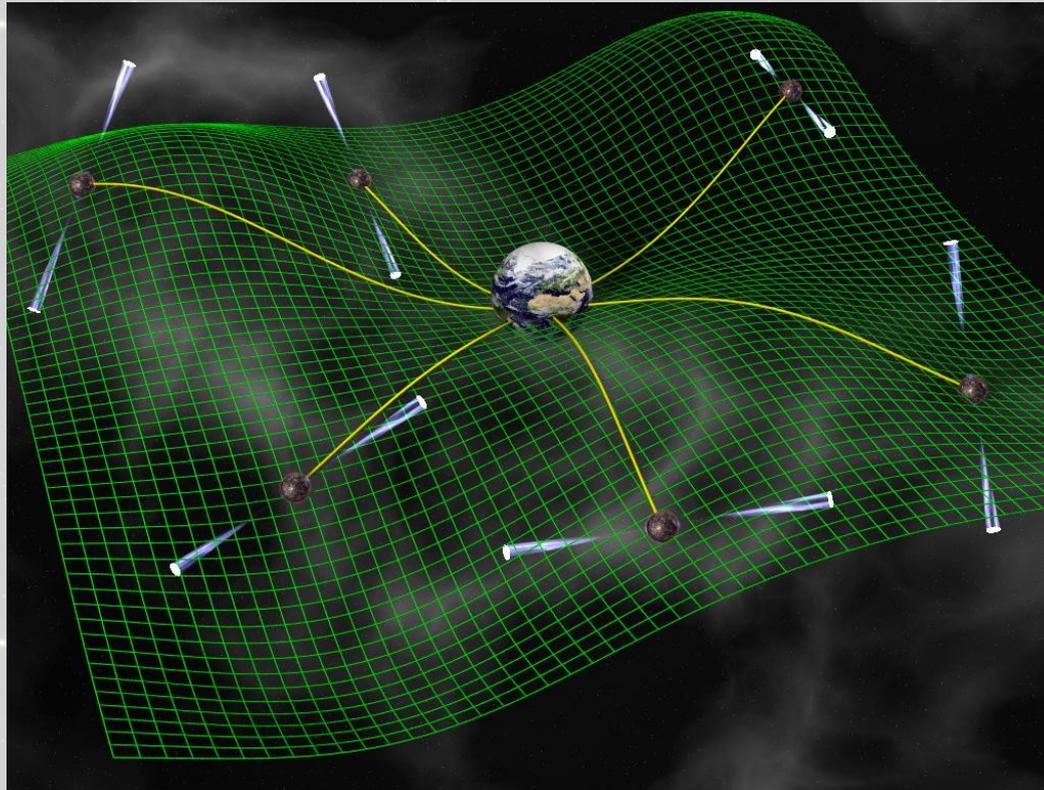


# Pulsar Timing Arrays

Programme soutenu par : PNCG, AS-GRAM, Gphys/OP

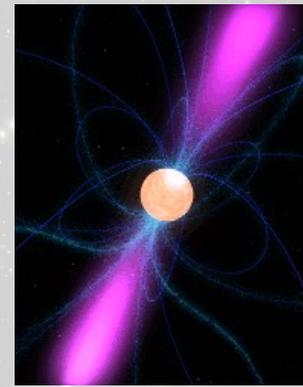
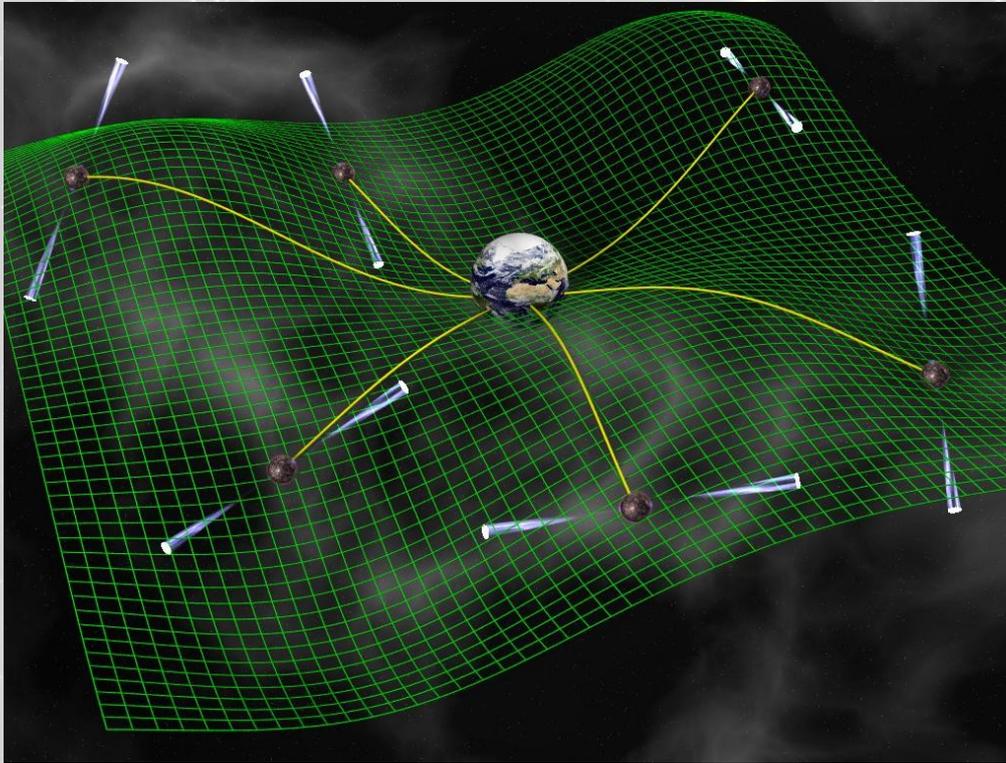


Journées du PNCG, décembre 2015, Nice

**G.Theureau** (LPC2E/USN/LUTh), **I.Cognard** (LPC2E/USN),

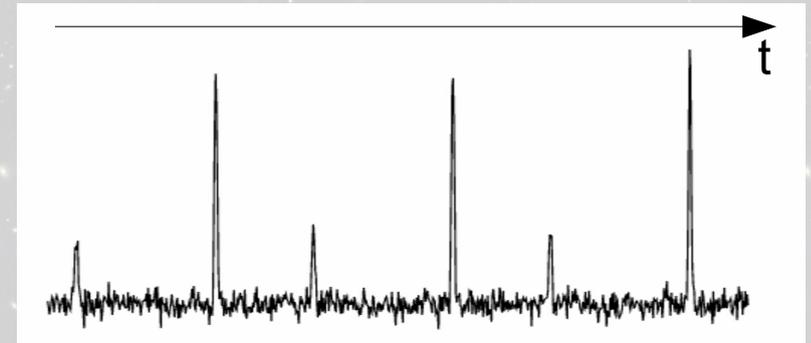
+ L.Guillemot (LPC2E/USN), A.Petiteau (APC)

# Pulsar Timing Arrays : principes



**Pulsars :**  
des étoiles à neutrons  
fortement magnétisées  
en rotation rapide et stable

Un pulsar milliseconde est considéré  
comme une horloge quasi parfaite



**La Terre et le pulsar distant sont considérés comme des masses libres  
dont la position répond à des changements dans la métrique de l'espace-temps**

→ *Le passage d'une onde gravitationnelle perturbe la métrique  
et produit des fluctuations dans les temps d'arrivées des pulsations*

Avec une incertitude  $dt$  ( $\sim 100$  ns) et une période d'observation  $T$  ( $\sim 20$  ans)

→ on est sensible à une *amplitude*  $\sim dt/T$  et des *fréquences* de l'ordre de  $f \sim 1/T$

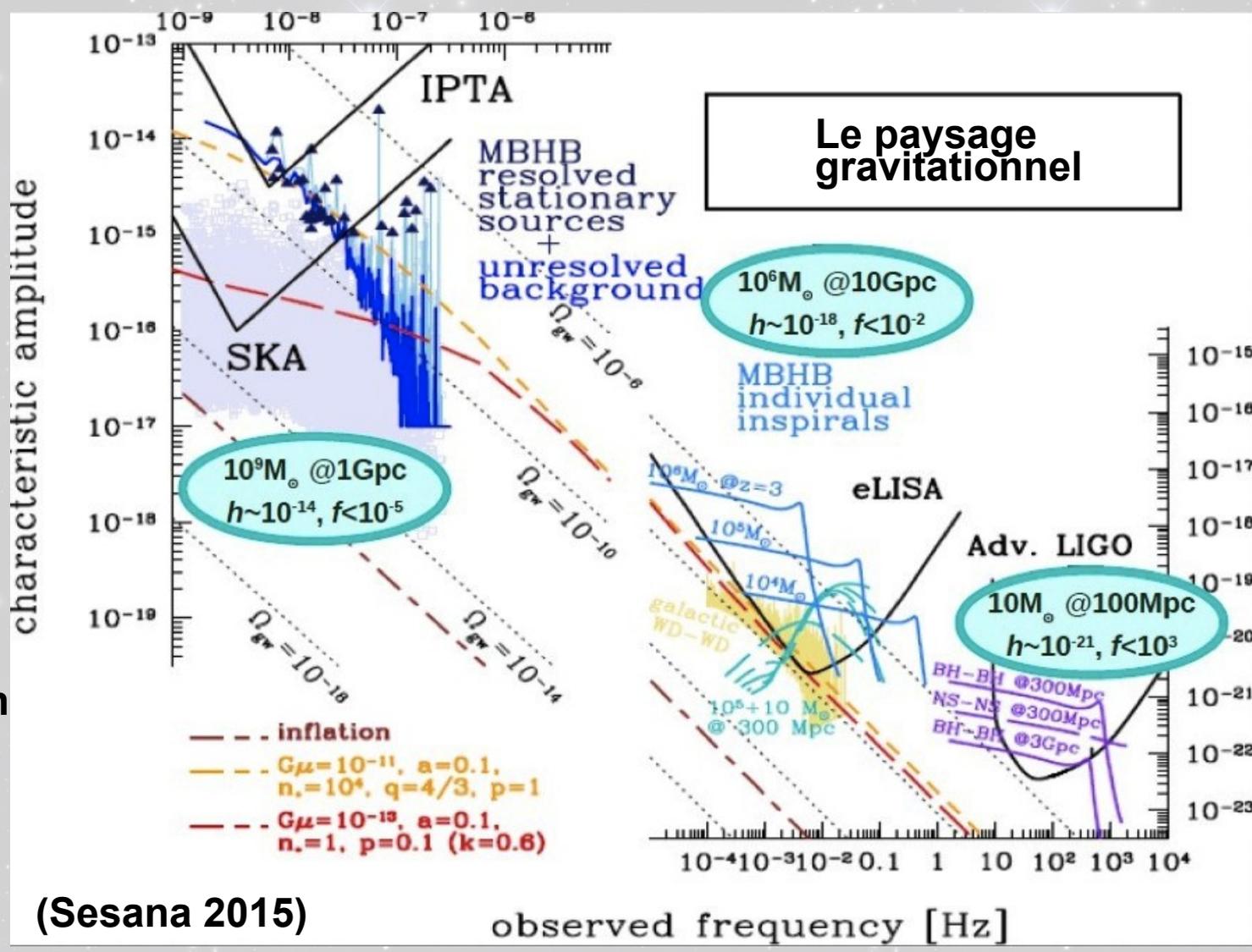
**domaine de fréquences** →  $10^{-9} - 10^{-7}$  Hz

