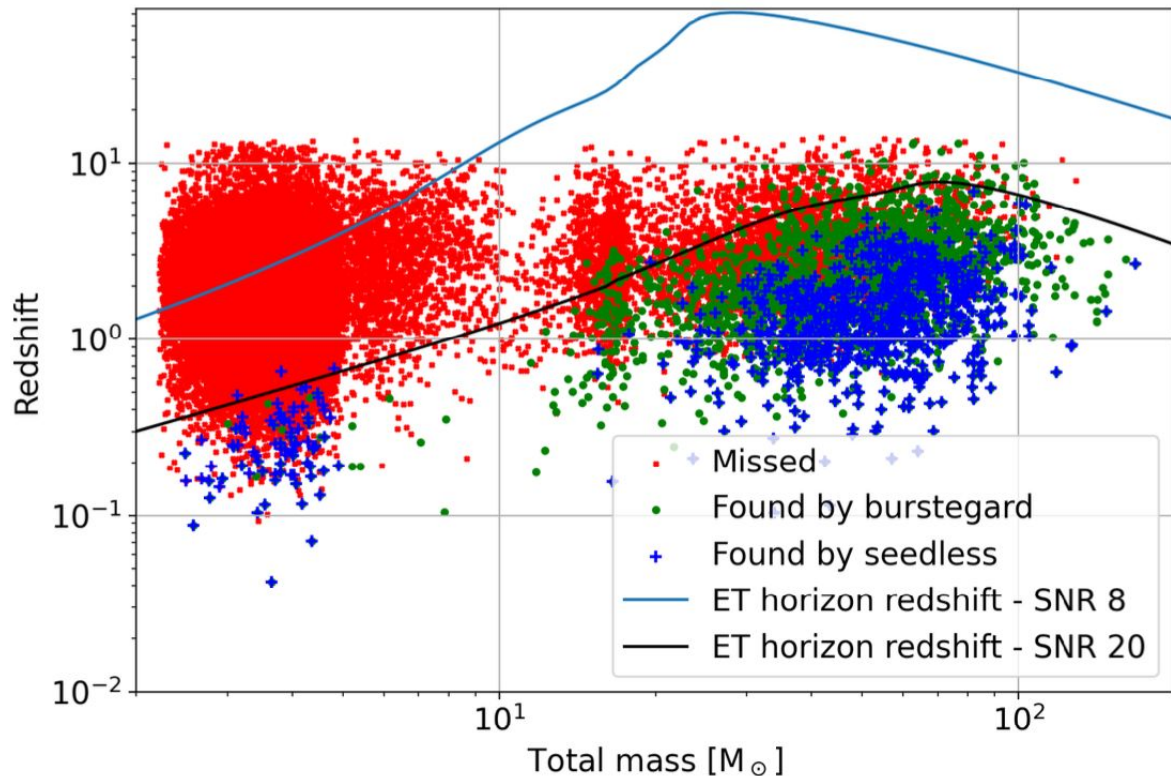
Estimation du bruit de fond sur le canal “null stream”:  
**compatible avec du bruit gaussien (courbe orange).**

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



Crédit : T. Regimbau

# Résultats

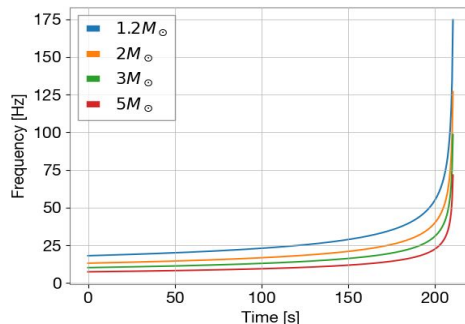
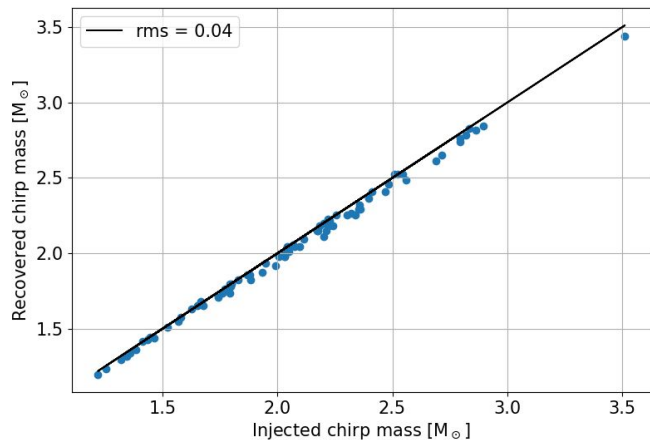


FAR:  $\leq 1$  par an

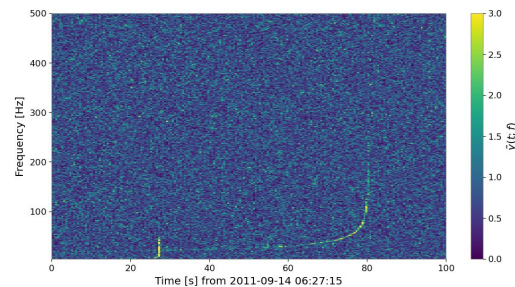
- 2567 BBH (**38% du total**).
- 89 % au dessus de 100 masses solaires.
- 81 BNS .
- Signaux détectés à partir de SNR  $\sim 20$ .
  - (Filtrage adapté : SNR  $\sim 8$ .)
- **Faible coût en temps de calcul:  $\mathcal{O}(10)$  heures sur VirtualData.**

# 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).
- $\mathcal{O}(10\text{s})$  pour estimer la chirp mass pour un signal  $\rightarrow$  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  $\sim 3$  BNS par jour et donne une estimation rapide et précise de la *chirp mass* (utile pour le suivi multi-messenger).
- Faible coût en temps de calcul ( $\sim 10$  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

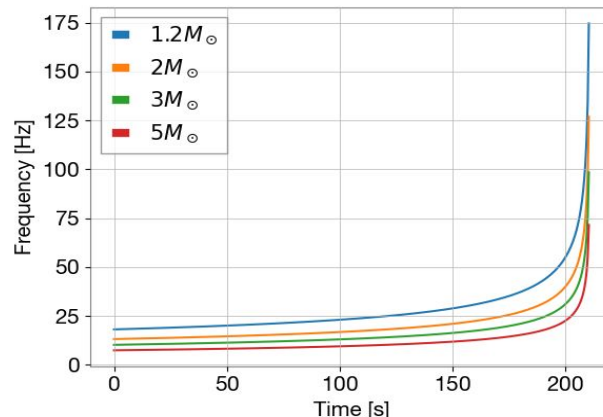
### Unmodelled clustering

- “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.**