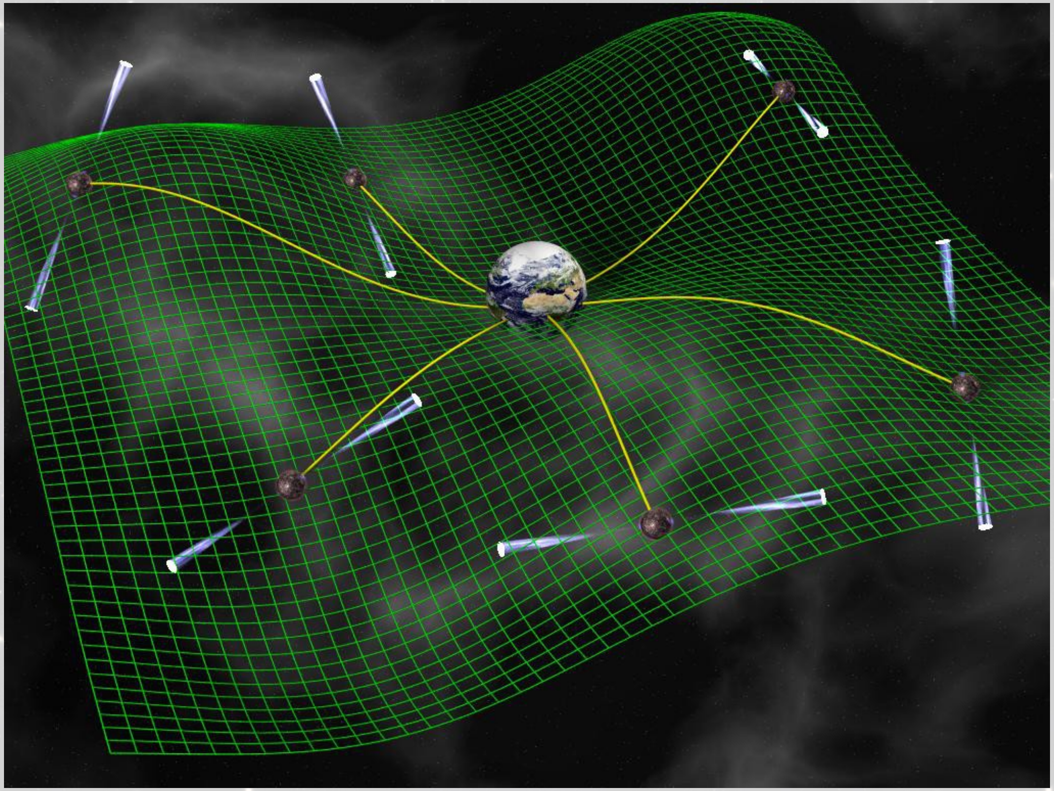
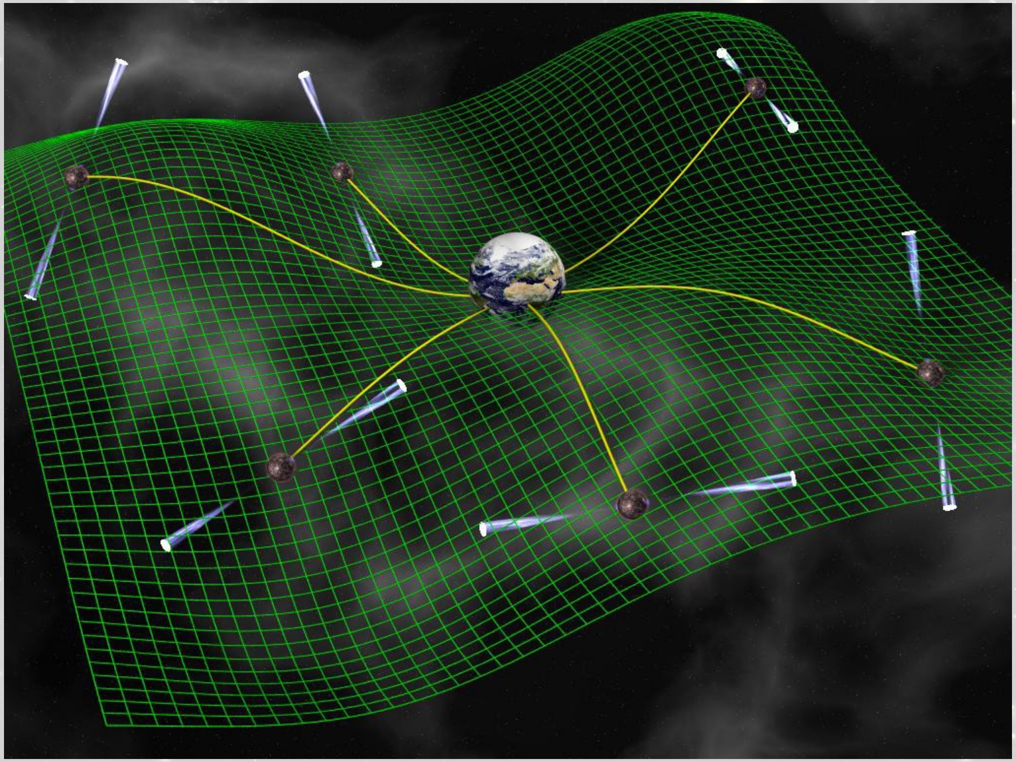
Réseaux de pulsars
(Pulsar Timing Arrays – PTA)

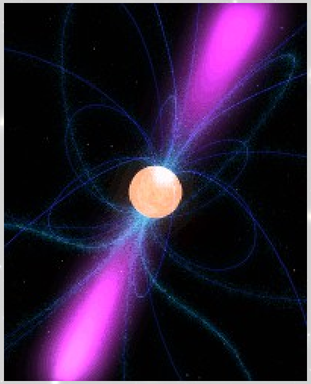


Journées SFP, Novembre 2017, Paris

G.Theureau
LPC2E (Orléans) et Observatoire de Paris

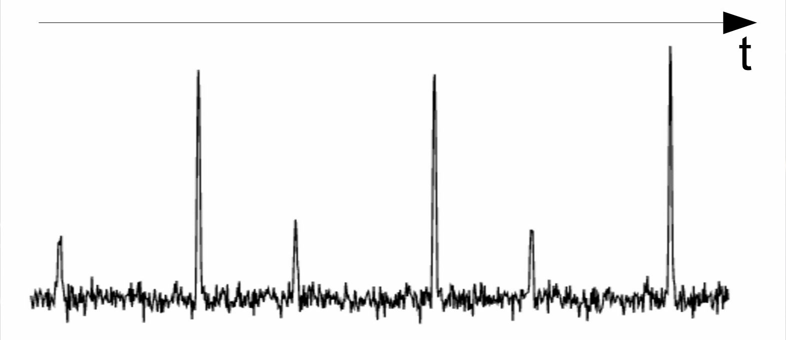
Pulsar Timing Arrays : principes





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

Un pulsar <u>milliseconde</u> 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*

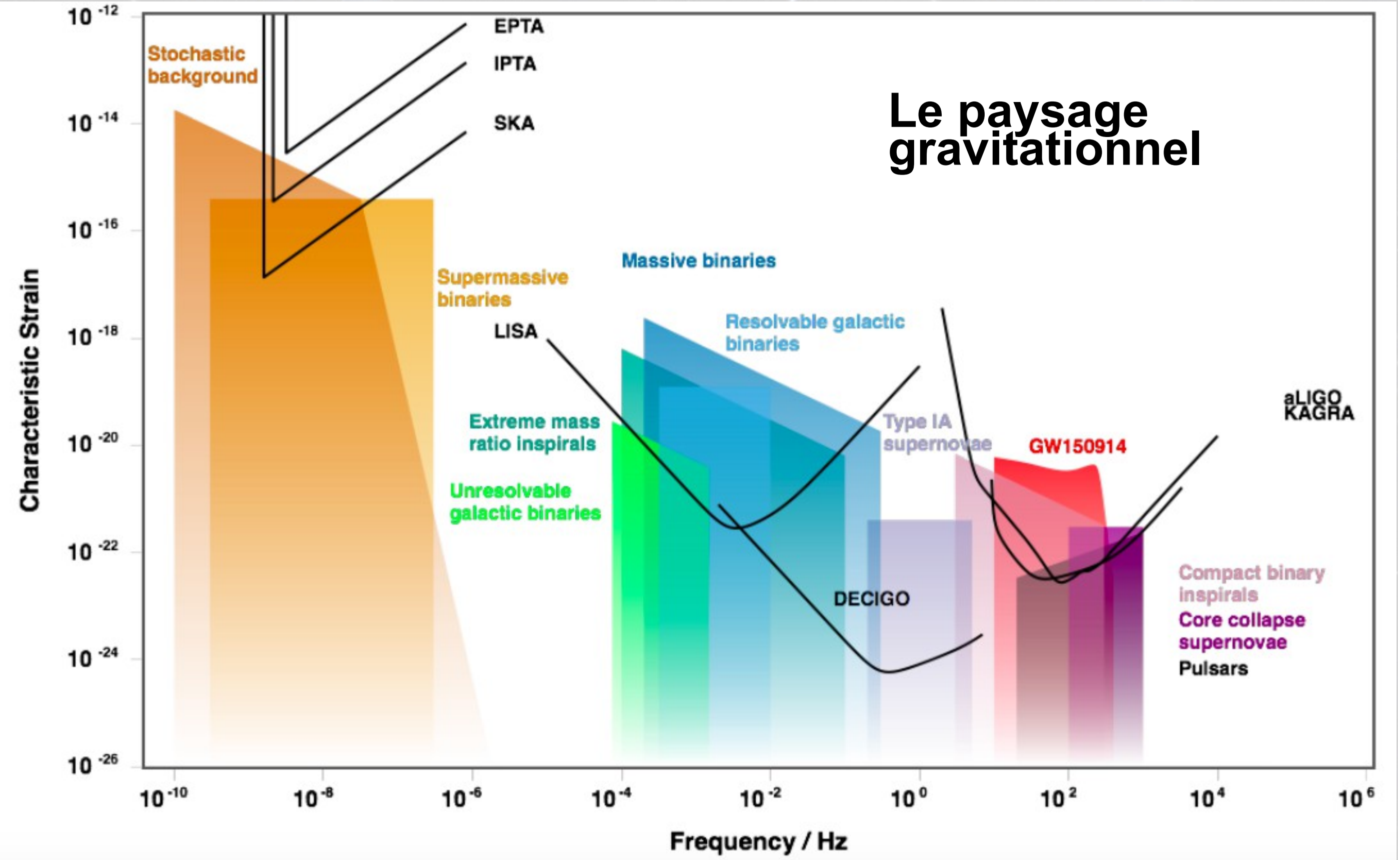
Avec une incertitude dt (~100 ns) et une période d'observation T (~20 ans)
→ on est sensible à une *amplitude ~ dt/T et des fréquences de l'ordre de f ~ 1/T*

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**



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

(Sesana 2015)

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

Les modèles de population de trous noirs binaires super-massifs

Formation de la binaire

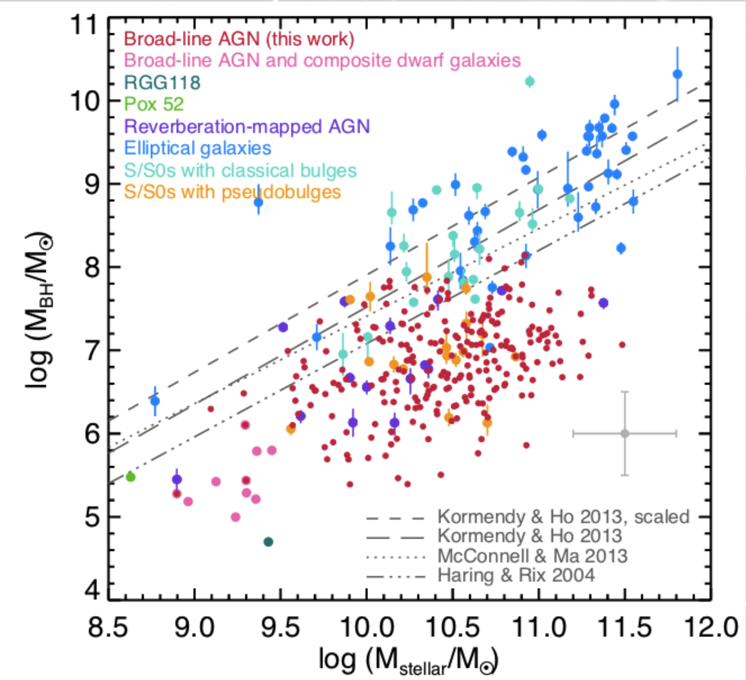
monochromatique

spiralante

fusion

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

Reines & Volonteri (2015)