**Le fond d'ondes  
Gravitationnelles :**

*Le domaine du nanoHertz*

- Trous noirs binaires Super-massifs (SMBHB)
- Boucles de cordes cosmiques
- « Reliques » de l'inflation

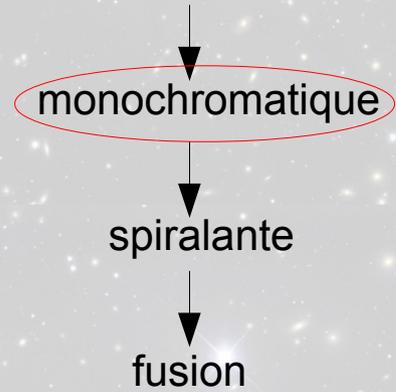
$$h_c(f) = A \left( \frac{f}{\text{yr}^{-1}} \right)^\alpha$$



Model	A	α	References
Supermassive black holes	10 <sup>-15</sup> – 10 <sup>-14</sup>	-2/3	Jaffe & Backer (2003) Wyithe & Loeb (2003) Enoki et al. (2004)
Relic GWs	10 <sup>-17</sup> – 10 <sup>-15</sup>	-1 – -0.8	Grishchuk (2005)
Cosmic String	10 <sup>-16</sup> – 10 <sup>-14</sup>	-7/6	Maggiore (2000)

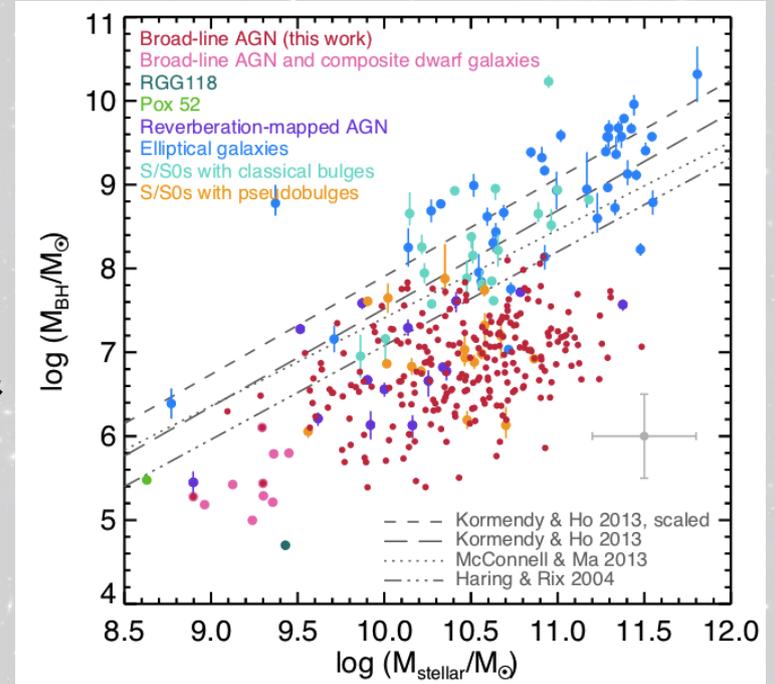
# Les modèles de population de trous noirs binaires super-massifs

Formation de la binaire



$M_{\text{BH}} > 10^7 M_{\odot}$   
Distance  $z < 2$

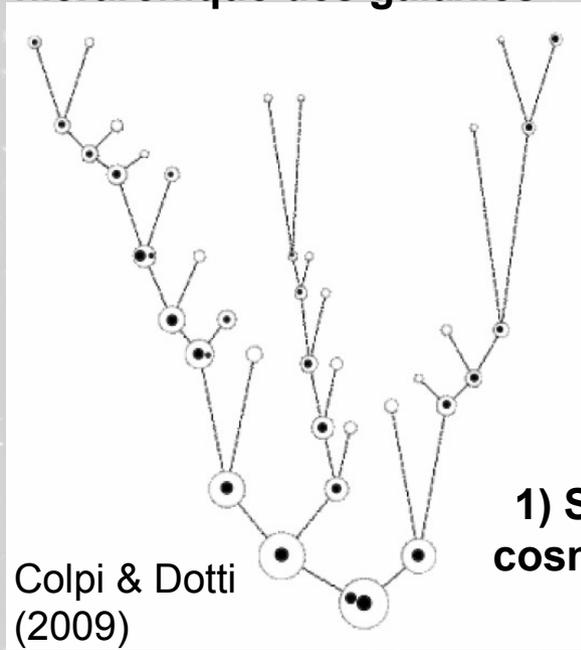
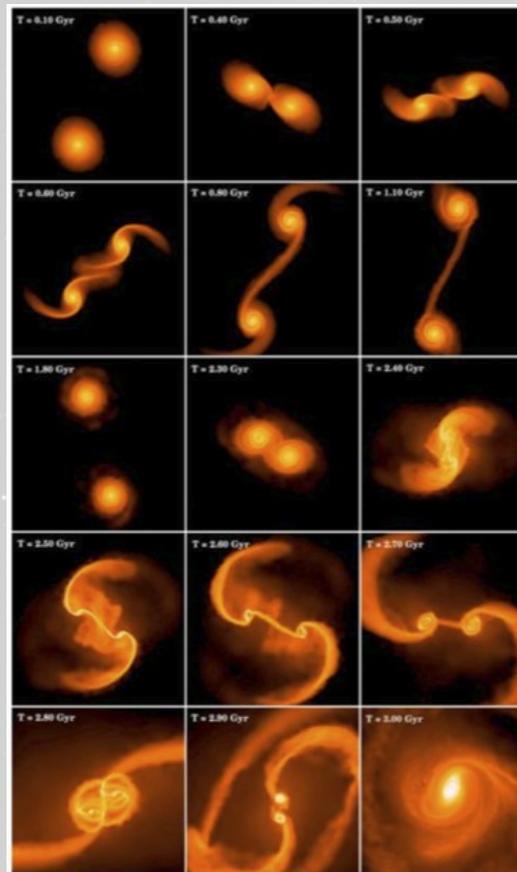
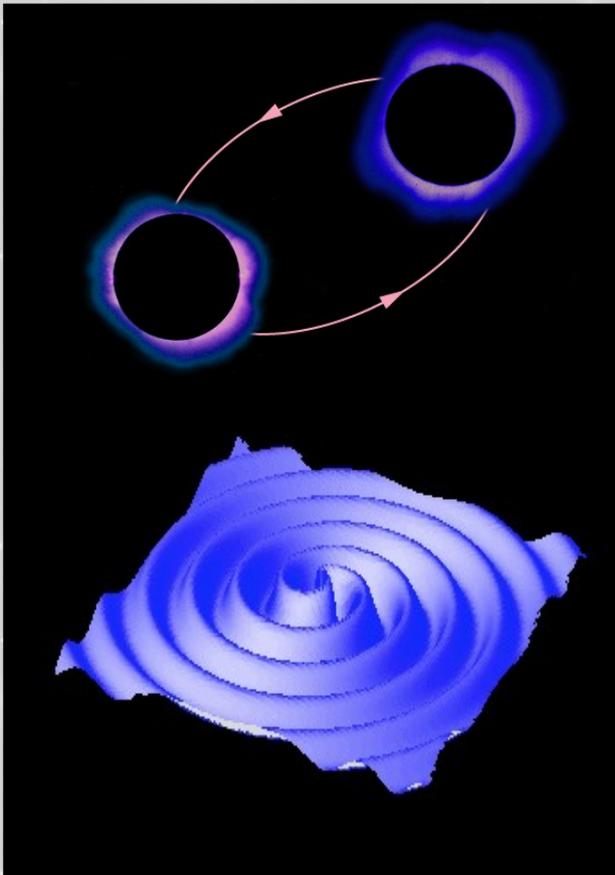
Reines & Volonteri (2015)