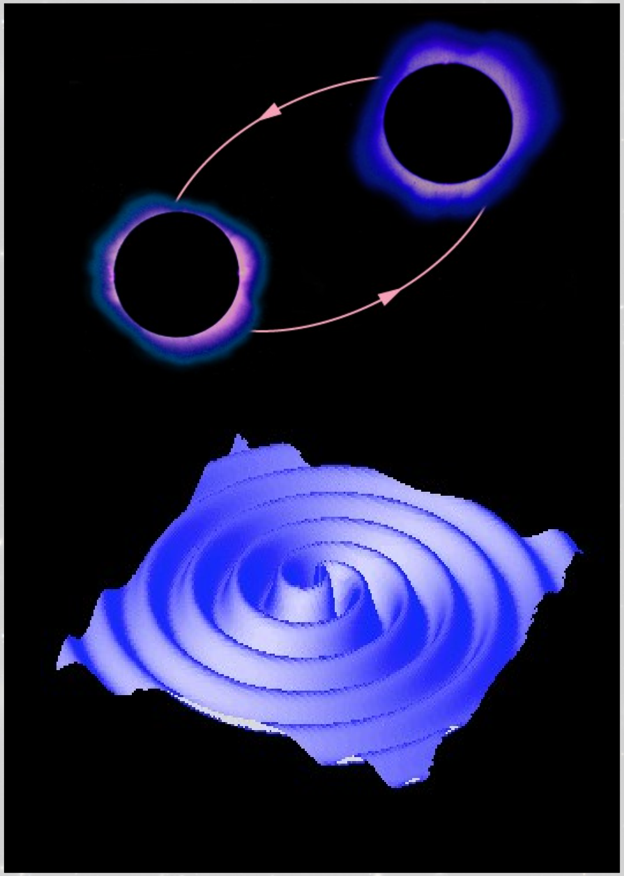


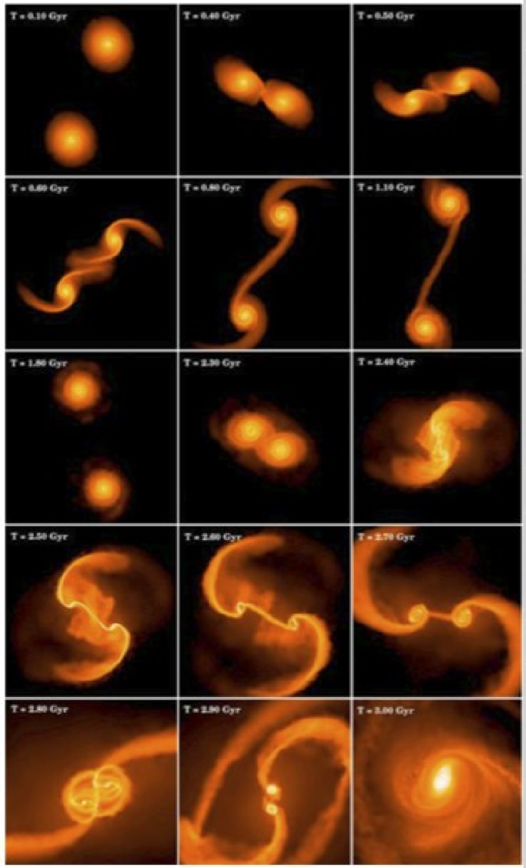
4) Lien entre BH et galaxie hôte

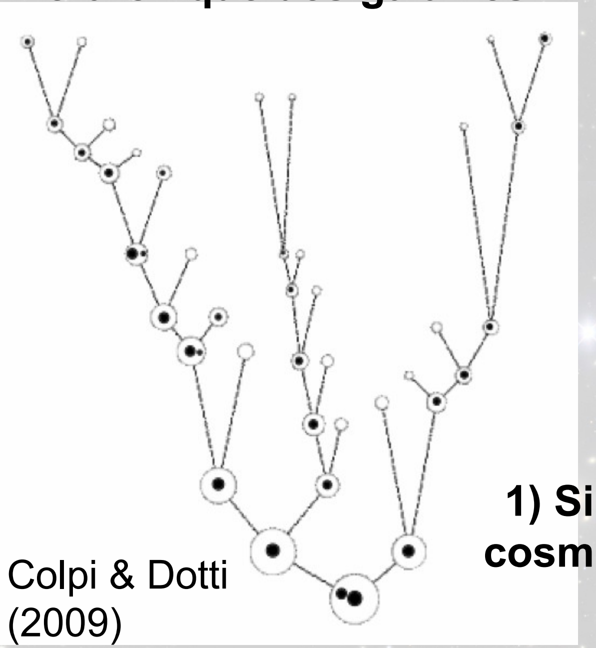
3) Modèles de formation de BH

2) Scénario de formation hiérarchique des galaxies

1) Simulations cosmologiques ΛCDM

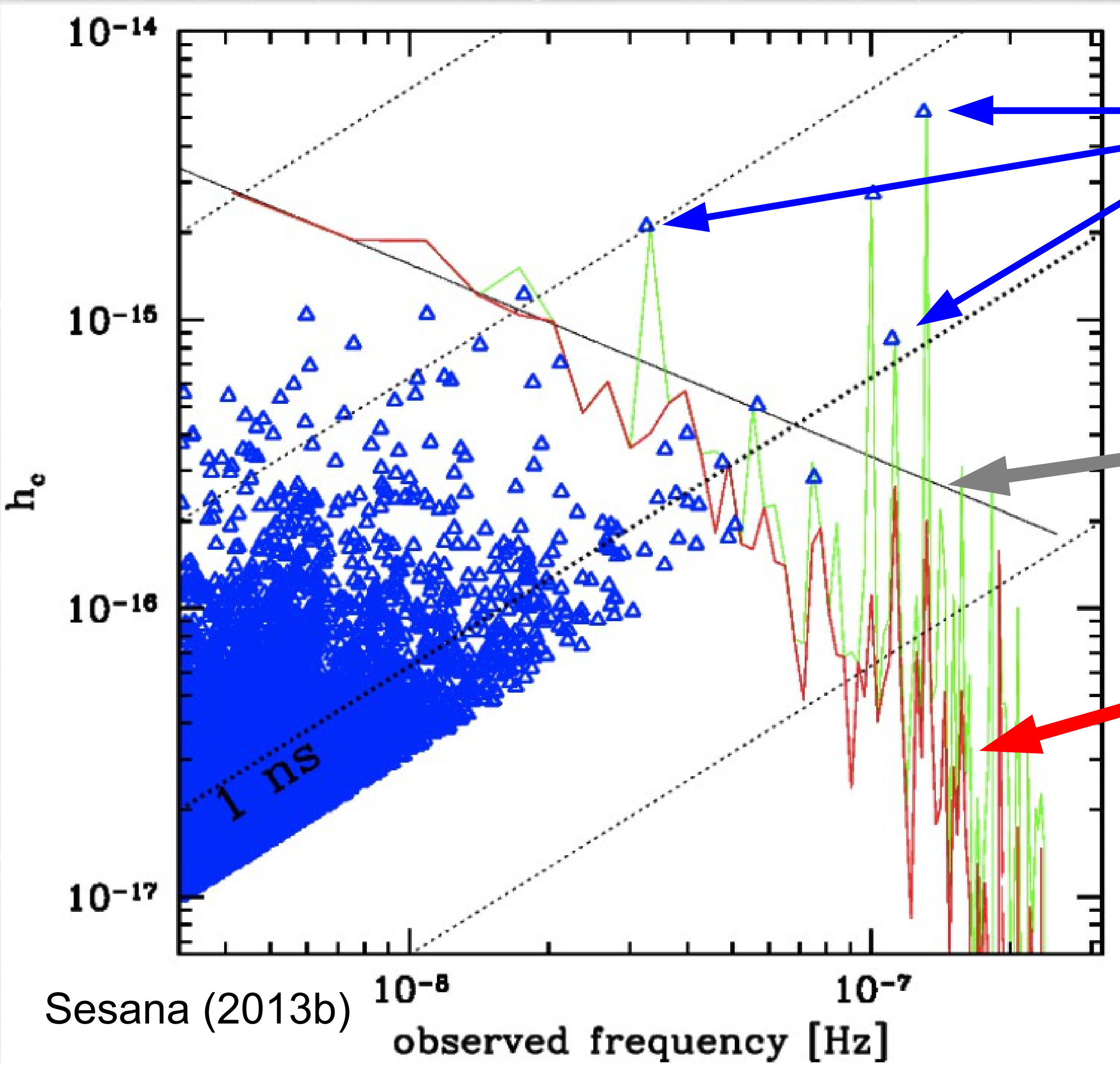






Colpi & Dotti (2009)

Population SMBBH : contribution du fond & sources individuelles



Sesana (2013b)

Sources individuelles « résolvables »

Fond stochastique en f $^{-2/3}$

Contribution des sources non résolues

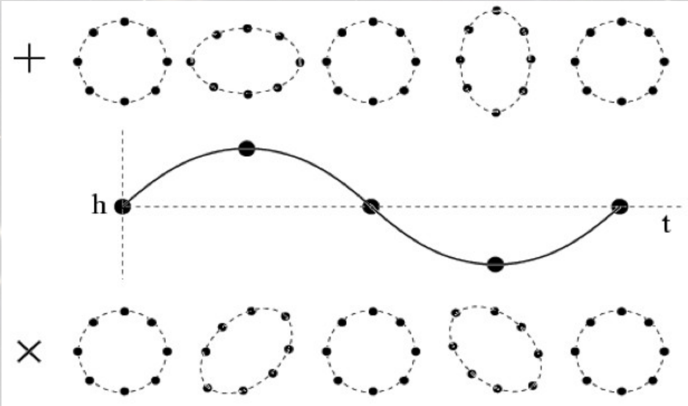
Un modèle simple de population :
- orbites circulaires
- pas d'interaction / étoiles et gaz
- tous atteignent le régime d'émission gravitationnelle

Fond stochastique en f $^{-2/3}$

$$h_c^2(f) = \int_0^\infty dz \int_0^\infty d\mathcal{M} \, \frac{d^3N}{dz\, d\mathcal{M}\, d\ln f_r} h^2(f_r) \longrightarrow h_c(f) = A\left(\frac{f}{\mathrm{yr}^{-1}}\right)^{-2/3}$$

(Phinney 2001)

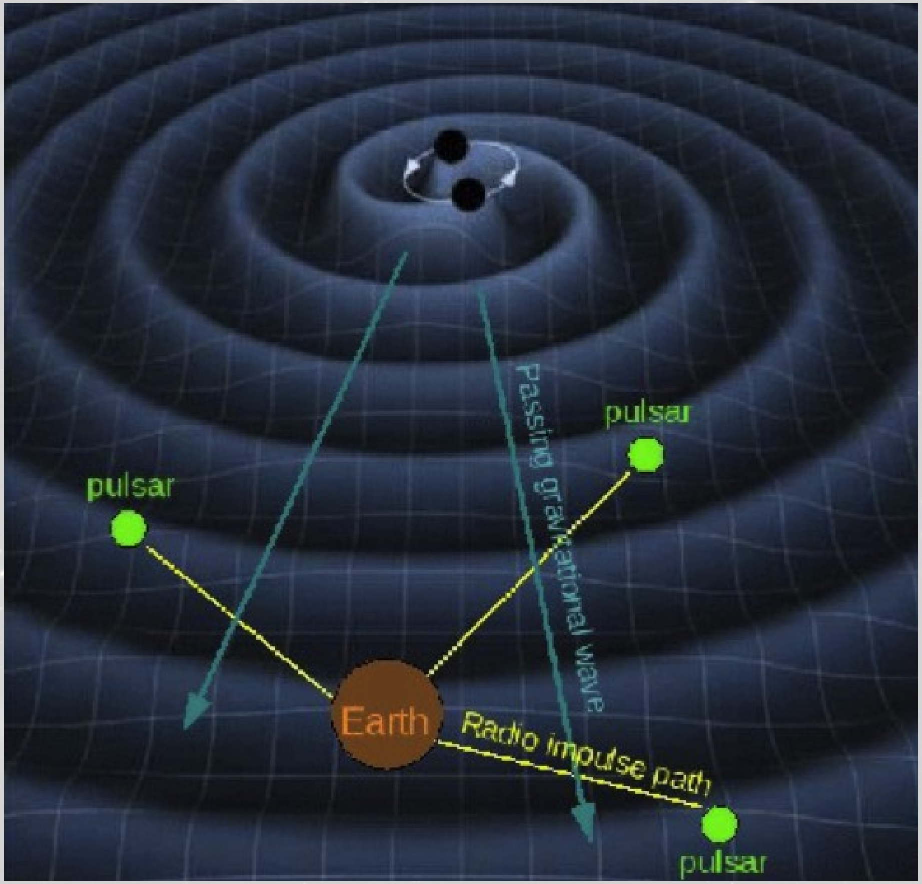
Les modèles de population de trous noirs binaires super-massifs



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

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

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

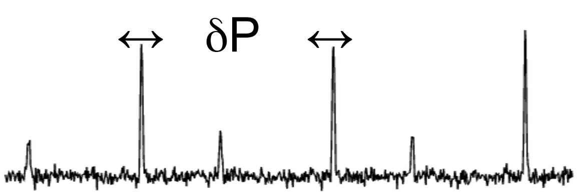


Caractérisation de l'onde gravitationnelle :
7 + 2 x $N_{pulsars}$ paramètres

α, δ	position de la source
D_L	distance à la source
i	inclinaison
f_e	fréquence de l'onde à la Terre
Φ	phase
Ψ	orientation (polarisation)
	+
f_p	fréquence de l'onde au pulsar
Φ_p	décalage de phase dans le terme pulsar

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

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

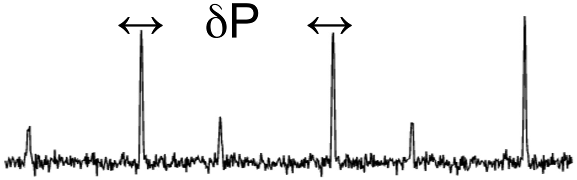


$$\frac{\delta\nu}{\nu}(t) = \frac{1}{2}\frac{\hat{n}^i\hat{n}^j}{1+\hat{n}.\hat{k}}\left(\underbrace{h_{ij}(t-L(1+\hat{k}.\hat{n}))}_{\text{Amplitude de l'onde au pulsar}} - \underbrace{h_{ij}(t)}_{\text{Amplitude de l'onde à la Terre}}\right)$$

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

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

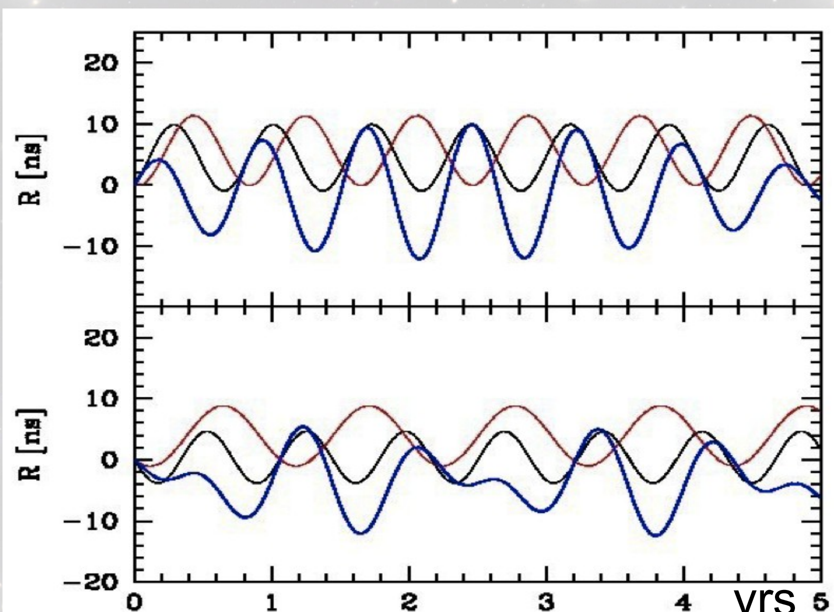
$$r(t) = \int_0^t \frac{\delta\nu}{\nu}(t')dt'$$



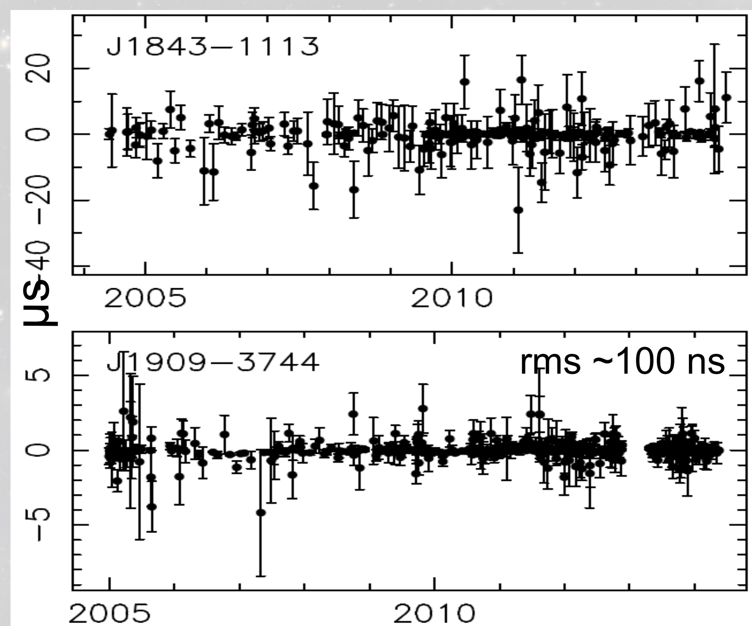
$$\frac{\delta\nu}{\nu}(t) = \frac{1}{2}\frac{\hat{n}^i\hat{n}^j}{1+\hat{n}.\hat{k}}\Big(\underbrace{h_{ij}(t-L(1+\hat{k}.\hat{n}))}_{\text{Amplitude de l'onde au pulsar}} - \underbrace{h_{ij}(t)}_{\text{Amplitude de l'onde à la Terre}}\Big)$$