4) Lien entre BH et galaxie hôte

3) Modèles de formation de BH

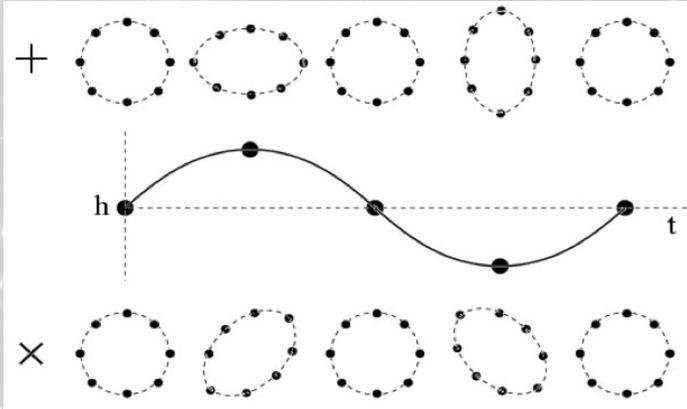
2) Scénario de formation hiérarchique des galaxies



1) Simulations cosmologiques  $\Lambda$ CDM

Colpi & Dotti (2009)

# Les modèles de population de trous noirs binaires super-massifs

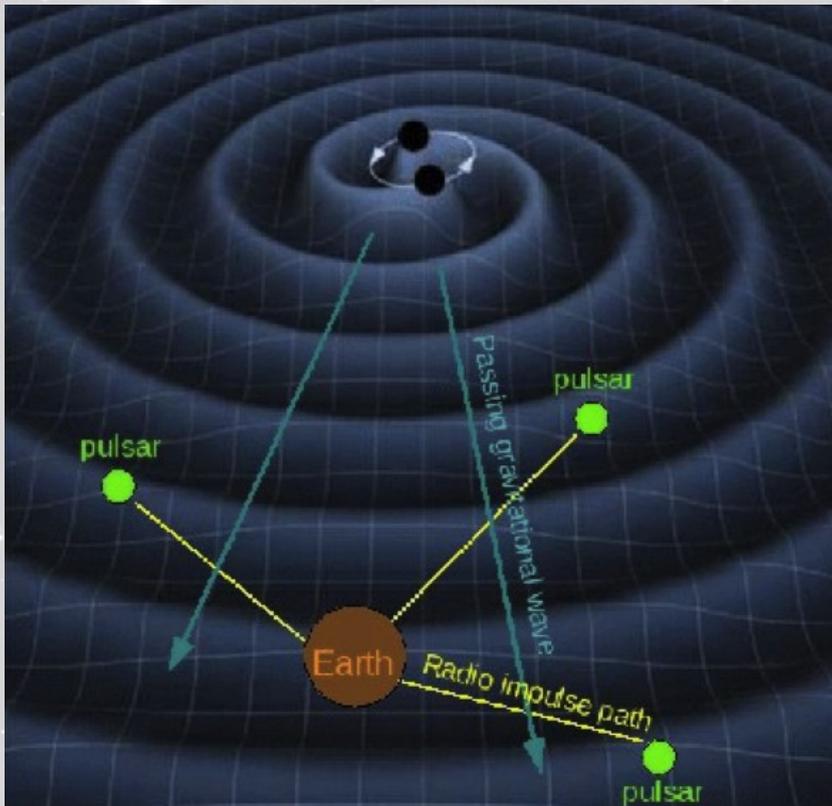


$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + h_{+}^{TT} & h_{\times}^{TT} \\ 0 & 0 & h_{\times}^{TT} & 1 - h_{+}^{TT} \end{pmatrix}$$

Une onde gravitationnelle est une déformation de l'espace-temps

$$h_{+}(t) = \mathcal{A}(1 + \cos^2 i) \cos(\Phi(t) + \Phi_0)$$

$$h_{\times}(t) = -2\mathcal{A} \cos i \sin(\Phi(t) + \Phi_0)$$



## Caractérisation de l'onde gravitationnelle :

$7 + 2 \times N_{\text{pulsars}}$  paramètres

- $\alpha, \delta$  position de la source
- $D_L$  distance à la source
- $i$  inclinaison
- $f_e$  fréquence de l'onde à la Terre
- $\Phi$  phase
- $\Psi$  orientation (polarisation)
- +
- $f_p$  fréquence de l'onde au pulsar
- $\Phi_p$  décalage de phase dans le terme pulsar

# De l'onde gravitationnelle au résidu de temps d'arrivée :

$$r(t) = \int_0^t \frac{\delta\nu}{\nu}(t') dt'$$

$$\frac{\delta\nu}{\nu}(t) = \frac{1}{2} \frac{\hat{n}^i \hat{n}^j}{1 + \hat{n} \cdot \hat{k}} \left( h_{ij}(t - L(1 + \hat{k} \cdot \hat{n})) - h_{ij}(t) \right)$$

Amplitude de l'onde au pulsar

Amplitude de l'onde à la Terre

- $n$  : direction du pulsar
- $L$  : distance Terre – pulsar
- $h_{ij}$  : amplitude de l'onde
- $k$  : direction de propagation

# De l'onde gravitationnelle au résidu de temps d'arrivée :

$$r(t) = \int_0^t \frac{\delta\nu}{\nu}(t') dt'$$

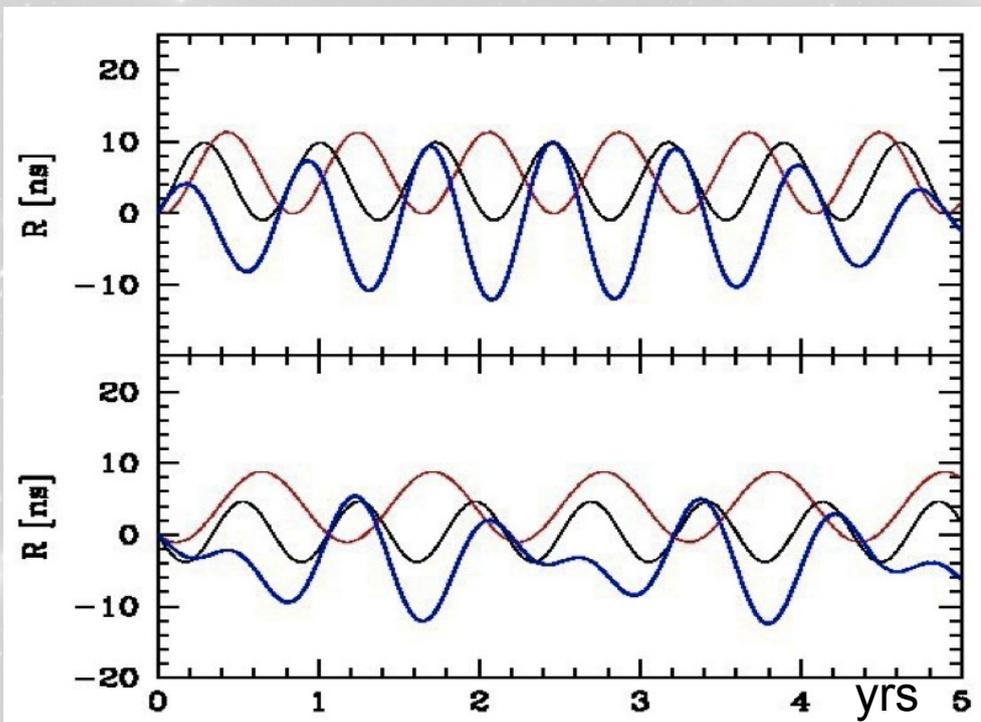
$$\frac{\delta\nu}{\nu}(t) = \frac{1}{2} \frac{\hat{n}^i \hat{n}^j}{1 + \hat{n} \cdot \hat{k}} \left( \underbrace{h_{ij}(t - L(1 + \hat{k} \cdot \hat{n}))}_{\text{Amplitude de l'onde au pulsar}} - \underbrace{h_{ij}(t)}_{\text{Amplitude de l'onde à la Terre}} \right)$$

- $n$  : direction du pulsar
- $L$  : distance Terre – pulsar
- $h_{ij}$  : amplitude de l'onde
- $k$  : direction de propagation

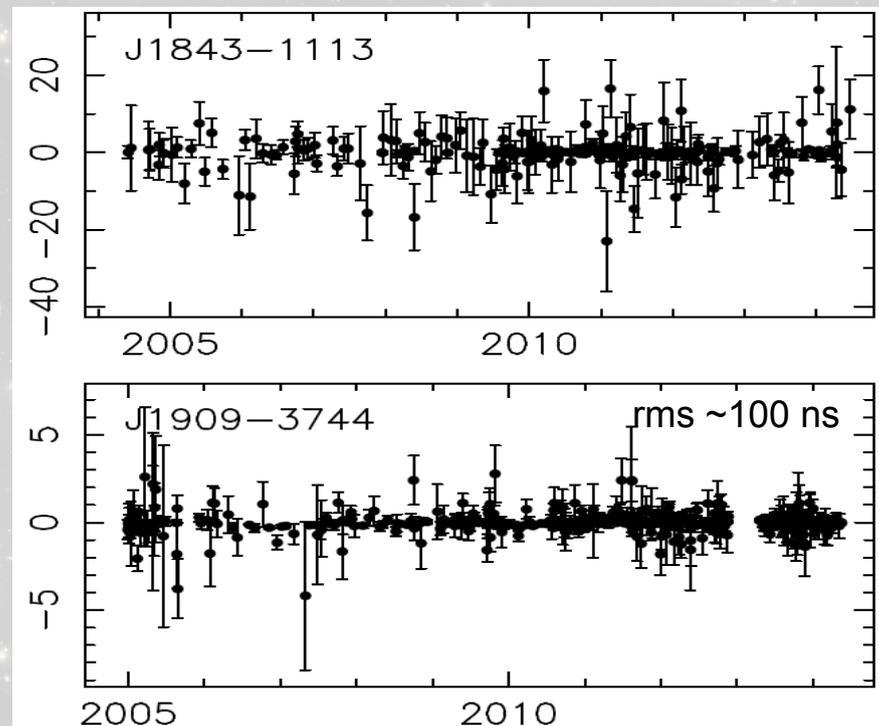
Amplitude de l'onde au pulsar

Amplitude de l'onde à la Terre

Sesana 2015



Desvignes et al 2015



# De l'onde gravitationnelle au résidu de temps d'arrivée :

$$r(t) = \int_0^t \frac{\delta\nu}{\nu}(t') dt'$$

$$\frac{\delta\nu}{\nu}(t) = \frac{1}{2} \frac{\hat{n}^i \hat{n}^j}{1 + \hat{n} \cdot \hat{k}} \left( \underbrace{h_{ij}(t - L(1 + \hat{k} \cdot \hat{n}))}_{\text{Amplitude de l'onde au pulsar}} - \underbrace{h_{ij}(t)}_{\text{Amplitude de l'onde à la Terre}} \right)$$

Amplitude de l'onde au pulsar

Amplitude de l'onde à la Terre

- $n$  : direction du pulsar
- $L$  : distance Terre – pulsar
- $h_{ij}$  : amplitude de l'onde
- $k$  : direction de propagation

L'amplitude caractéristique des ondes gravitationnelles pour une population de trous noirs binaires circulaires :

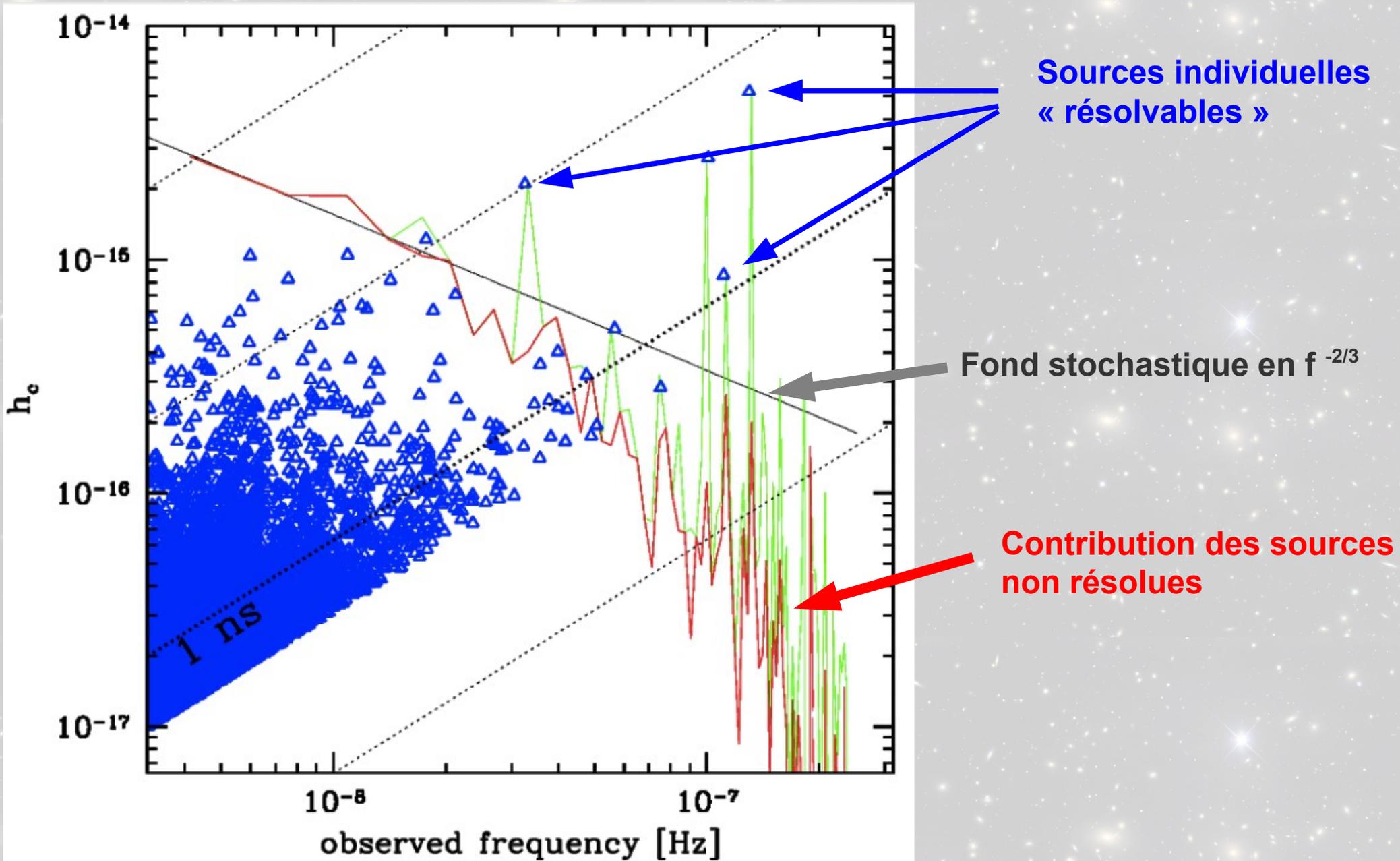
$$h_c^2(f) = \int_0^\infty dz \int_0^\infty d\mathcal{M} \frac{d^3 N}{dz d\mathcal{M} d \ln f_r} h^2(f_r)$$

**Fond stochastique**

$$h_c(f) = A \left( \frac{f}{\text{yr}^{-1}} \right)^{-2/3}$$

Phinney 2001

# Population SMBBH : contribution du fond & sources individuelles



Sesana (2013b)

# Analyse des données et extraction du signal gravitationnel

Toutes les méthodes sont basées sur la **fonction de vraisemblance**, qui décrit la probabilité que les résidus contiennent **un signal d'une certaine forme** décrit par **certains paramètres**

$$p(\delta\vec{t}|\vec{\xi}, \vec{\theta}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \det C}} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \delta\vec{t} - M\delta\vec{\xi} - \vec{s} \right)^T C^{-1} \left( \delta\vec{t} - M\delta\vec{\xi} - \vec{s} \right) \right)$$

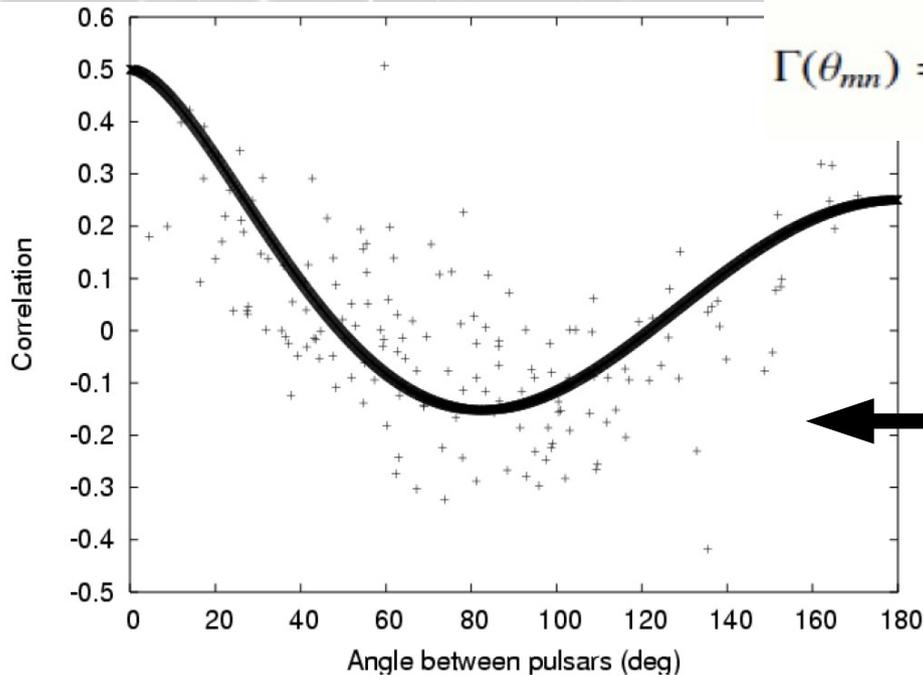
Le signal gravitationnel est contenu dans la **matrice de corrélation C**, qui dépend à la fois de l'amplitude du signal en fonction de la position sur le ciel et du « diagramme d'antenne » :

$$C \sim \Gamma_{ab} \rho_i \delta_{ij} + \epsilon_i \delta_{ij} + \eta_i \delta_{ab} \delta_{ij} + \kappa_{ai} \delta_{ab} \delta_{ij}$$

$$\Gamma_{ab} = \frac{3}{8\pi} (1 + \delta_{ab}) \int_{S^2} d\hat{\Omega} P(\hat{\Omega}) \sum_A F_a^A(\hat{\Omega}) F_b^A(\hat{\Omega})$$