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

Sesana 2015



Desvignes et al 2015

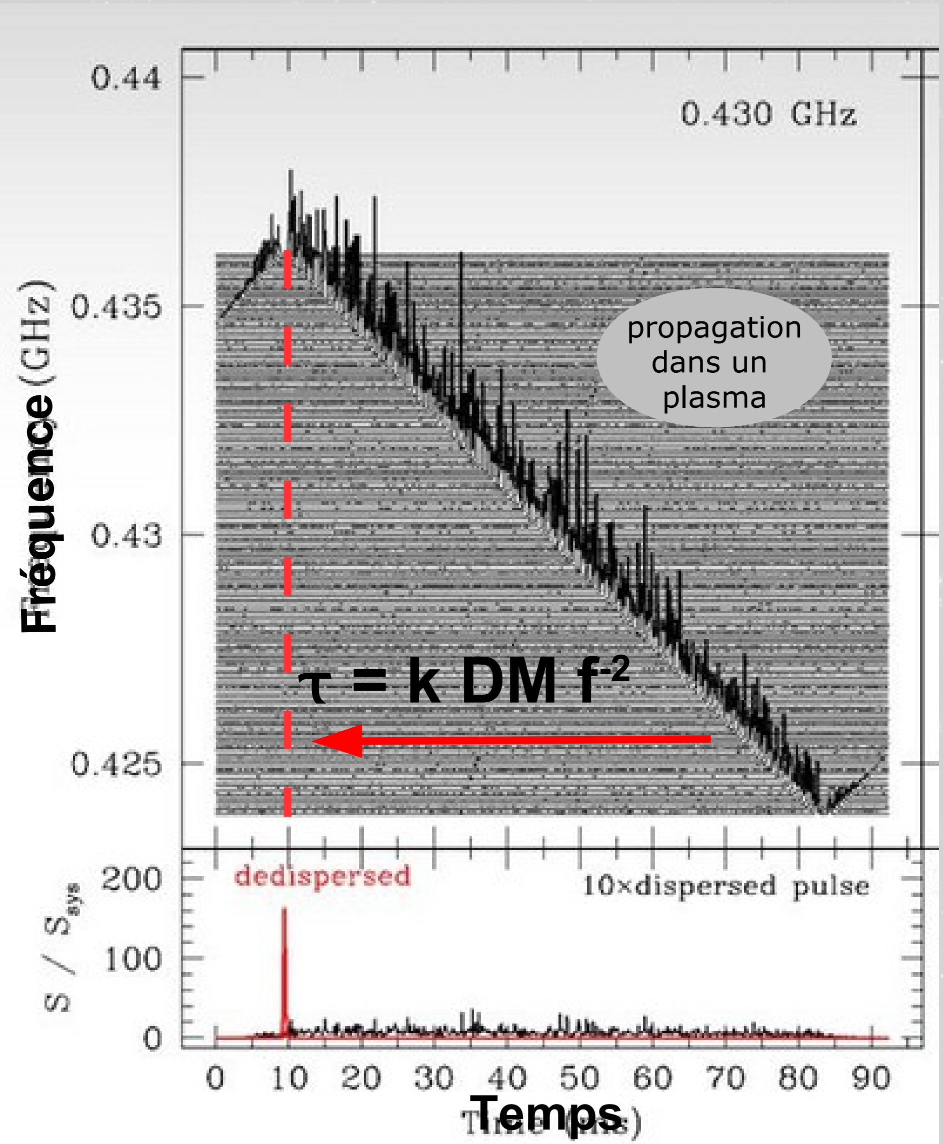


La superposition de l'ensemble des sources crée un fond stochastique avec une signature spectrale fonction de la nature de la population

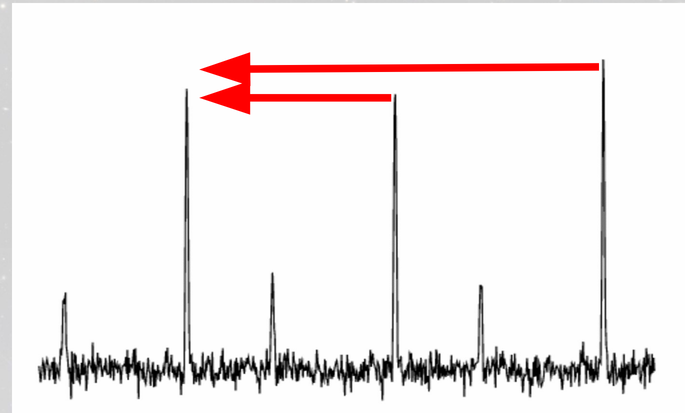
Mise en pratique : l'art de la chronométrie

I - problème de la dispersion

Les fréquences les plus basses sont “retardées”



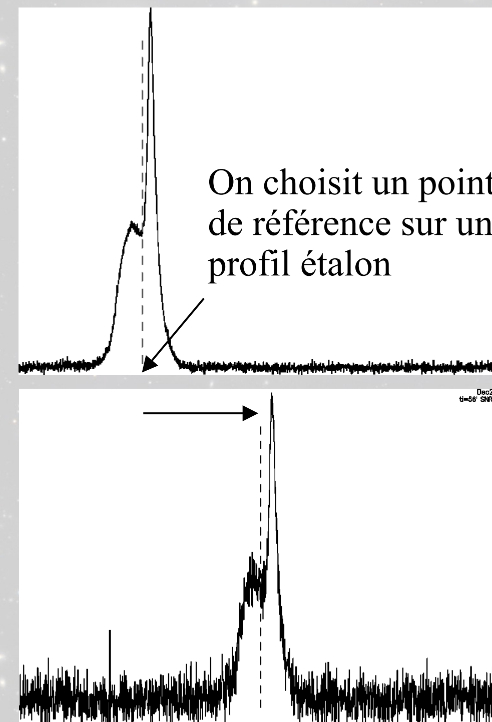
II- Empilement en phase avec la rotation



Selon un modèle :
ralentissement,
mvt orbital,
mvt propre
éph. planétaire

III – Datation
(calcul d'un temps d'arrivée)

« TOA »

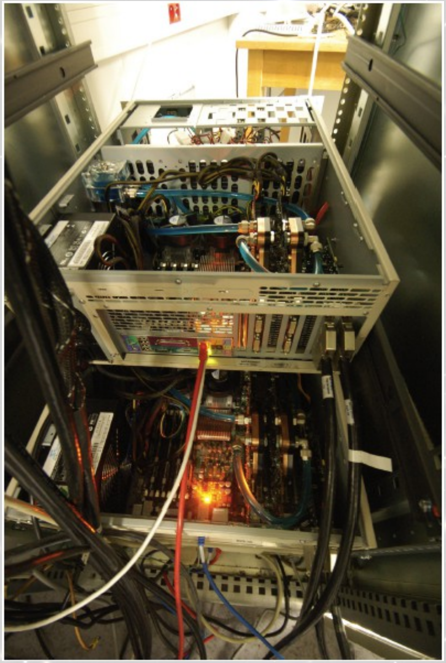


Position du premier échantillon de données, correspondant au départ de l'observation

Besoin d'une précision extrême

L'incertitude de datation peut descendre à 10-20 ns pour quelques pulsars

$$\sigma_{\mathrm{TOA}} \propto \frac{w}{S_{\mathrm{PSR}}} \frac{T_{\mathrm{sys}}}{A} \frac{1}{\sqrt{BT}}$$

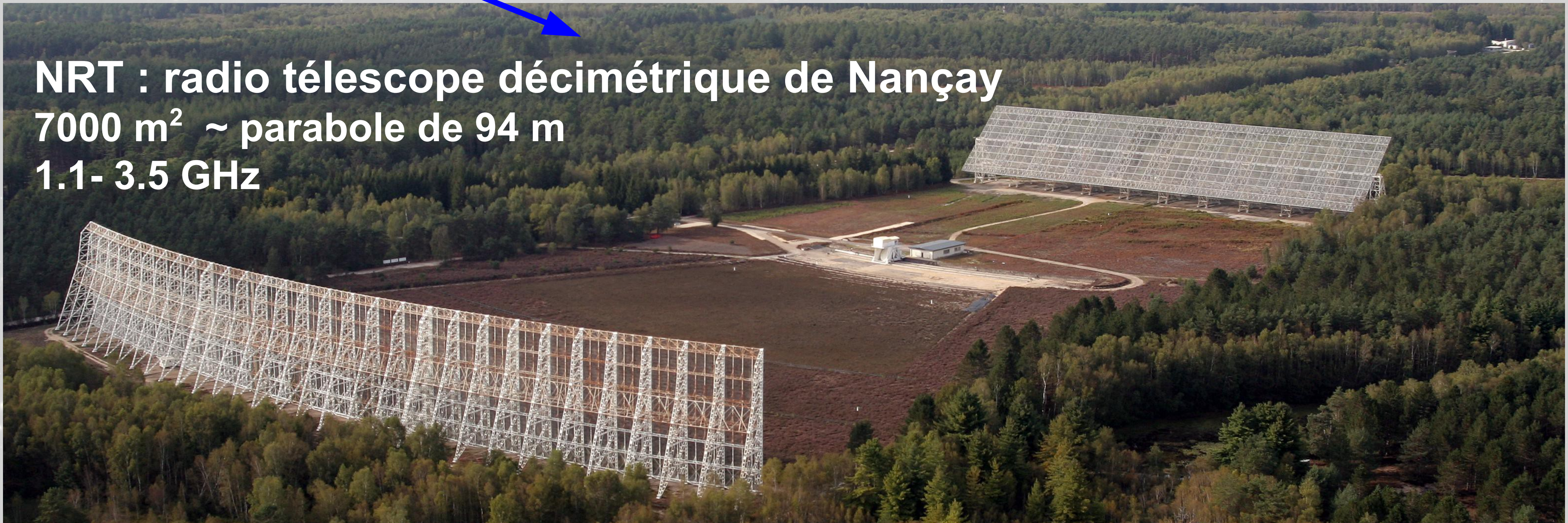


Des flux faibles ~mJy (1 Jy = 10^{-26} W/m^2)

→ besoin d'une large bande passante

Instrumentation actuelle :
dédispersion cohérente sur 512 MHz
4 PCs / 8 GPUs (un flux de 16 Gb / s)

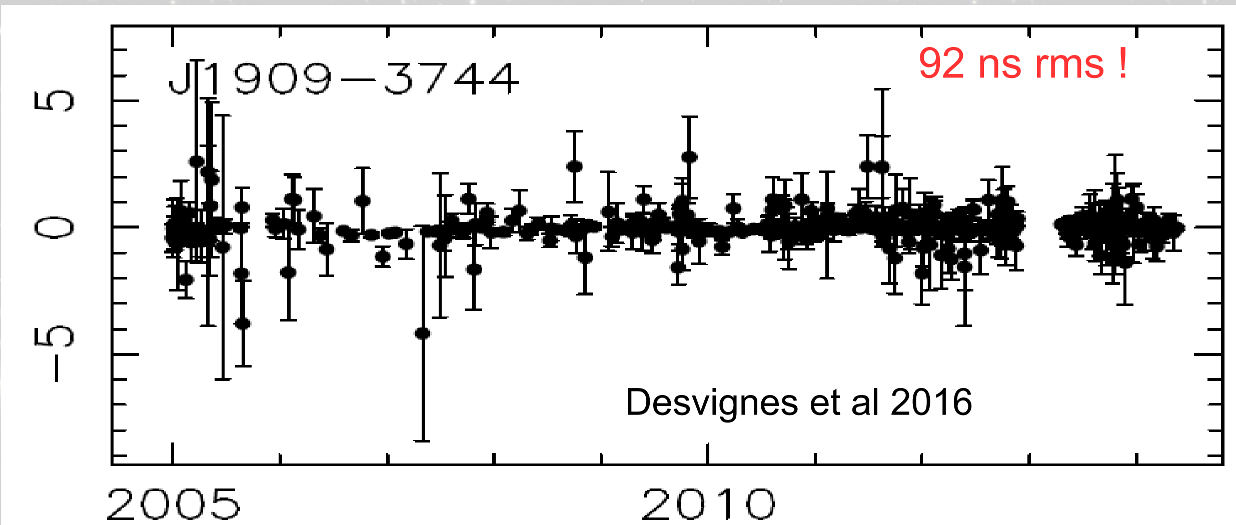
→ besoin d'un grand radiotélescope



Besoin d'une précision extrême

L'incertitude de datation peut descendre à 10-20 ns pour quelques pulsars

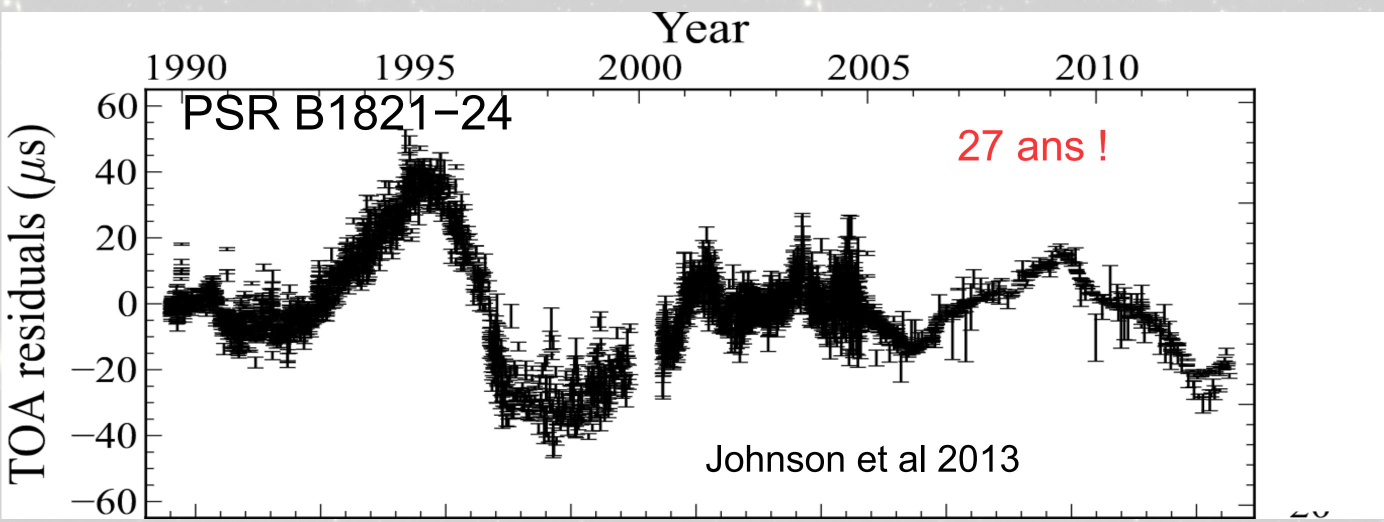
Deux exemples :



Le pulsar le plus stable et le plus précis (92 ns sur 12 ans)

$dt/T \sim 2.7\ 10^{-16}$

= sensibilité



La plus longue série temporelle (27 ans)