**Une solution pour un fond isotrope :**

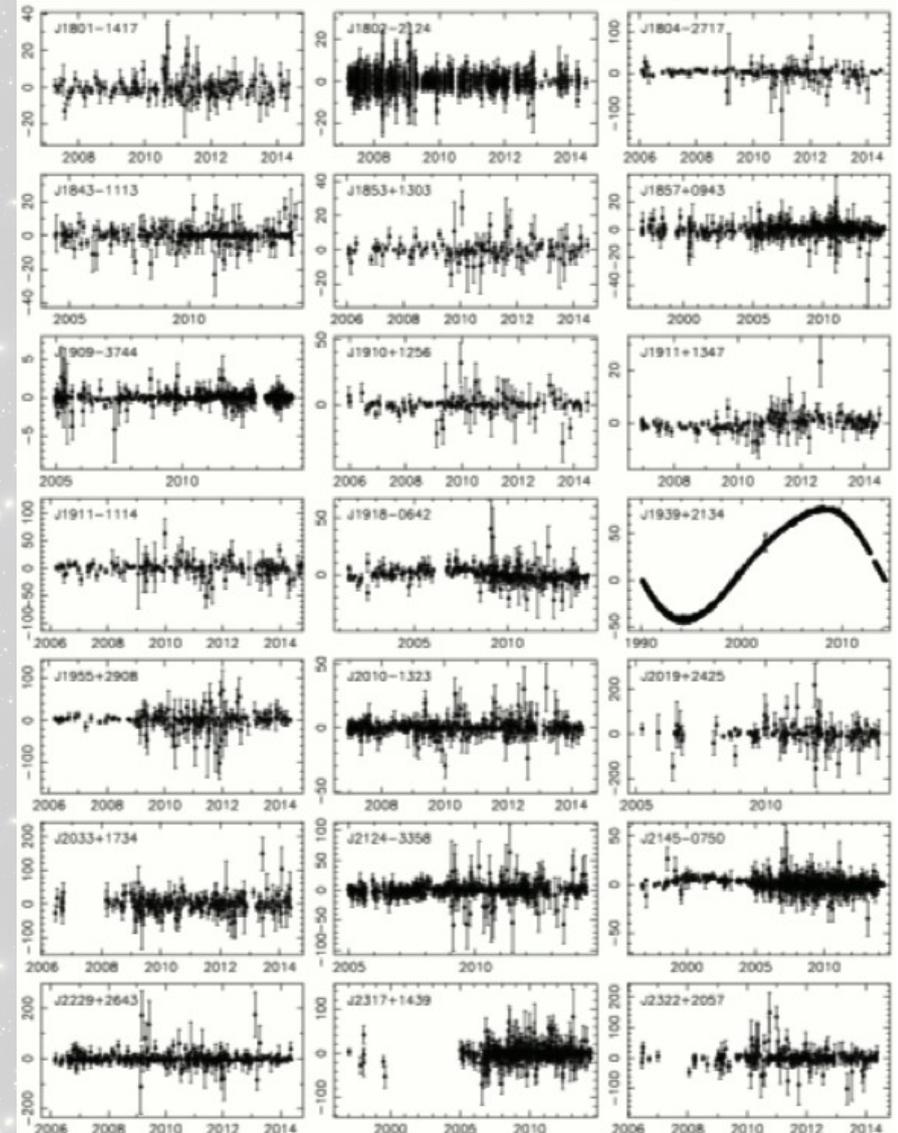
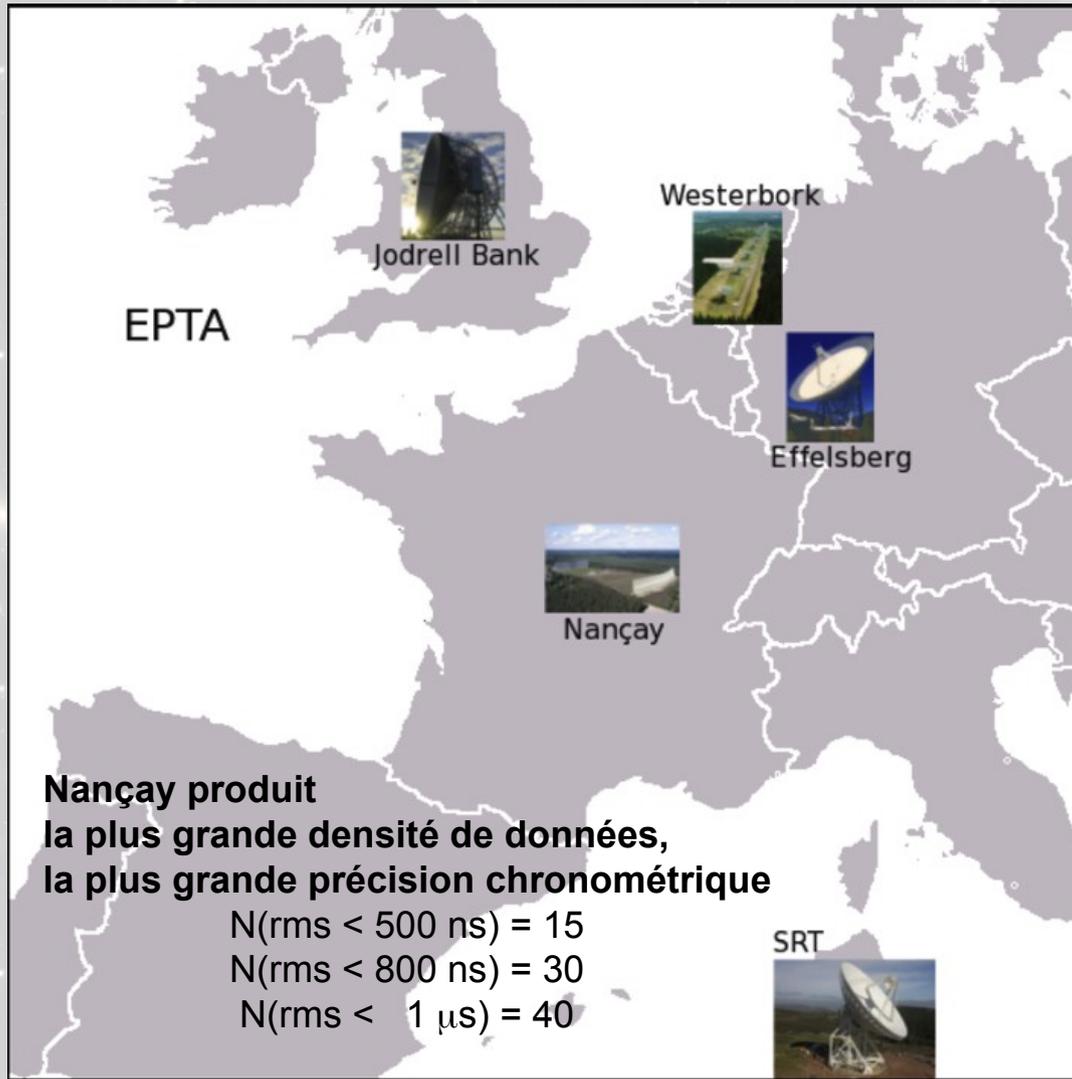
$$\Gamma(\theta_{mn}) = \frac{3}{8} \left[ 1 + \frac{\cos \theta_{mn}}{3} + 4(1 - \cos \theta_{mn}) \ln \left( \sin \frac{\theta_{mn}}{2} \right) \right] (1 + \delta_{mn})$$



**On recherche un signal corrélé !!!**

Augmenter le nb de TOAs et la densité des mesures, multiplier les bandes de fréquence

# Le réseau de chronométrie Européen



**EPTA - paper I**

**Desvignes et al 2015**  
Les données

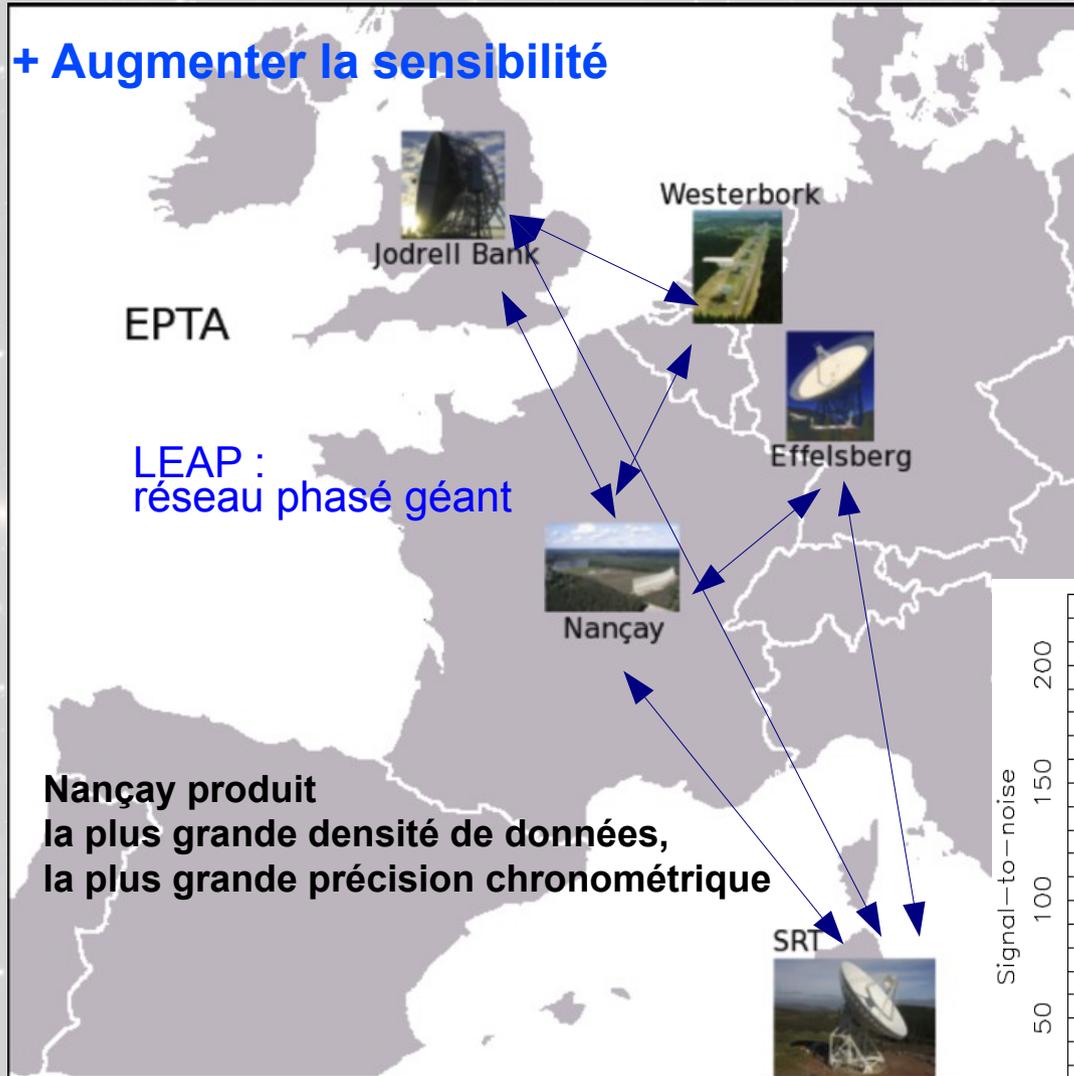
+

De nouvelles distances, mouvements propres, paramètres orbitaux, etc...