$1/T \sim 1.2\ 10^{-9}\ Hz$

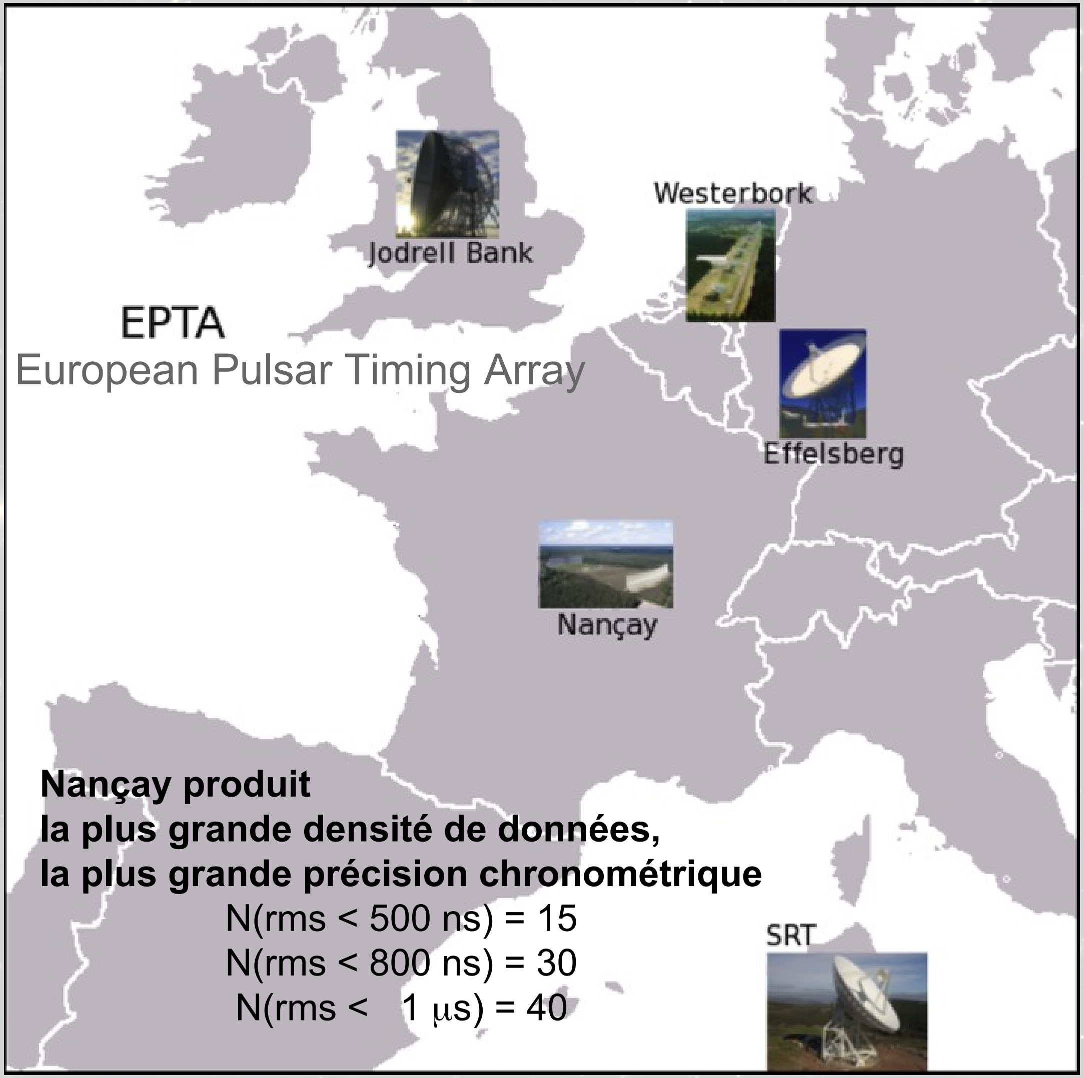
Récurrence de 2 obs/sem

$1/T \sim 3.8\ 10^{-6}\ Hz$

= bande de fréquence accessible

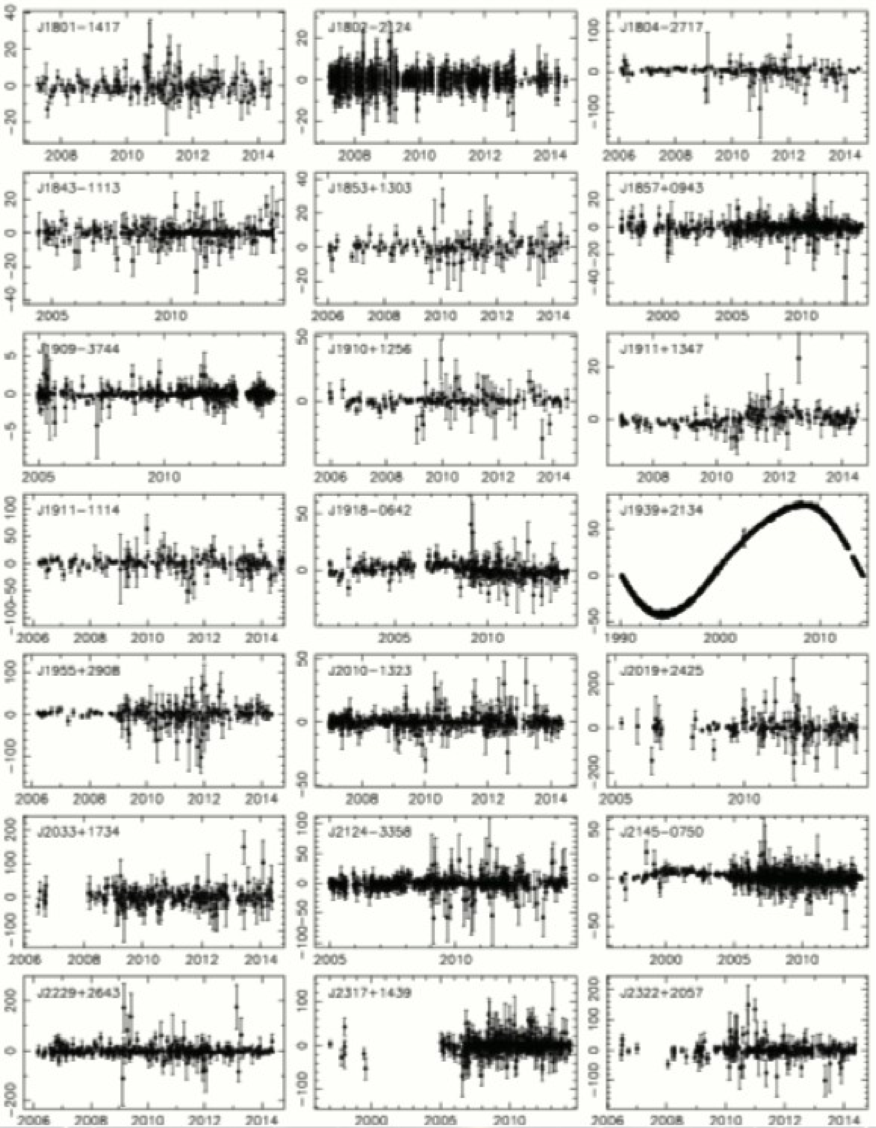
Augmenter le nb de TOAs et la densité des mesures, multiplier les bandes de fréquence

Le réseau de chronométrie Européen



Nançay produit
la plus grande densité de données,
la plus grande précision chronométrique

N(rms < 500 ns) = 15
N(rms < 800 ns) = 30
N(rms < 1 μs) = 40



Les données EPTA
42 pulsars / 4 radiotélescopes
61 % Nançay

EPTA - paper I

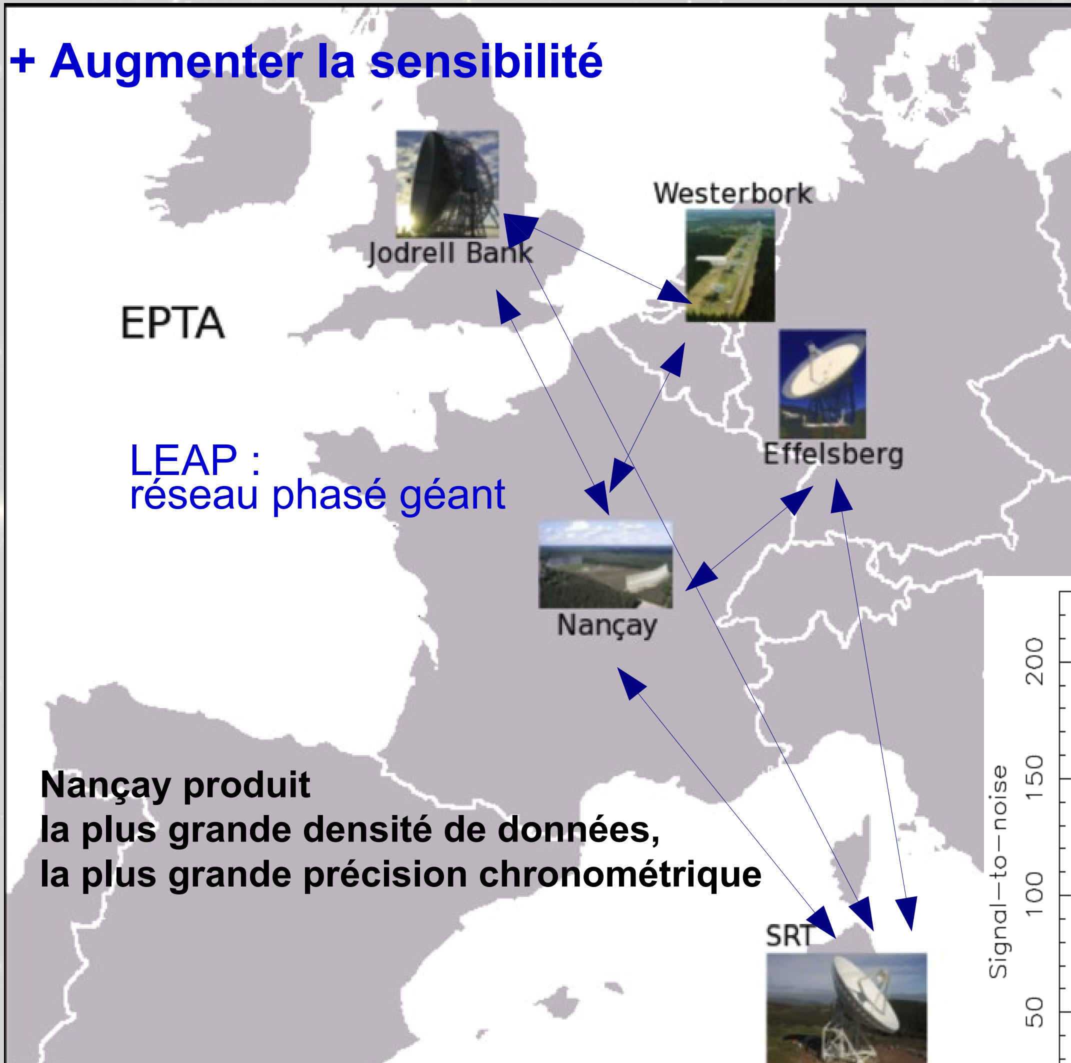
Desvignes et al 2015
Les données

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

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

Le réseau de chronométrie Européen

+ Augmenter la sensibilité



LEAP :
réseau phasé géant

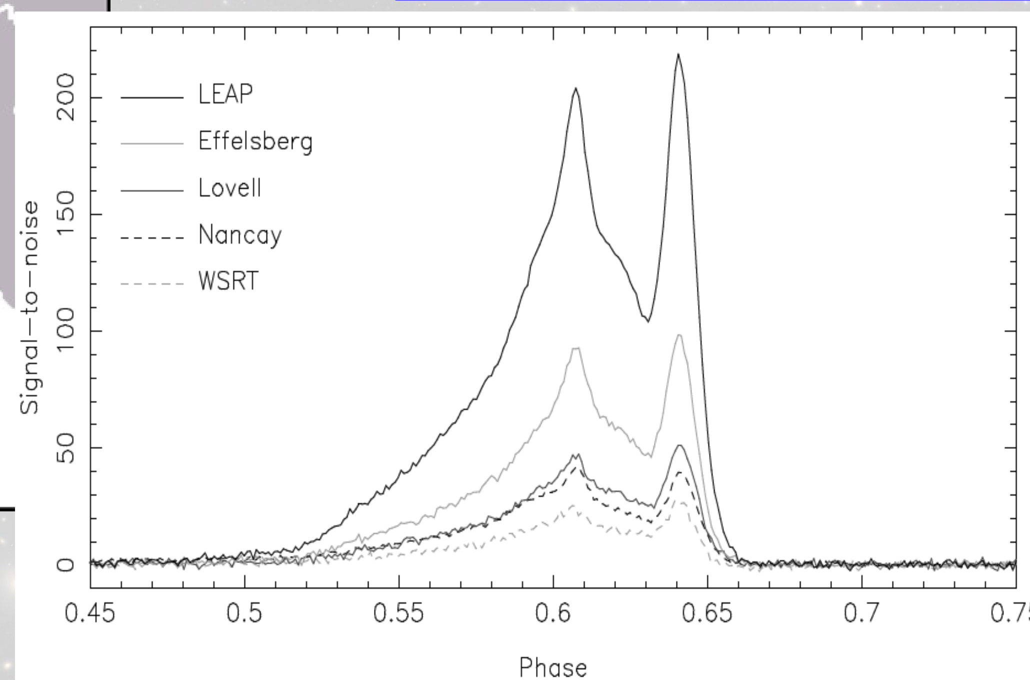
Nançay produit
la plus grande densité de données,
la plus grande précision chronométrique

Somme cohérente en forme d'onde
des séries temporelles issues
des 5 radiotélescopes

EPTA/LEAP

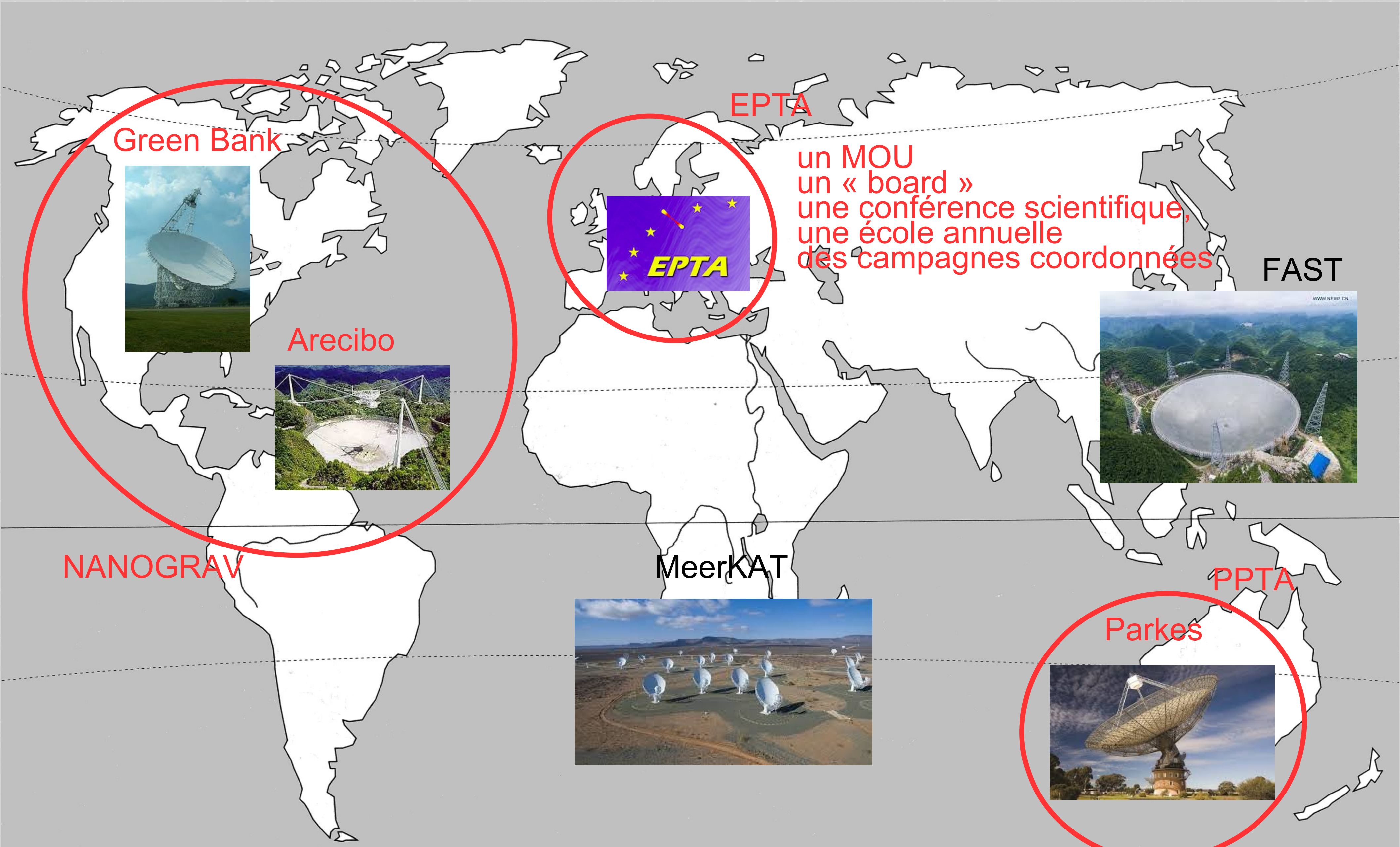
Bassa et al 2016

Pipeline et premiers résultats



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

La collaboration IPTA



Analyse des avants plans = caractérisation des bruits

<u>Bruits blancs (bruit non-corrélé)</u>

Instrumental → radiometer Eq., mesures multi-télescopes, LEAP

Astrophysique → 'pulse jitter'

<u>Bruits rouges (bruit corrélé)</u>

Variations de la mesure de dispersion → mesures multi-fréquences

Bruit de rotation intrinsèque → perturbation d'un disque de petits corps ?
Variations de Edot ?, Séries de micro-glitches ?

Variations d'horloges → liens TAI, TT-BIPM

Ephémérides du Système Solaire → liens INPOP, JPL

Mouvement Galactique du Soleil → LSR

Signature ondes gravitationnelles → sources indiv., fond stochastique, « bursts »

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**,

$$\longrightarrow \quad C \sim \underbrace{\Gamma_{ab}\rho_i\delta_{ij}}_{\text{Onde grav.}} + \underbrace{\epsilon_i\delta_{ij}}_{\text{Clock/eph.}} + \underbrace{\eta_i\delta_{ab}\delta_{ij}}_{\text{Instr./jitter}} + \underbrace{\kappa_{ai}\delta_{ab}\delta_{ij}}_{\text{rot./disp.}}$$

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**,

$$\mathrm{C} \sim \underbrace{\Gamma_{ab}\rho_i\delta_{ij}}_{\text{Onde grav.}} + \underbrace{\epsilon_i\delta_{ij}}_{\text{Clock/eph.}} + \underbrace{\eta_i\delta_{ab}\delta_{ij}}_{\text{Instr./jitter}} + \underbrace{\kappa_{ai}\delta_{ab}\delta_{ij}}_{\text{rot./disp.}}$$

$$\boxed{\rho = h_c(f)^2/(12\pi^2 f^3 T_{\max})}$$

qui dépend à la fois de l'amplitude du signal en fonction de la position sur le ciel et du « diagramme d'antenne » :

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

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**

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

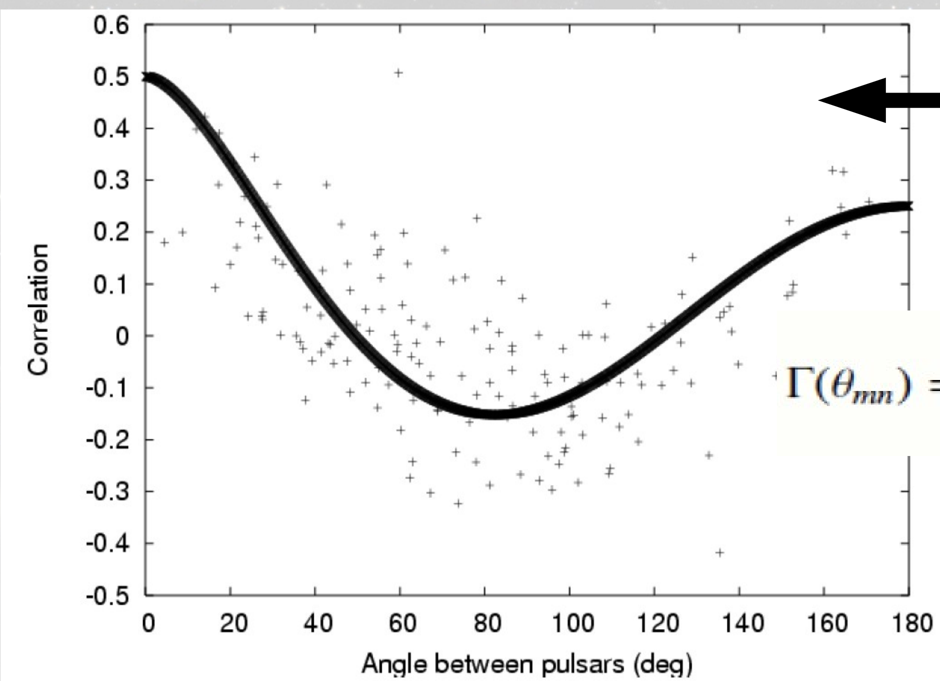
Le signal gravitationnel est contenu dans **la matrice de corrélation C**,

$$C \sim \underbrace{\Gamma_{ab}\rho_i\delta_{ij}}_{\text{Onde grav.}} + \underbrace{\epsilon_i\delta_{ij}}_{\text{Clock/eph.}} + \underbrace{\eta_i\delta_{ab}\delta_{ij}}_{\text{Instr./jitter}} + \underbrace{\kappa_{ai}\delta_{ab}\delta_{ij}}_{\text{rot./disp.}}$$

qui dépend à la fois de l'amplitude du signal en fonction de la position sur le ciel et du « diagramme d'antenne » :

$$\boxed{\rho = h_c(f)^2/(12\pi^2 f^3 T_{\max})}$$

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



On recherche un signal corrélé !!!

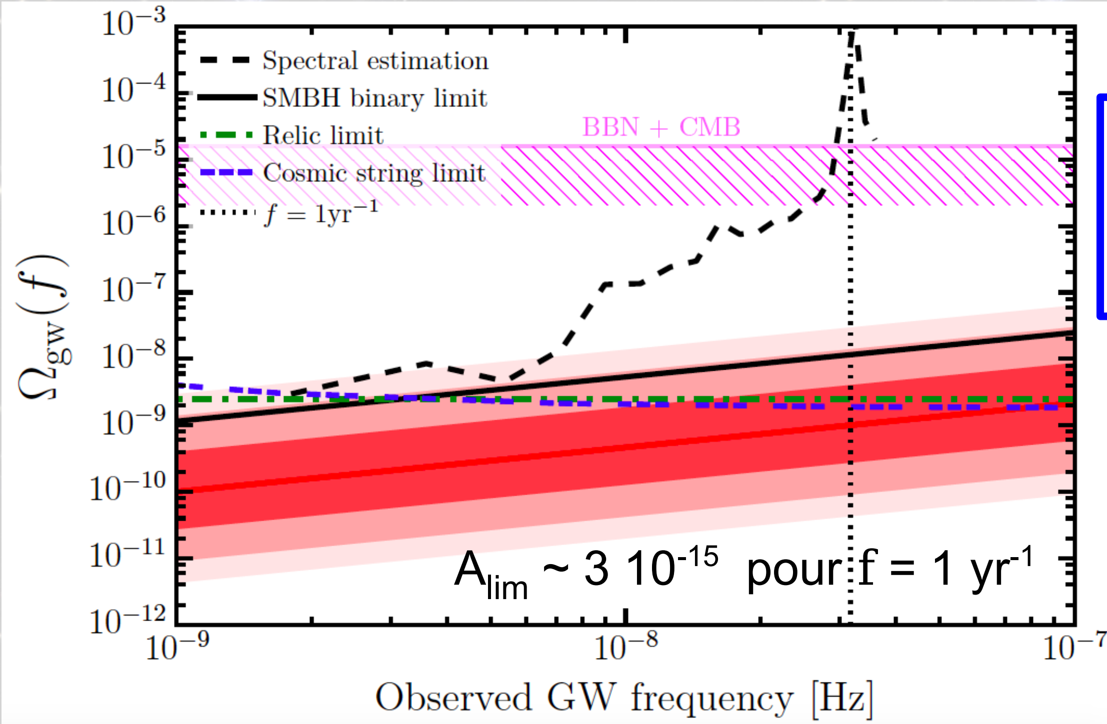
solution pour un fond isotrope :

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

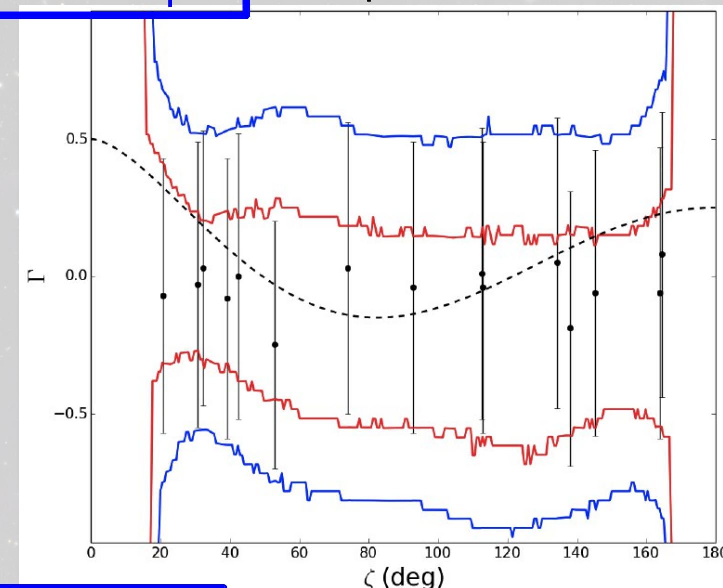
(Matrices ~ 30,000 x 30,000)

Premiers résultats européens en 2015

EPTA – 6 « best »
Lentati et al 2015
Limite sur un fond stochastique isotrope

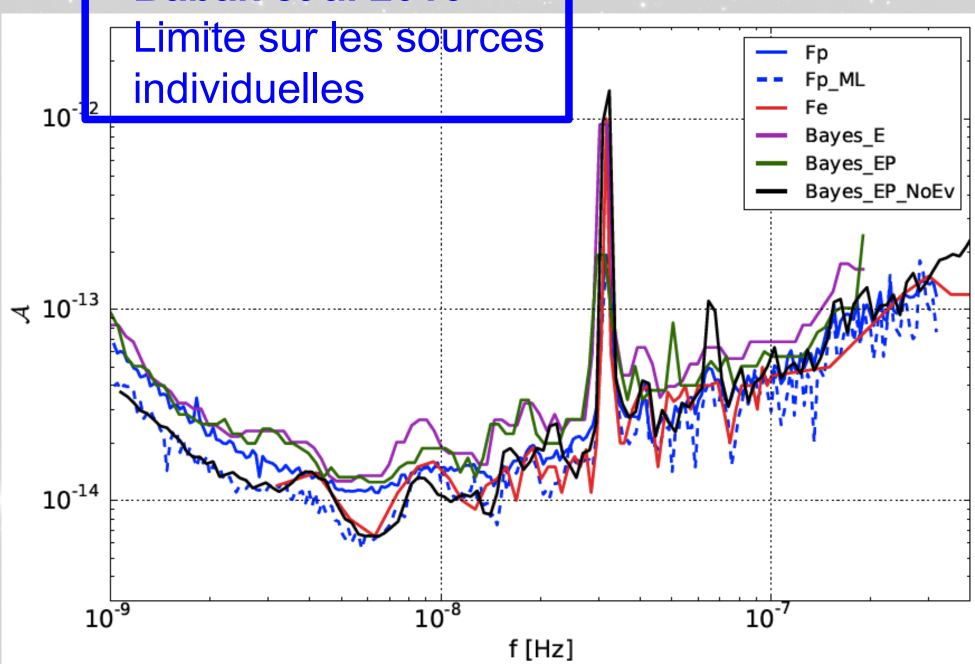


Courbe de corrélation de « Hellings&Downs » → pas de détection

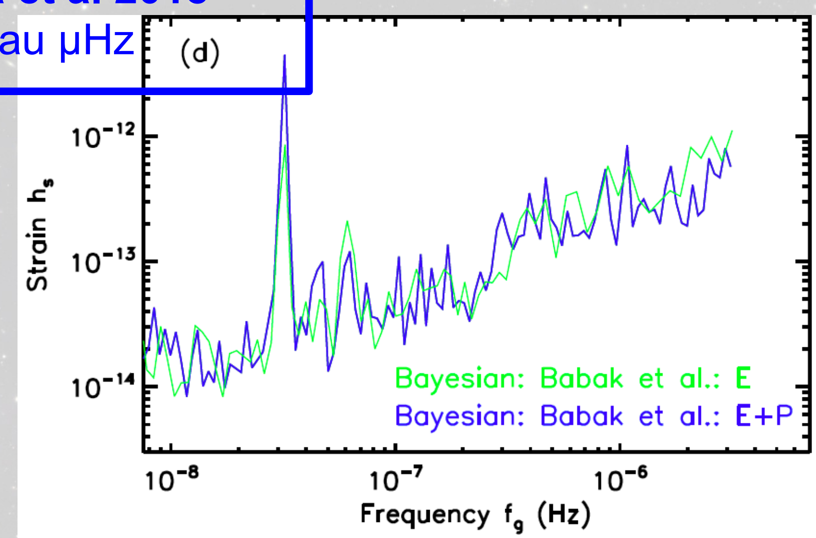


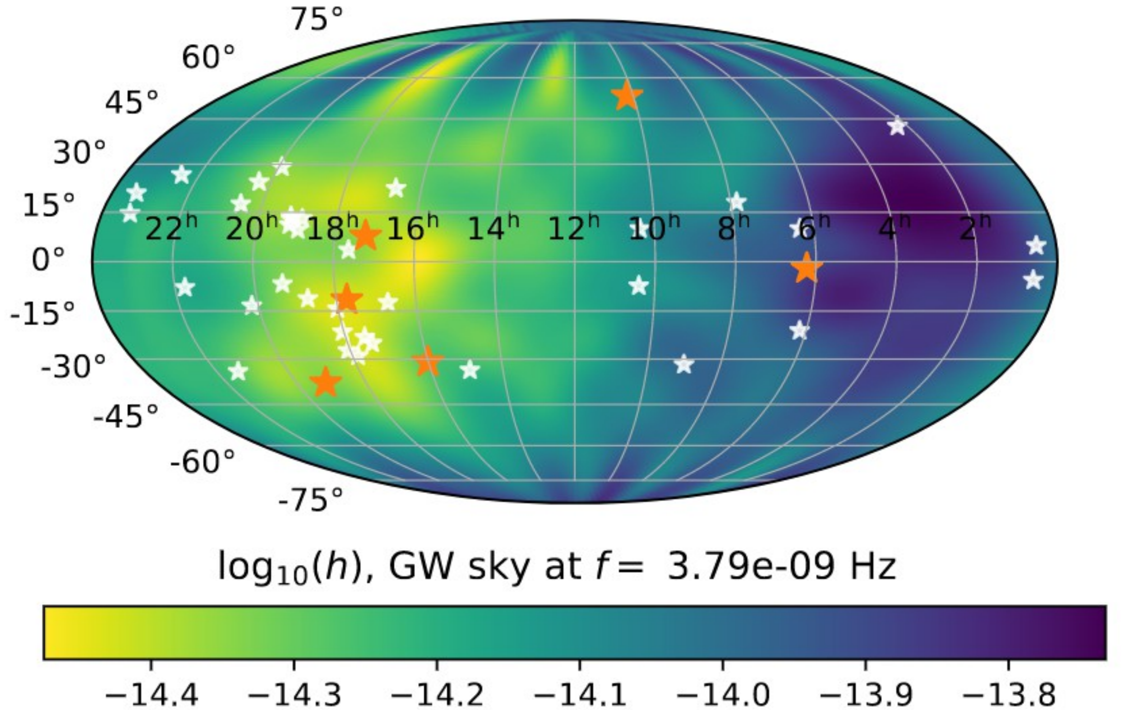
(Matrices ~ 30,000 x 30,000)

EPTA – 6 « best »
Babak et al 2016
Limite sur les sources individuelles



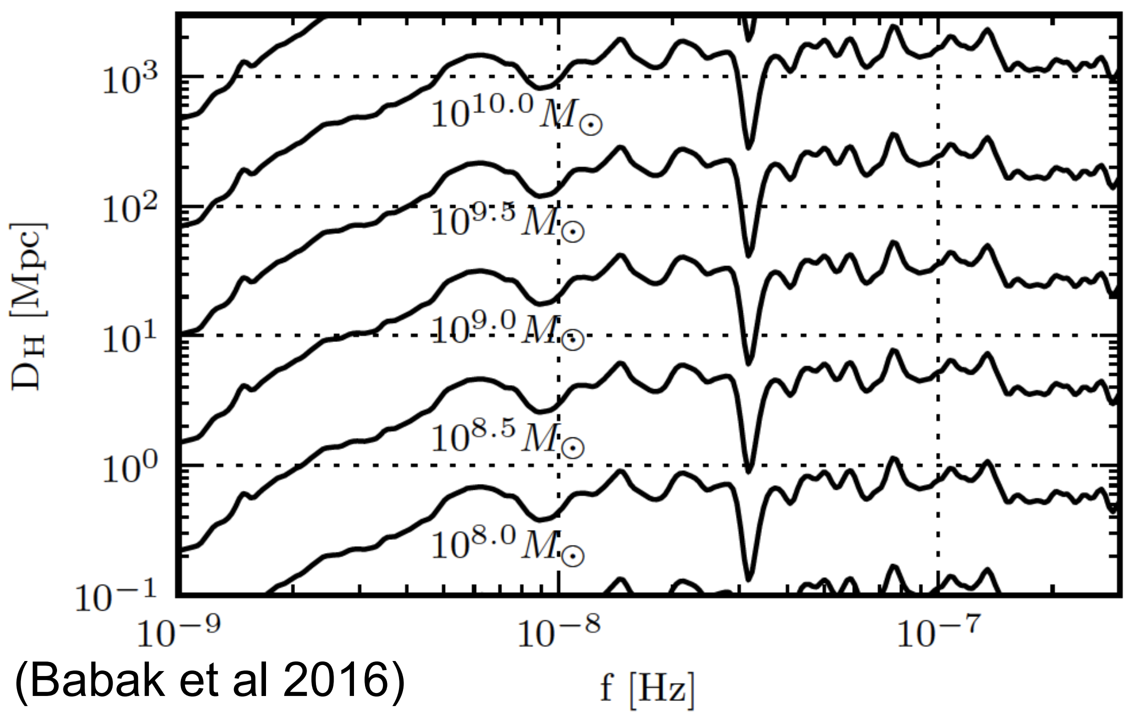
EPTA – « single »
Perera et al 2018
Limite au µHz