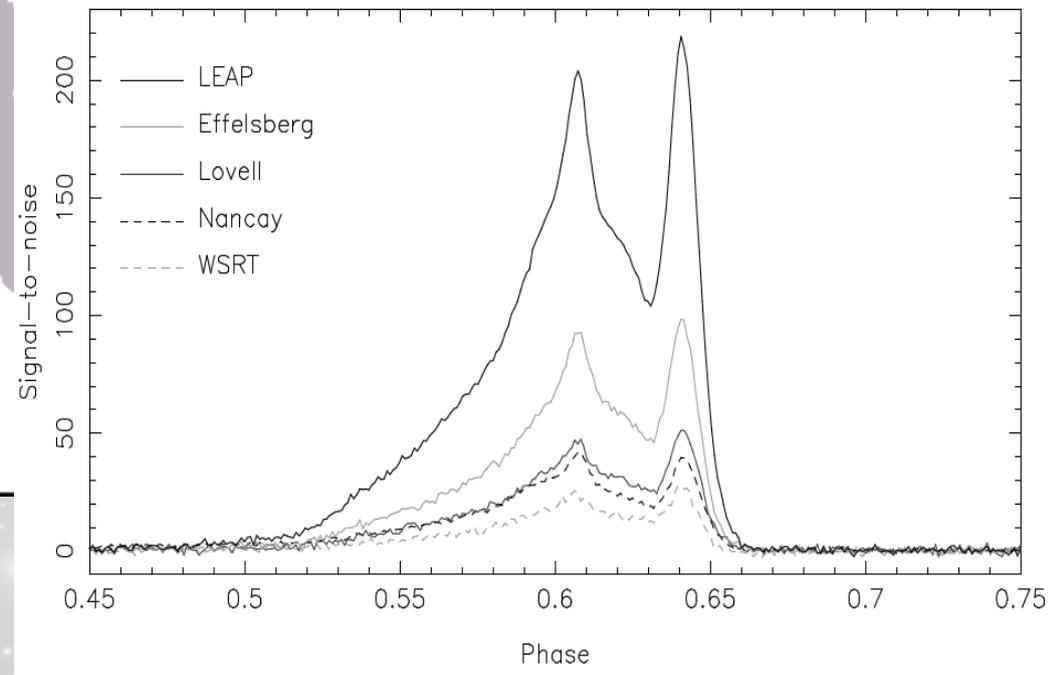
**Les données EPTA**  
**42 pulsars / 4 radiotélescopes**  
**48 % Nançay**

Augmenter le nb de TOAs et la densité des mesures, multiplier les bandes de fréquence

# Le réseau de chronométrie Européen



**EPTA/LEAP**  
**Bassa et al 2016 (submitted)**  
Pipeline et premiers résultats



# **Analyses de bruits**

## **Bruits blancs (i.e. non corrélé)**

intrinsèque, 'pulse jitter' (Lentati et al in prep)

Instrumental (IPTA paper I, submitted)

## **Bruits rouges (i.e. corrélé)**

Variations de la mesure de dispersion - DM (paper II)

bruit de rotation – TM (paper III)

Variations d'horloges (IPTA in prep)

Ephémérides du Système Solaire (IPTA in prep)

Mouvement Galactique du Soleil

Signature ondes gravitationnelles (Papers IV-V-VI)  
(Lassus et al in prep)

# Analyses de bruits

## **Bruits blancs (i.e. non corrélé)**

intrinsèque, 'pulse jitter' (Lentati et al in prep)

Instrumental (IPTA paper I, submitted)

## **Bruits rouges (i.e. corrélé)**

Variations de la mesure de dispersion - DM (paper II)

## **bruit de rotation – TM (paper III)**

Variations d'horloges (IPTA in prep)

Ephémérides du Système Solaire (IPTA in prep)