Mingarelli et al 2O17
Carte de sensibilité EPTA-2015 à 3.8 nHz

La sensibilité du réseau de pulsars dépend de la position sur la sphère céleste



(Babak et al 2016)

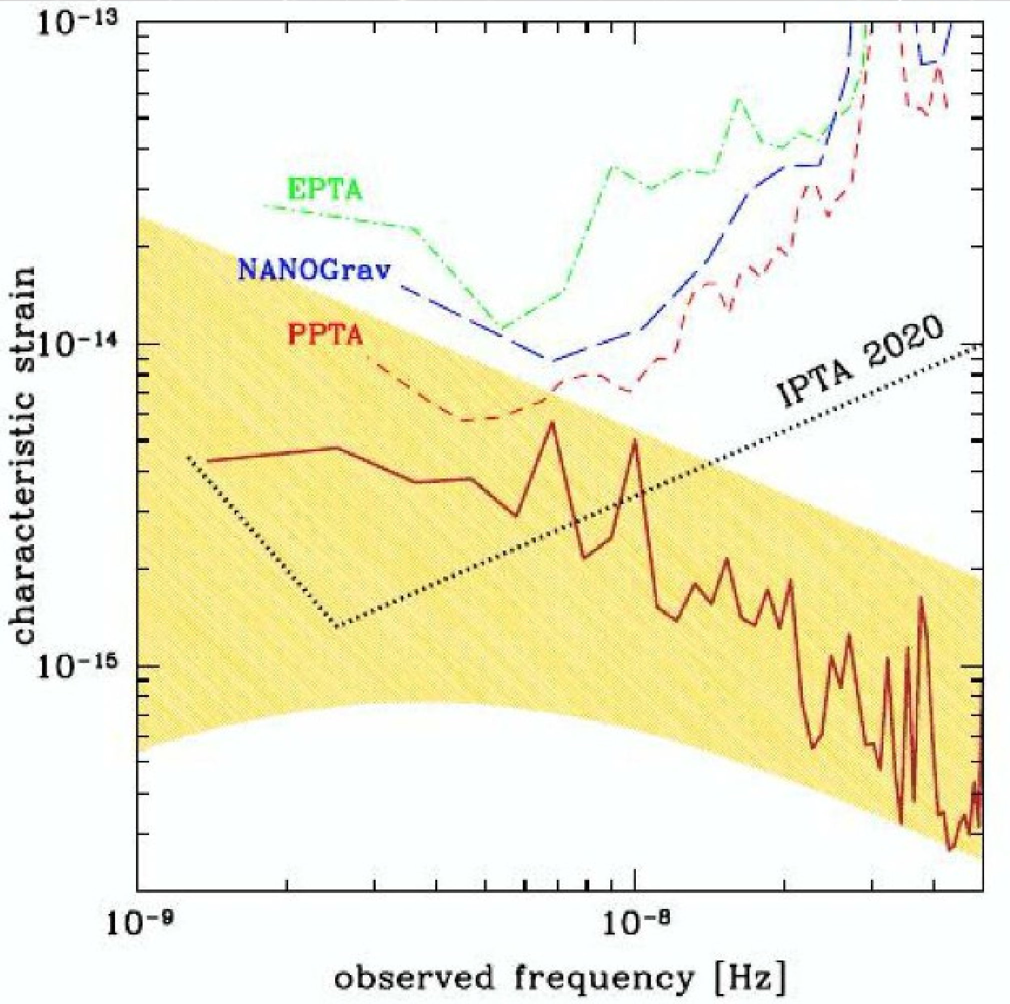
Les modèles astrophysiques courants prédisent **une probabilité de détection de 1% avec la Sensibilité de l'EPTA-2015**

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

de $\mathcal{M}c$ > 10^9 $M_\odot$ jusqu'à 25Mpc

de $\mathcal{M}c$ > 3 10^9 $M_\odot$ jusqu'à 200 Mpc

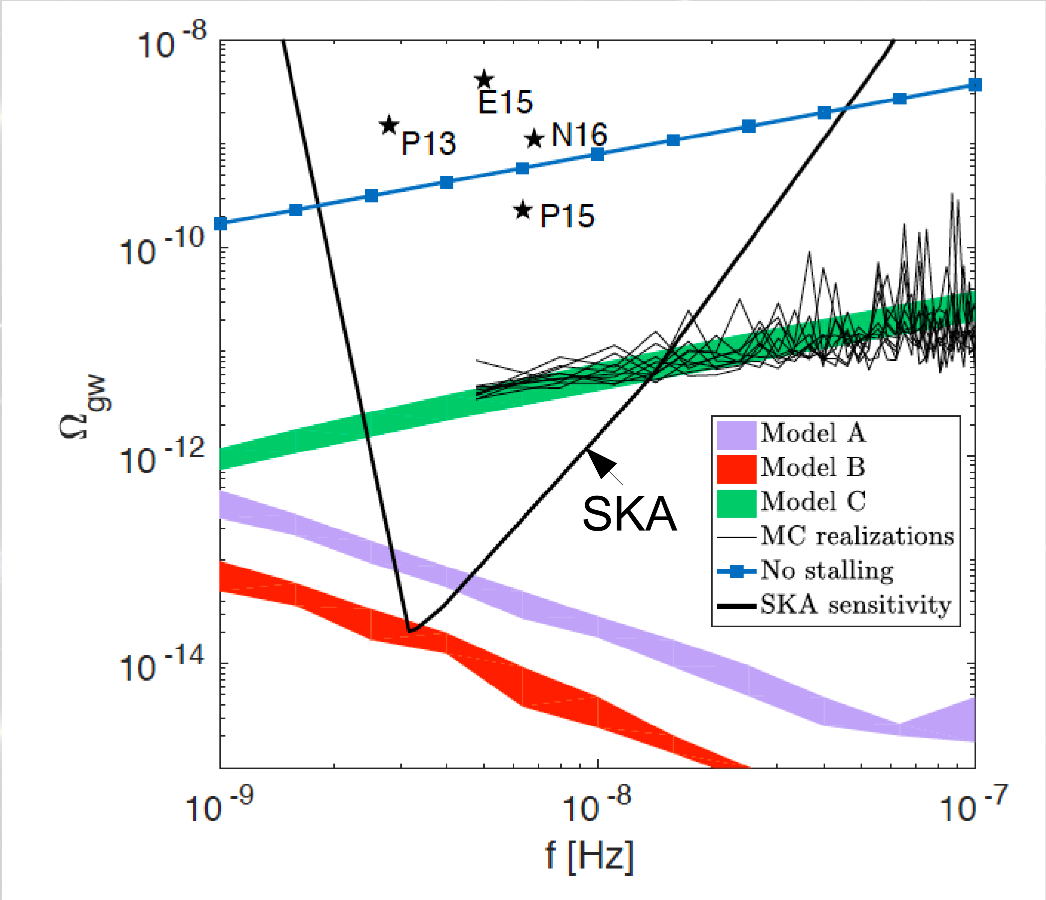
Bilan global 2017 des limites publiées



Hobbs et al 2017

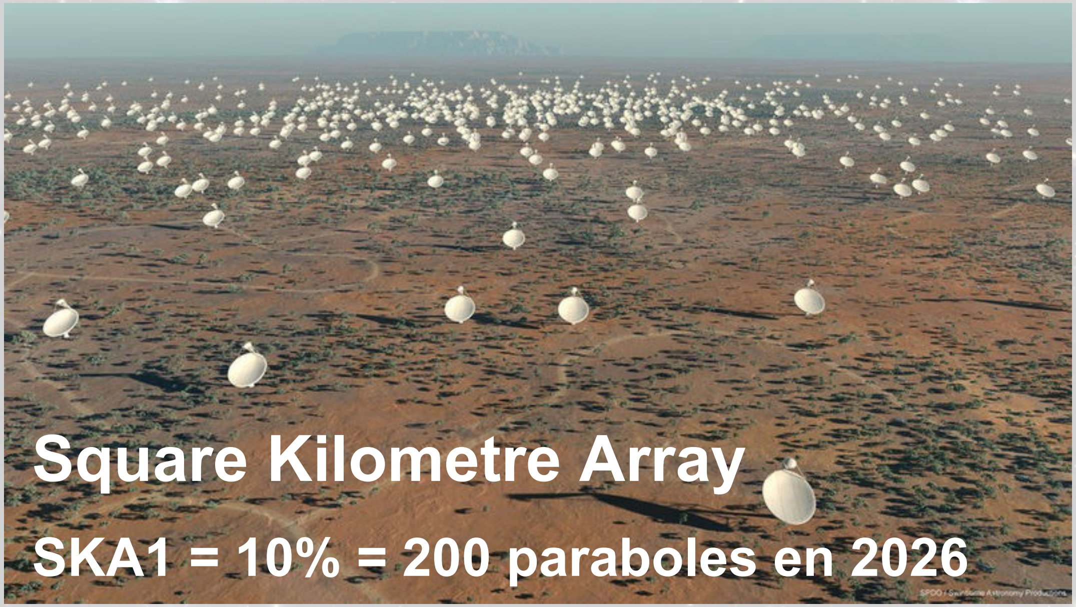
Une tendance qui montre qu'il manque des sources entre 1 et 10 nHz

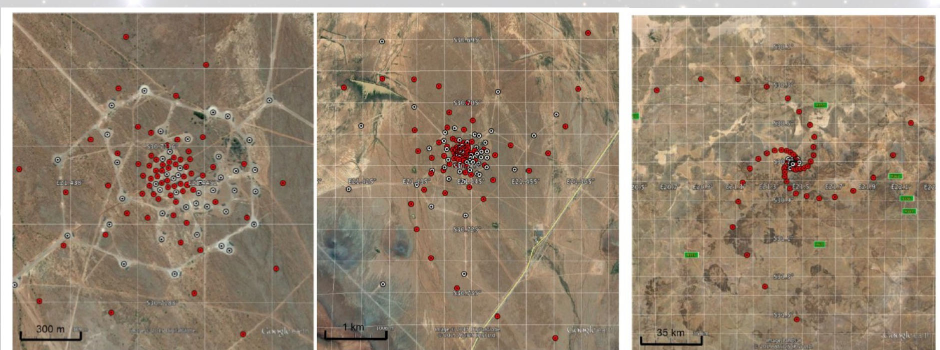
Des réflexions en cours sur les modèles de population



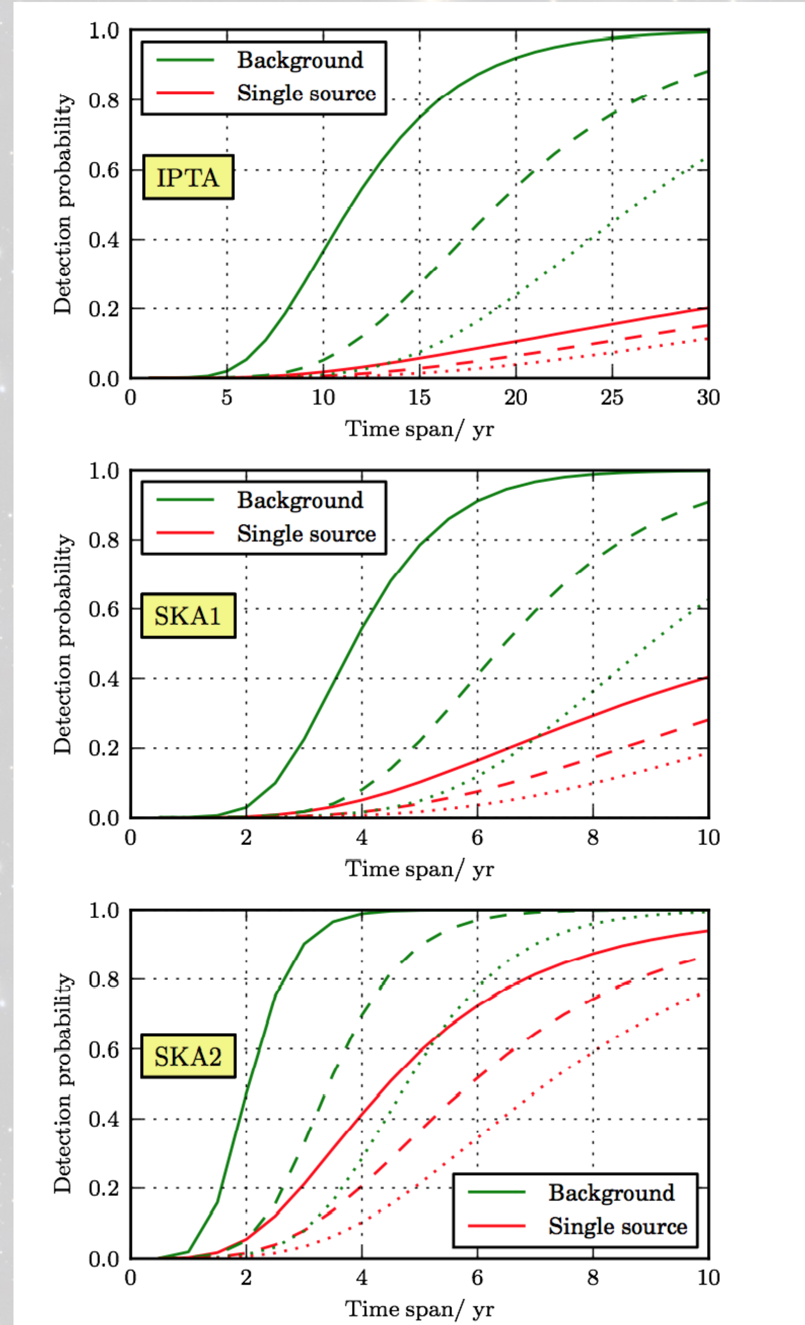
Dvorkin&Barause 2017

Le futur avec l'IPTA et SKA

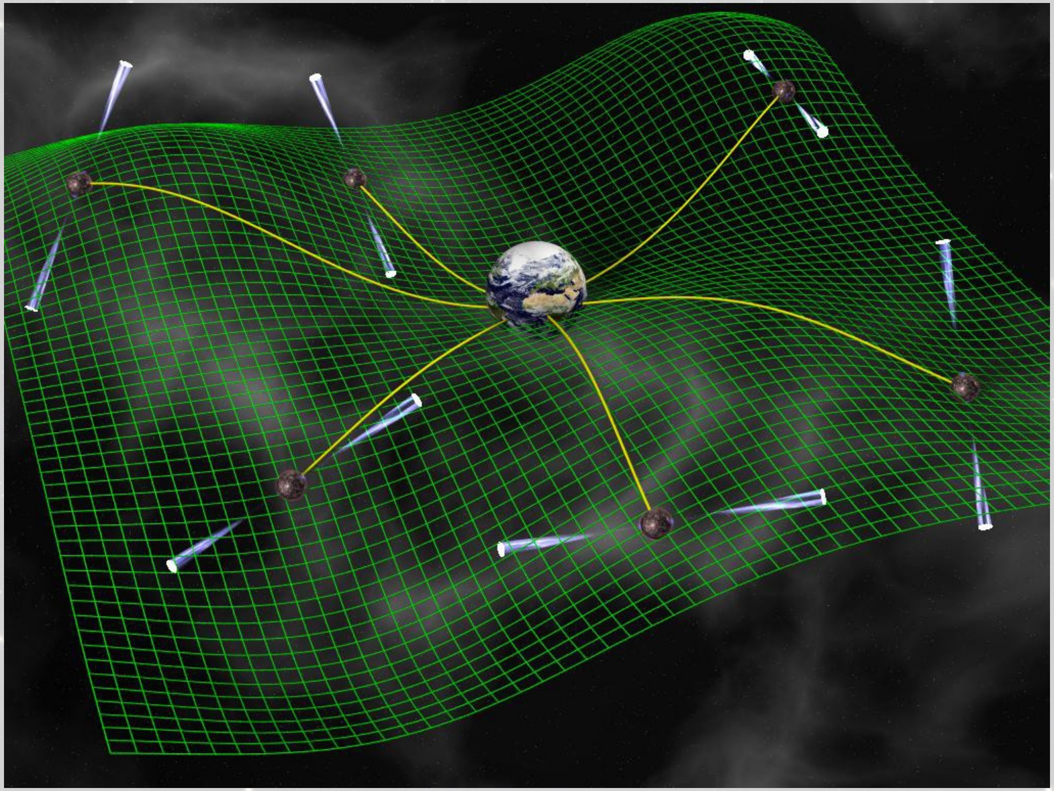




SKA-mid
en Afrique
du Sud



Rosado, Sesana & Gair 2015



Merci

Analyses de bruits

Bruits blancs (bruit non-corrélé)

Instrumental, **'pulse jitter'**

Bruits rouges (bruit corrélé)

Variations de la mesure de dispersion (DM)

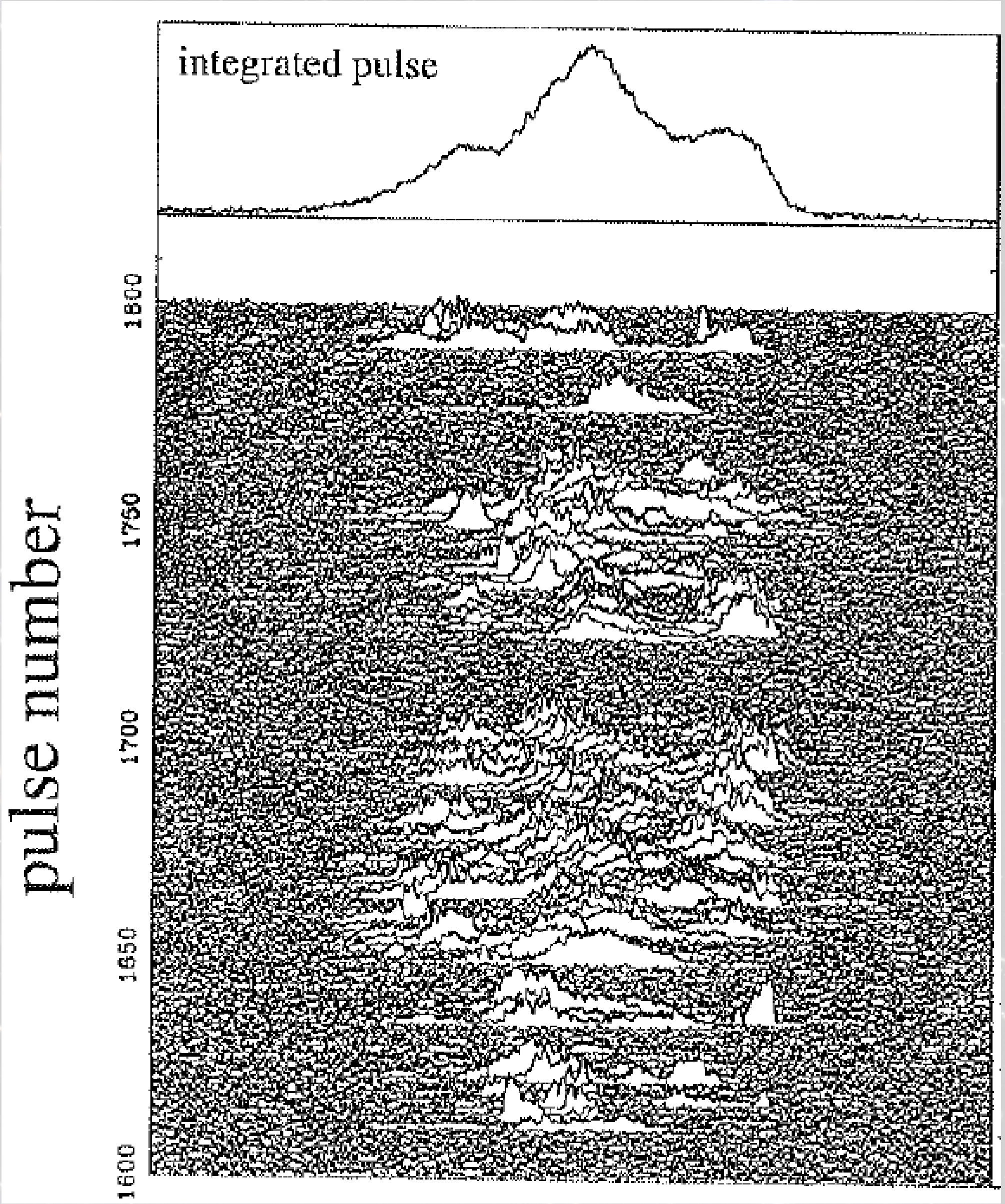
bruit de rotation

Variations d'horloges

Ephémérides du Système Solaire

Mouvement Galactique du Soleil (LSR)

Signature ondes gravitationnelles



PSR B1944+17
P = 440 ms
(Lorimer&Kramer 2005)

Analyses de bruits

Bruits blancs (bruit non-corrélé)

Instrumental, **'pulse jitter'**

Bruits rouges (bruit corrélé)

Variations de la mesure de dispersion (DM)

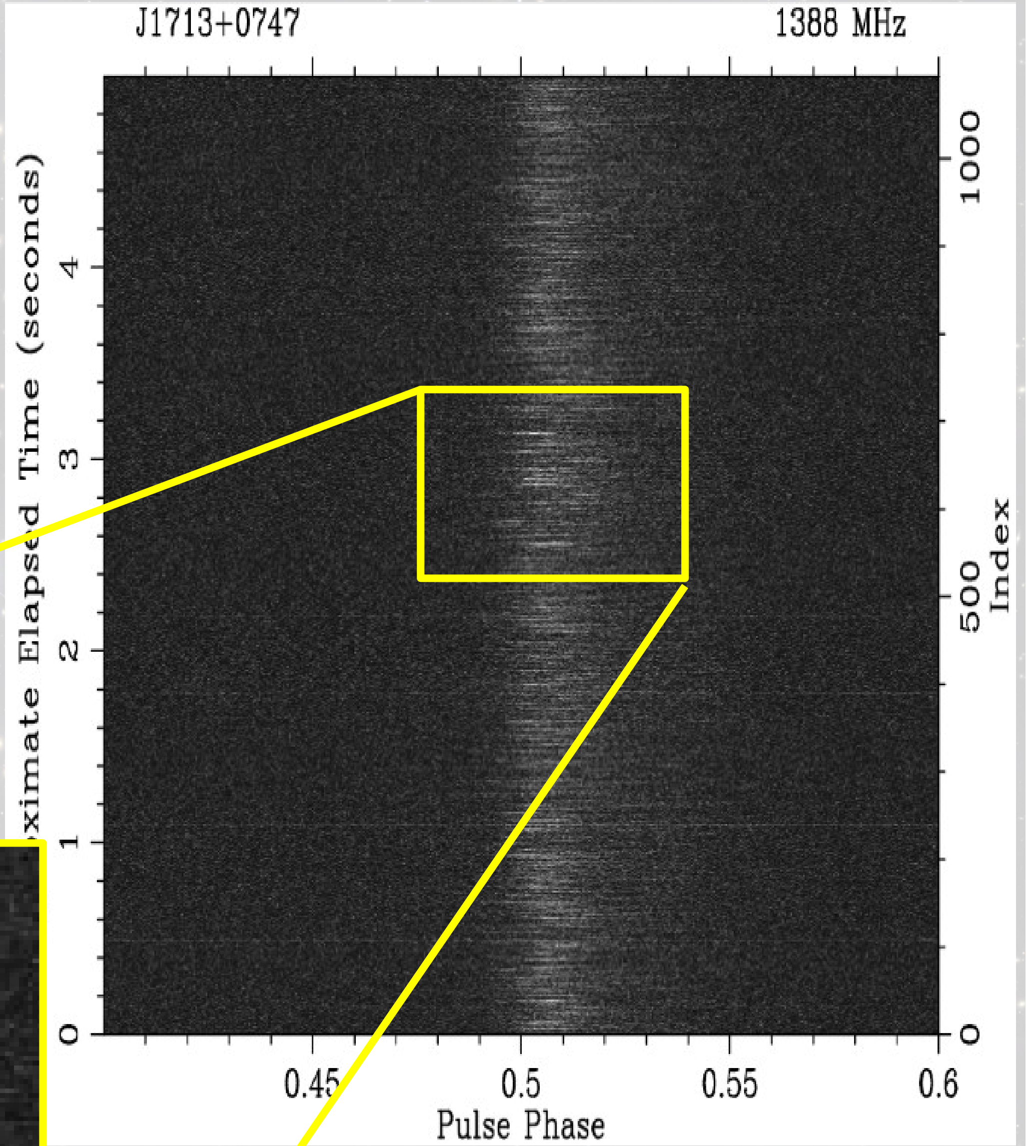
bruit de rotation

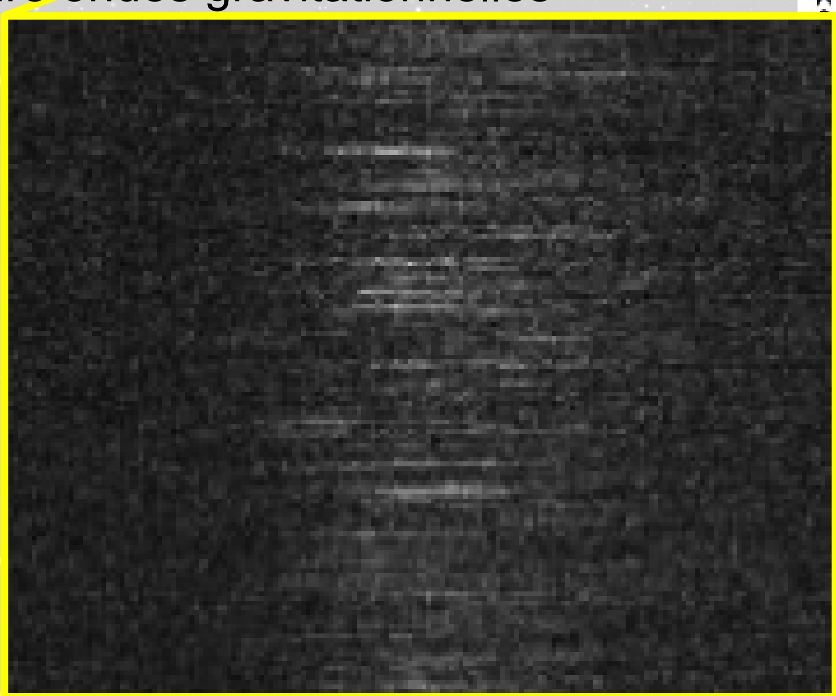
Variations d'horloges

Ephémérides du Système Solaire

Mouvement Galactique du Soleil (LSR)

Signature ondes gravitationnelles





PSRJ1713+0747

P = 4.57 ms

Observation LEAP

Variations 'pulse à pulse'

(Bassa et al 2015)

1% en phase ↔ ~100 ns sur 1 h

Analyses de bruits

Bruits blancs (bruit non-corrélé)

Instrumental, 'pulse jitter'

Bruits rouges (bruit corrélé)

Variations de la mesure de dispersion (DM)

bruit de rotation

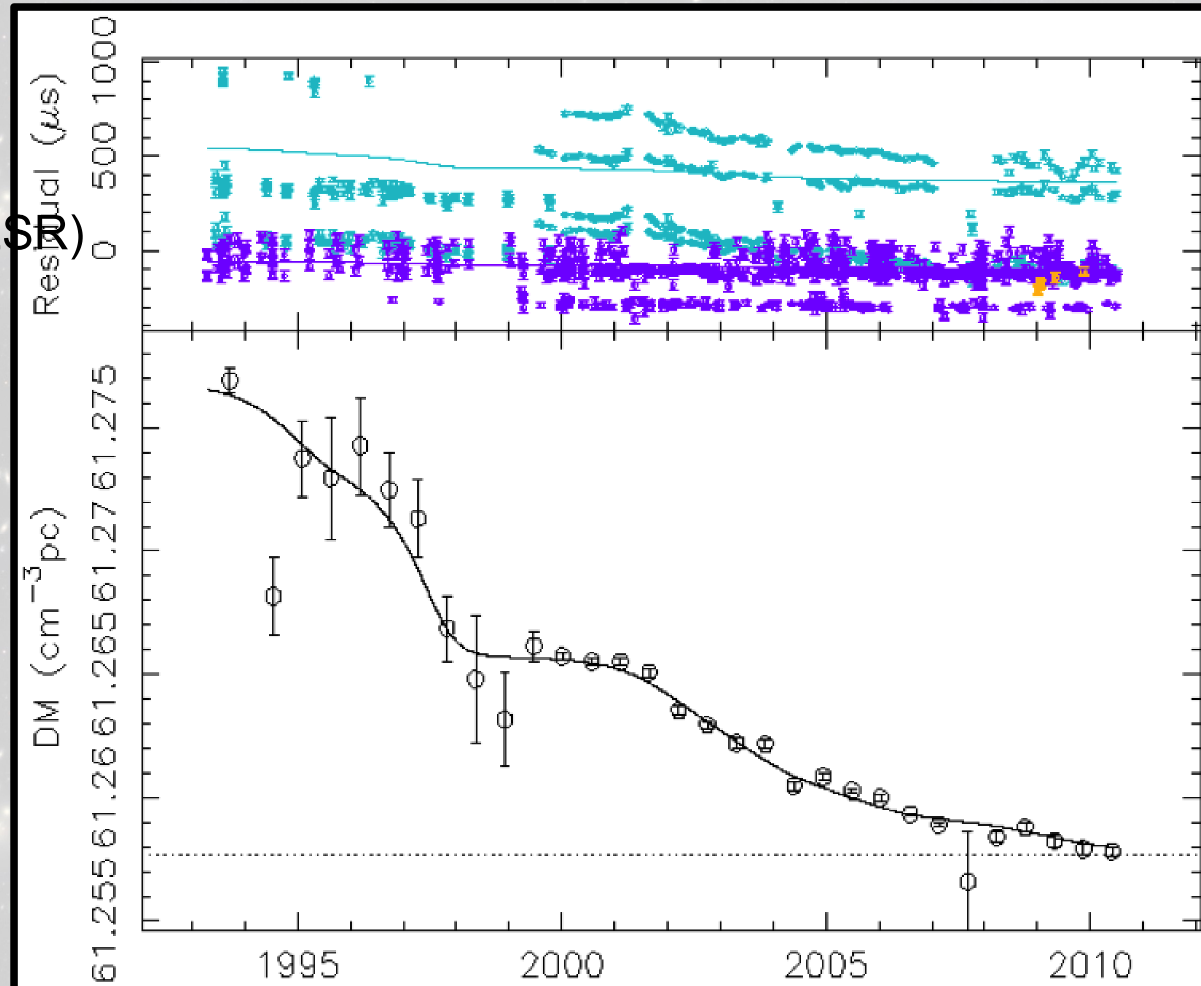
Variations d'horloges

Ephémérides du Système Solaire

Mouvement Galactique du Soleil (LSR)