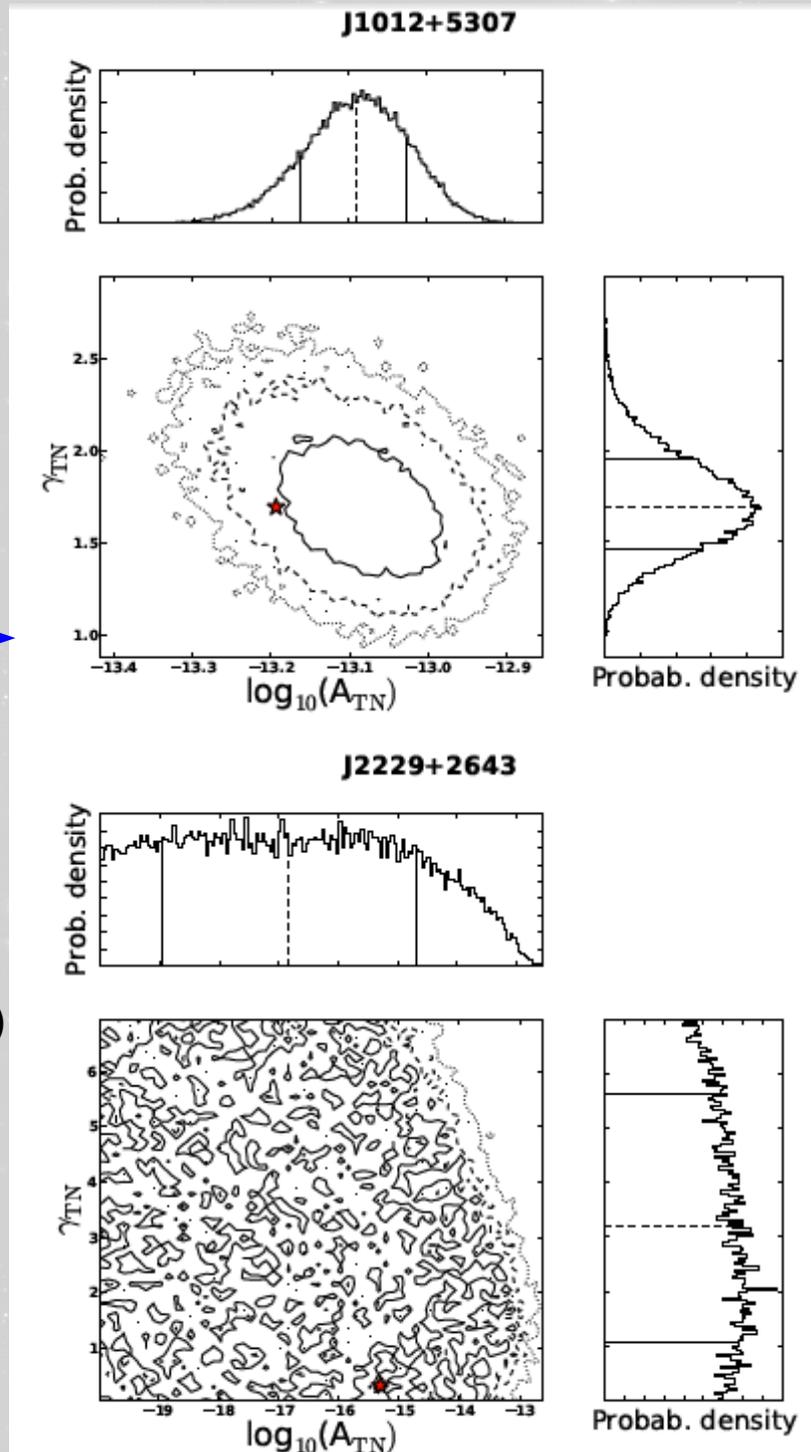
Mouvement Galactique du Soleil

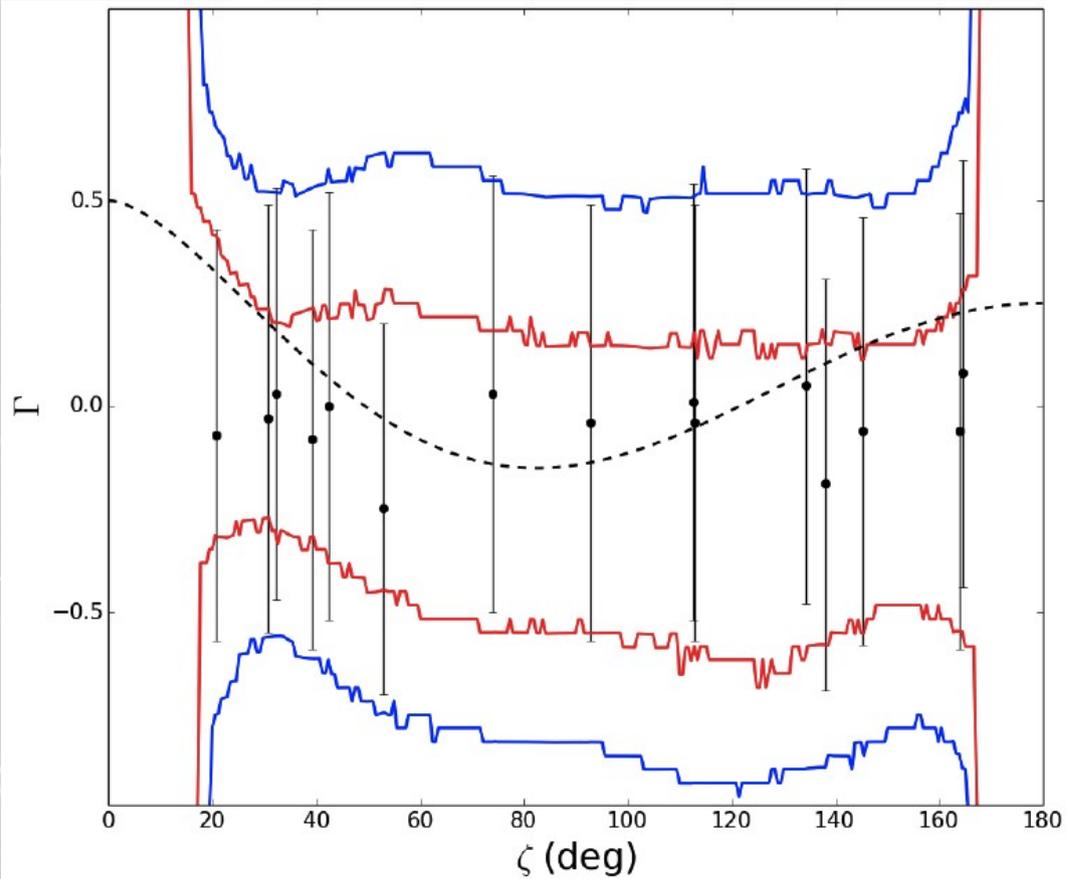
Signature ondes gravitationnelles (Papers IV-V-VI)  
(Lassus et al in prep)

**EPTA-paper III**

**Caballero et al 2015**

**Caractérisation des bruits**





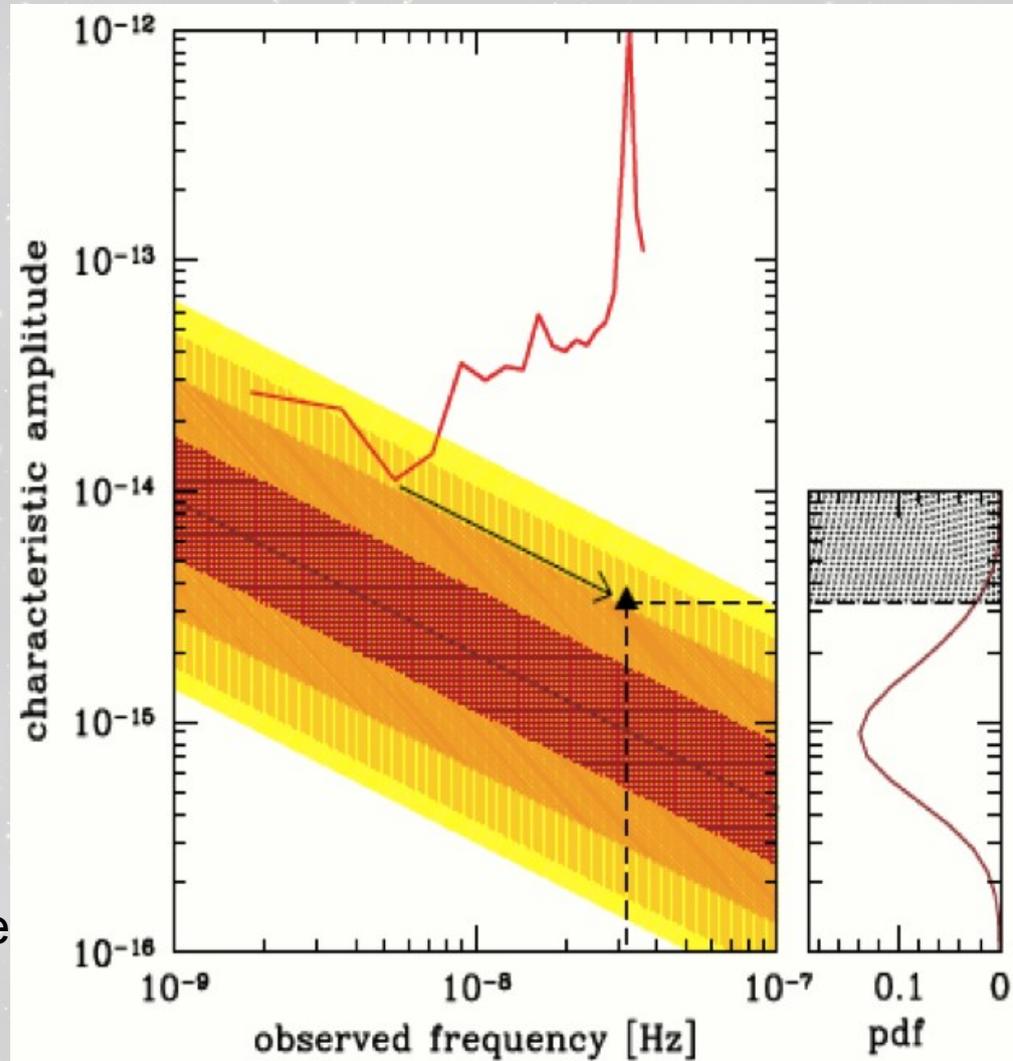
Courbe de corrélation  
de « Hellings&Downs »

→ pas de détection

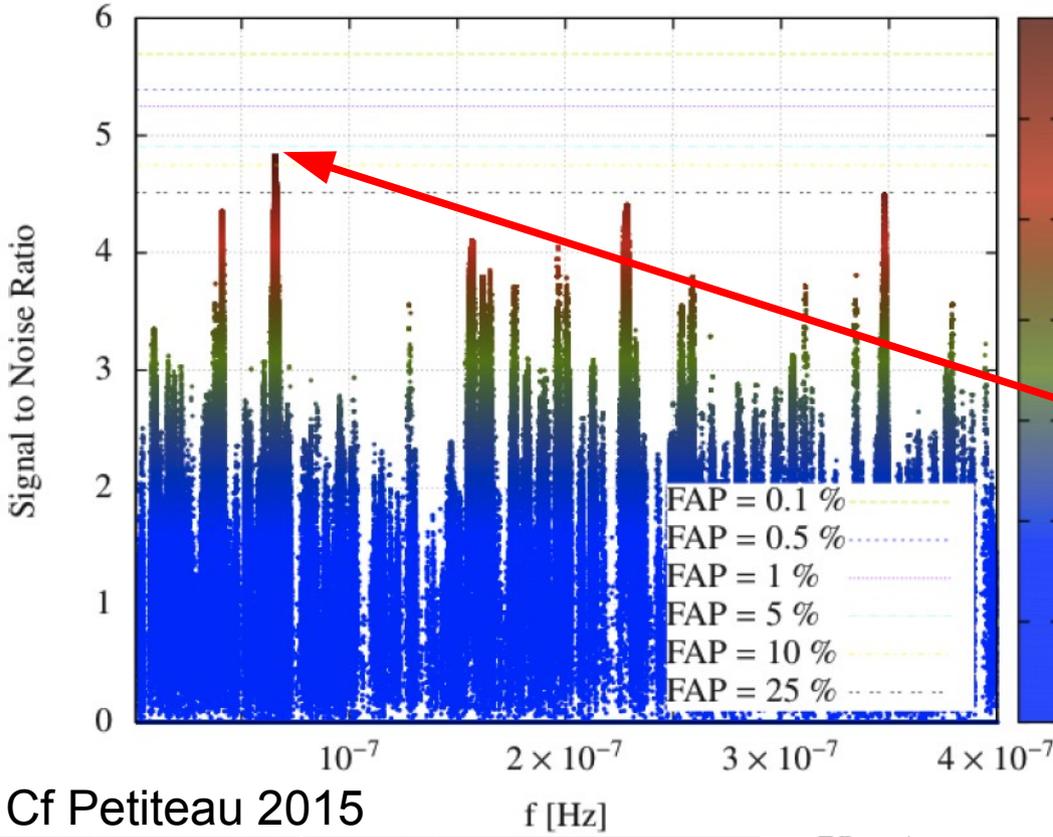
Compilation de modèles  
de population de SMBHB  
+  
Limite à 95% de confiance

**EPTA - paper IV**  
**Lentati et al 2015**  
Limite sur un fond  
stochastique isotrope

$$A_{\text{lim}} \sim 3 \cdot 10^{-15} \text{ pour } f = 1 \text{ yr}^{-1}$$



**+ EPTA-paper V**  
**Taylor et al 2015**  
Les données permettent  
de caractériser un fond  
d'ondes anisotrope



EPTA - paper VI

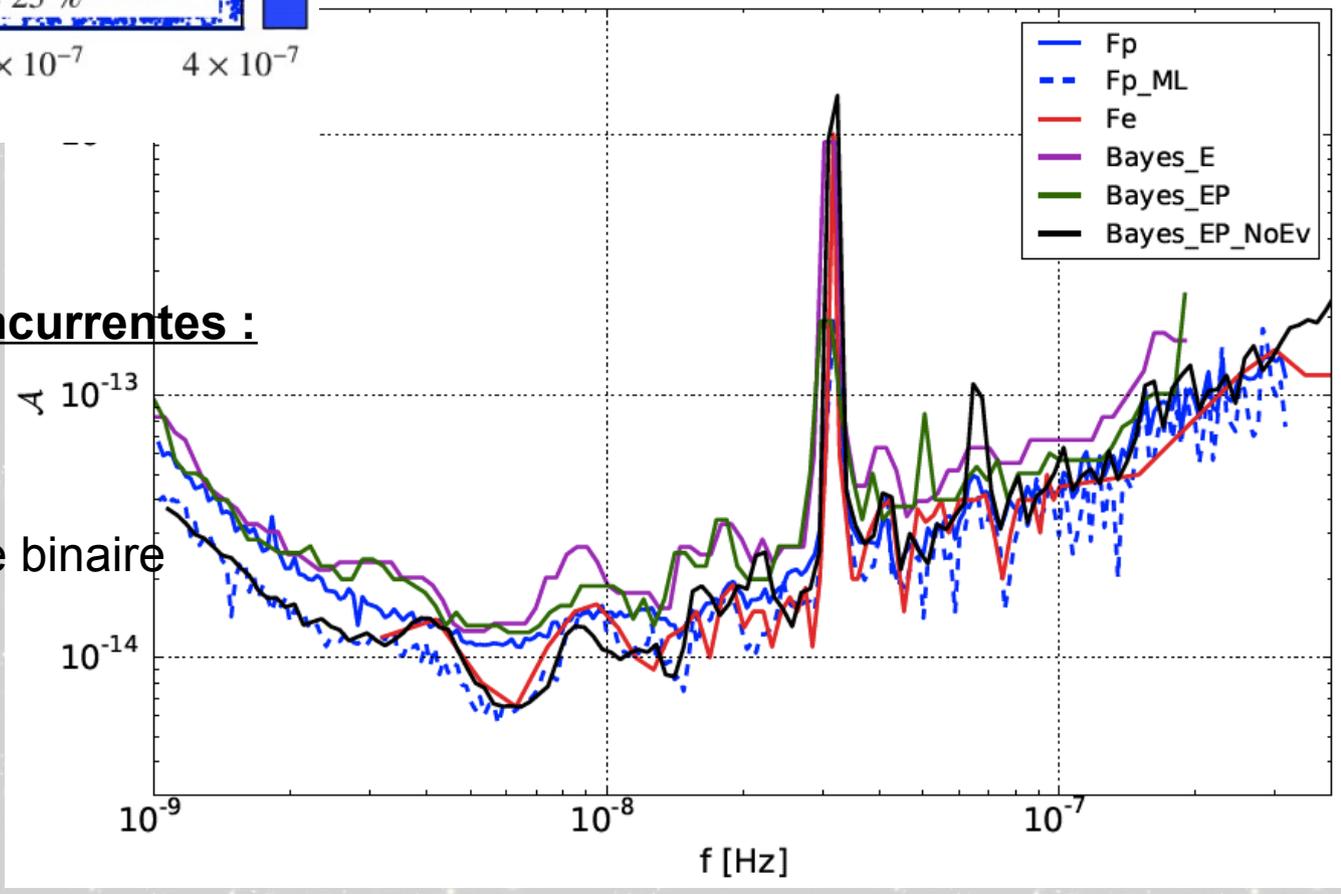
Babak et al 2015

Recherche de sources individuelles

Meilleur candidat : SNR=4.8 ; FAP = 8%

Méthode « Frequentist »  
terme Terre uniquement

Cf Petiteau 2015

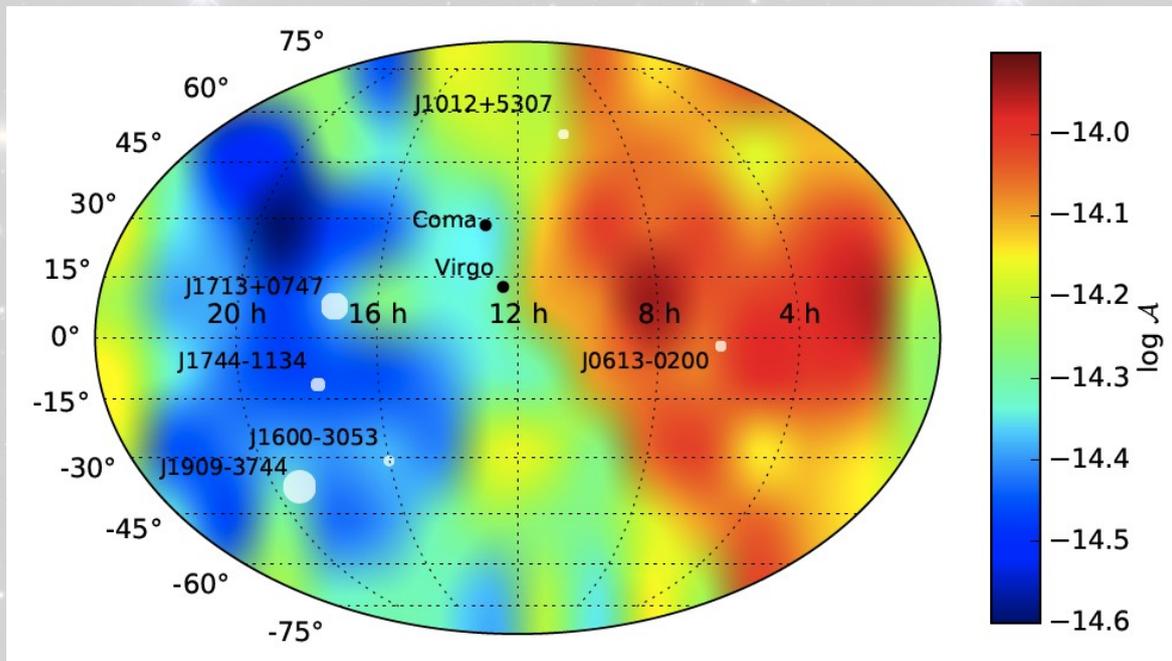


**Présentation de 6 méthodes concurrentes :**

Avec et sans estimation du bruit

Avec et sans évolution du système binaire

« Frequentist » vs « Bayesian »

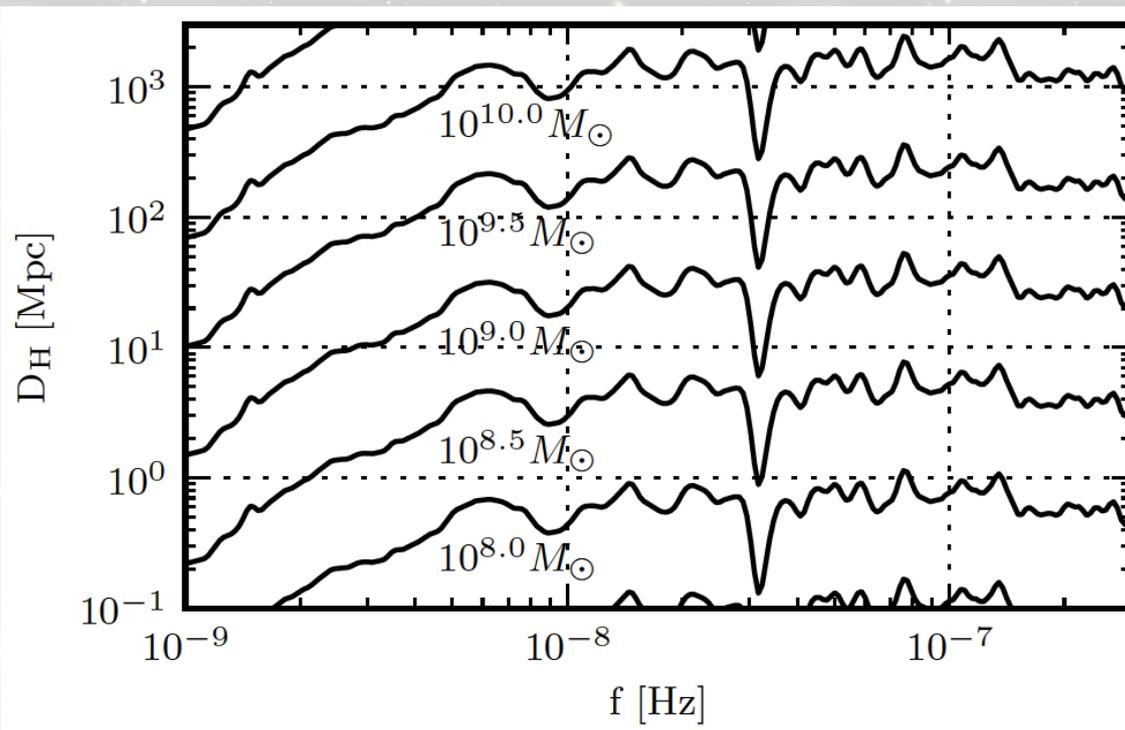


EPTA - paper VI

Babak et al 2015

Recherche de sources individuelles

La sensibilité du réseau de pulsar dépend de la position sur la sphère céleste  
 → **cartes de sensibilité**



Les modèles astrophysiques courants prédisent **une probabilité de détection de 1%** avec la **sensibilité actuelle de l'EPTA**

**On peut exclure la présence d'un SMBHB avec une « chirp mass »**

de  $M_c > 10^9 M_\odot$  jusqu'à 25Mpc

de  $M_c > 3 \cdot 10^9 M_\odot$  jusqu'à 200 Mpc

# CONCLUSIONS

## Affiner les observations :

- Trouver de nouveaux pulsars stables → déjà quelques très bons candidats Fermi
- Généraliser le suivi multi-fréquence (soutien de LOFAR?) pour les variations de DM
- Monitoring de la scintillation : spectres secondaires ?
- Développer de plus grandes largeurs de bande ↔ 2D-template matching
- Utiliser LEAP (Arrivée de FAST et SKA\_1)

## Affiner les méthodes d'analyse :

- Séparer bruit instrumental et bruit intrinsèque → collaboration F.Vernotte (Besançon)
- Construire des protocoles de détections robustes → « paper VII » en cours
- Méthodes « sources multiples » et « sources excentriques »
- Méthodes bayésiennes « non-paramétrées »

## Affiner les modèles astrophysiques :

- l'influence de l'environnement
- « the last parsec problem »