Signature ondes gravitationnelles

Evolution sur 18 ans
de la mesure de dispersion (DM $\propto$ contenu e-)
pour le pulsar PSRJ0218+4232 (P=2.3 ms)



Besoin de collecter des mesures multi-fréquence avec un bras de levier suffisant :
500 MHz, 1400 MHz, 2.5 GHz

Analyses de bruits

Bruits blancs (bruit non-corrélé)

Instrumental, 'pulse jitter'

Bruits rouges (bruit corrélé)

Variations de la mesure de dispersion (DM)

bruit de rotation

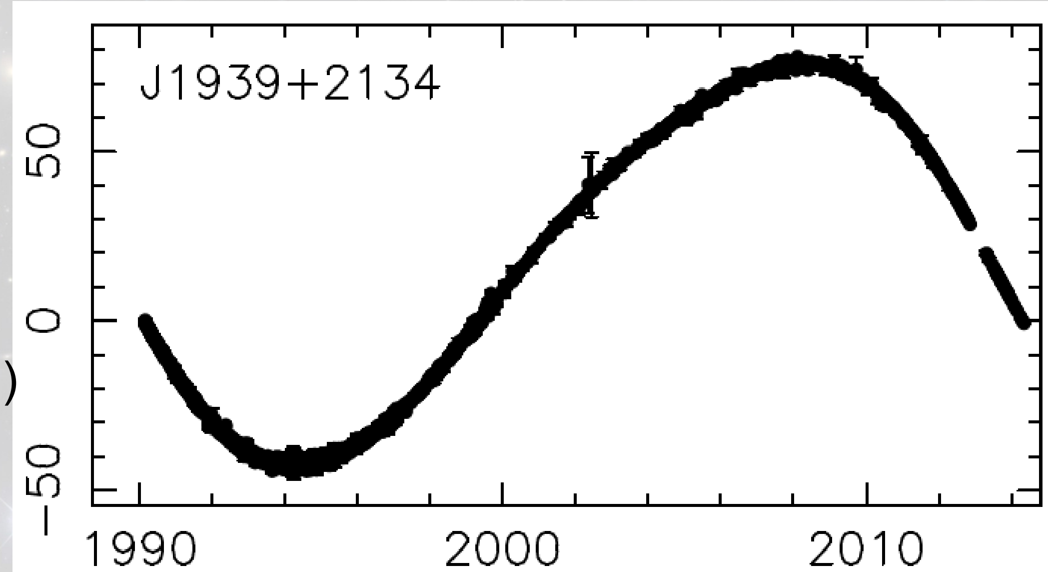
Variations d'horloges

Ephémérides du Système Solaire

Mouvement Galactique du Soleil (LSR)

Signature ondes gravitationnelles

P=1.55 ms rms ~ 34 .5 μs <unc.> ~ 60 ns

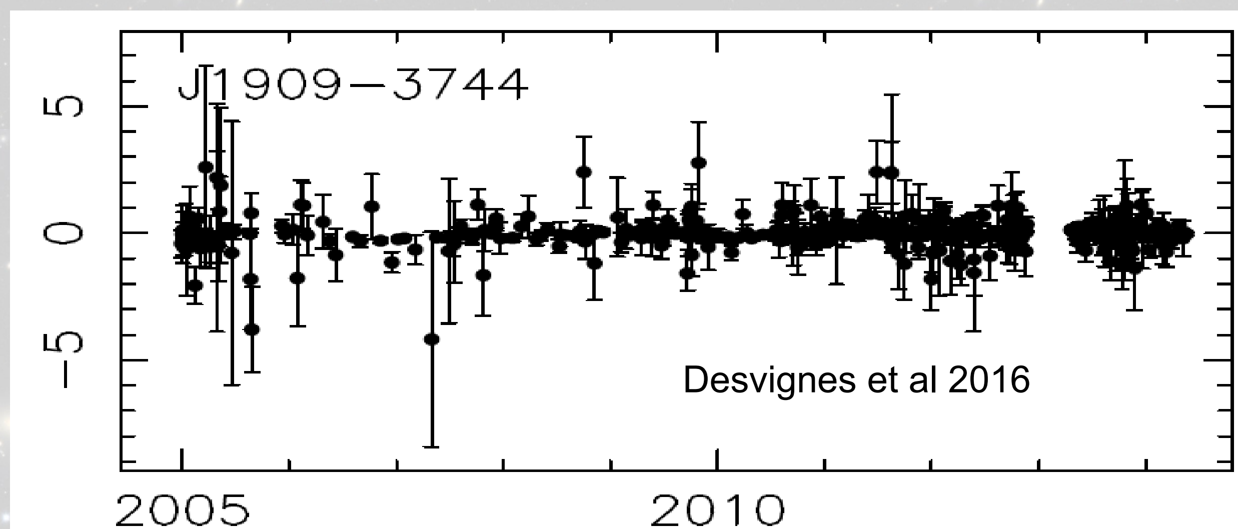


Perturbation d'un disque de petits corps ?

Variations de Edot ?

Séries de micro-glitches ?

P=2.9 ms rms ~ 0.092 μs <INC‰> ~ 60 ns



Améliorations du jeu de données à court terme au NRT

Nouveaux résultats NUPPI

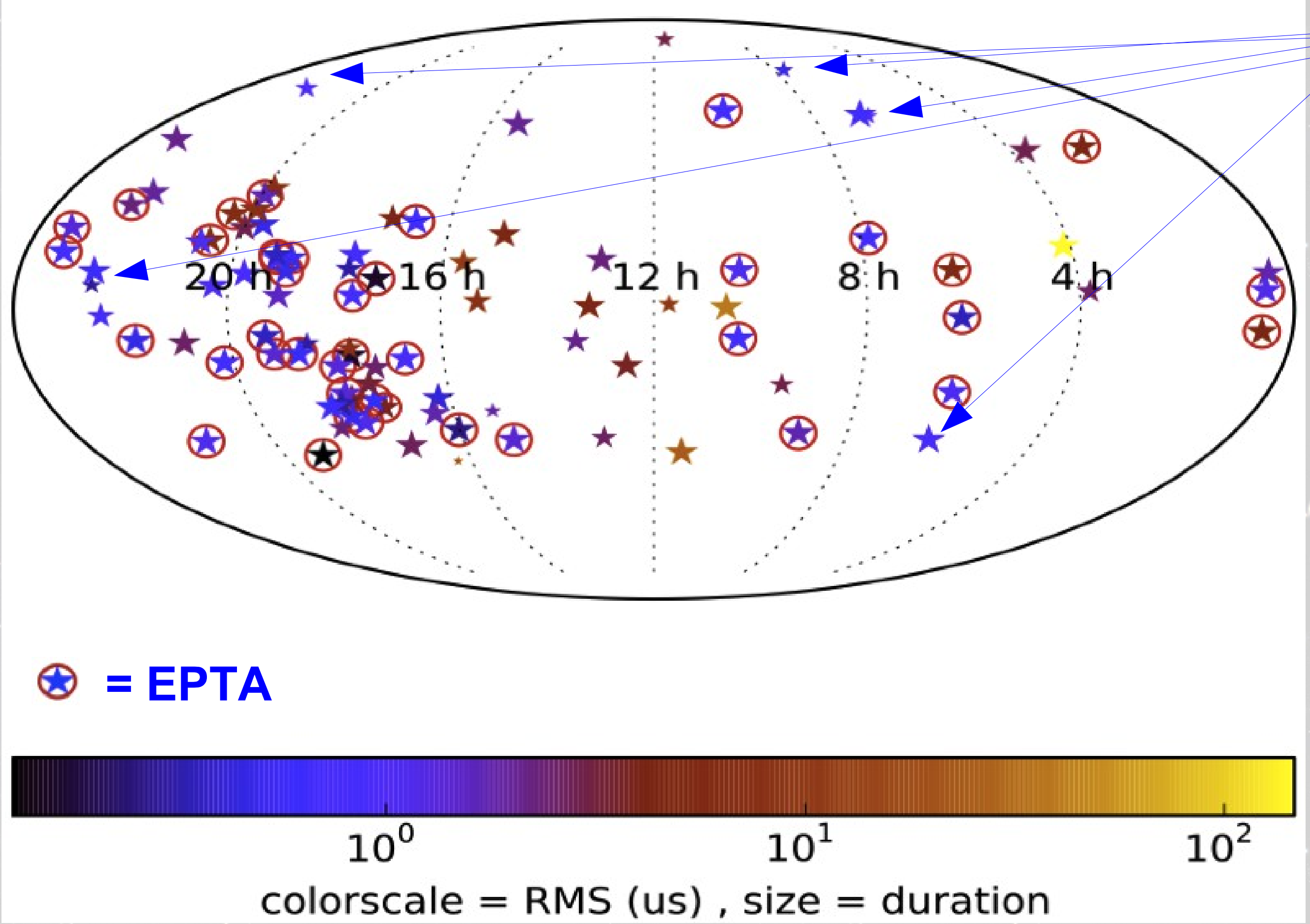
N(rms < 500 ns) = 15
N(rms < 800 ns) = 30
N(rms < 1 μs) = 40

Performances BON (2015 EPTA-paper I)

N(rms < 500 ns) = 2
N(rms < 800 ns) = 5
N(rms < 1 μs) = 8

> 200 pulsars suivis très régulièrement

Répartition des MSPs stables sur le ciel



Quelques très bons candidats « PTA »

Cf Petiteau 2015

Besoin de rechercher de nouveaux objets

→ relevés aveugles

→ l'aide de Fermi

→ SKA

Les scenarii pessimistes

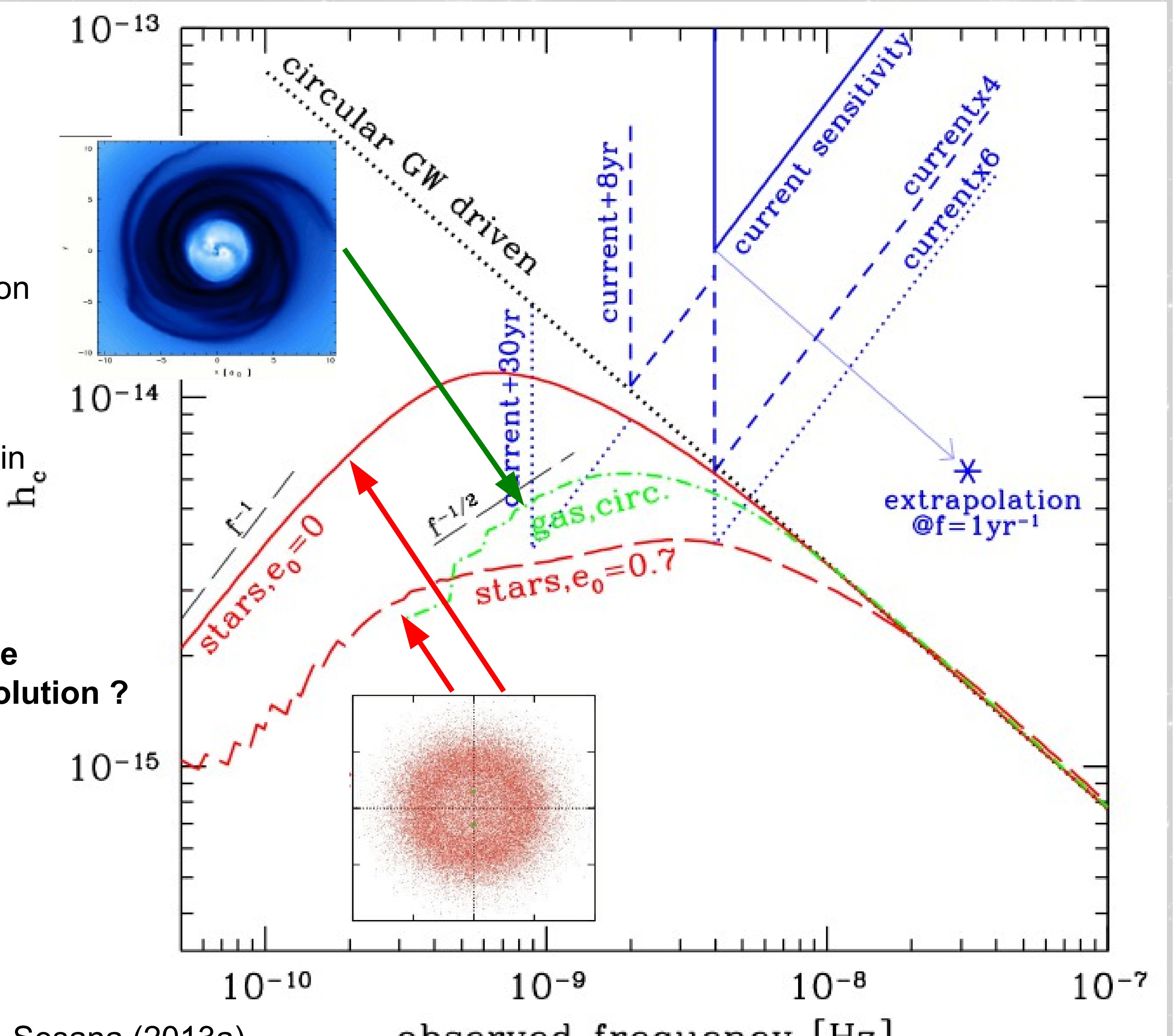
Contribution des disques d'accrétion

+

Orientation du spin

Excentricité

Quelle échelle de temps pour l'évolution ?



Sesana (2013a)

GW amplitude :

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

$$\mathcal{A} = 2\frac{\mathcal{M}_c^{5/3}}{D_L}(\pi f)^{2/3}$$

i	inclinaison,
Φ	phase,
$f = 2\pi\omega$	fréquence de l'onde Gr,
Mc	chirp mass,
D_L	distance à la source Gr,
Ψ	décalage de phase dans le terme pulsar,
(p , q)	vecteur de polarisation de l'onde Gr

terme Terre & terme pulsar

$$r_\alpha^e(t) = \frac{\mathcal{A}}{2\pi f}\{(1+\cos^2\iota)F_\alpha^+[\sin(\omega t+\Phi_0)-\sin\Phi_0] + 2\cos\iota F_\alpha^\times[\cos(\omega t+\Phi_0)-\cos\Phi_0]\},$$

$$r_\alpha^p(t) = \frac{\mathcal{A}_\alpha}{2\pi f_\alpha}\{(1+\cos^2\iota)F_\alpha^+[\sin(\omega_\alpha t+\Psi_\alpha+\Phi_0) - \sin(\Psi_\alpha+\Phi_0)] + 2\cos\iota F_\alpha^\times[\cos(\omega_\alpha t+\Psi_\alpha+\Phi_0) - \cos(\Psi_\alpha+\Phi_0)]\},$$

$$F_\alpha^+ = \frac{1}{2}\frac{(\hat{n}^\alpha.\vec{p})^2-(\hat{n}^\alpha.\vec{q})^2}{1+\hat{n}^\alpha.\hat{k}}$$
$$F_\alpha^\times = \frac{(\hat{n}^\alpha.\vec{p})(\hat{n}^\alpha.\vec{q})}{1+\hat{n}^\alpha.\hat{k}}$$

p, q = polarisation vectors

→ **4 x 2 x Nobs x Npsr + 2 x Npsr x NGW** **(Matrices ~ 30,000 x 30,000)**

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**

$$P(\vec{\delta t}, \vec{\theta}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{n-m} det(G^T C G)}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\vec{\delta t} - \vec{r})^T G (G^T C G)^{-1} G^T (\vec{\delta t} - \vec{r}) \right)$$

δt : données (résidus de temps d'arrivée),

r : modèle (résidus) ; signal gravitationnel pour la recherche de sources continues

C : matrice variance-covariance : bruits de chronométrage + fond d'ondes gravitationnelles,
pur bruit blanc → diagonale
bruits rouge+blanc / pulsars → block-diagonale

G : matrice dérivée de la 'design matrix' (linéarisation des modèles de rotation des pulsars),

n : nombre de TOAs,

m : nombre de paramètres du pulsar

(Matrices ~ 30,000 x 30,000)

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

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 » :

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